

Tiré à part article Forêt.Nature

Merci pour votre participation à ce numéro de Forêt.Nature.

La version électronique de votre article est fournie uniquement à usage personnel et ne peut être diffusé largement sans l'autorisation préalable de la rédaction.

En cas d'archivage sur serveur informatique, merci d'indiquer la source originale de la publication comme ceci : « Article paru dans Forêt.Nature : www.foretwallonne.be ».

Abonnez-vous gratuitement au **Forêt-MAIL** sur notre site
www.foretwallonne.be

Bénéficiez d'une réduction sur votre abonnement à **Forêt.Nature**
pour la première année

et abonnez vos **étudiants** au tarif spécial qui leur est réservé

Vingt ans de mesures des échanges de CO₂ et de vapeur d'eau à l'Observatoire Terrestre de Vielsalm

Marc Aubinet¹ | Caroline Vincke² | Bernard Heinesch¹
Quentin Hurdebise¹ | Tanguy Manise³

¹ Échanges Écosystèmes-Atmosphère (ULg, GxABT)

² Earth & Life Institute, Environmental Sciences (UCL, ELI)

³ Phytotechnie des régions tempérées (ULg, GxABT)

Afin de mieux comprendre le rôle des forêts et des écosystèmes terrestres dans la séquestration du carbone et l'atténuation des effets du changement climatique, des chercheurs mesurent depuis 20 ans les flux de CO₂ et de vapeur d'eau au-dessus d'une forêt.

RÉSUMÉ

La séquestration du carbone via l'assimilation nette de CO₂ par les écosystèmes terrestres varie fortement d'une année à l'autre. La compréhension plus fine de ce phénomène est nécessaire pour pouvoir prédire si les écosystèmes continueront à se comporter comme des puits de carbone ou si la séquestration va diminuer voire s'inverser complètement, transformant les écosystèmes en source de carbone. Pour mesurer les échanges nets de CO₂, les chercheurs ont notamment

installé un « Observatoire Terrestre » dans une forêt à Vielsalm qui a permis de mettre en évidence les dynamiques journalière, saisonnière et interannuelle de la séquestration du carbone. La mesure simultanée de l'évapotranspiration réelle permet de plus d'évaluer la consommation en eau des espèces présentes. Les mesures effectuées durant 20 ans montrent que la forêt se comporte comme un puits de carbone.

Si l'existence du changement climatique et son origine anthropique ne font plus l'objet du moindre doute, ainsi que l'attestent les rapports successifs du GIEC^{9,10}, de nombreuses interrogations subsistent quant aux processus régissant ce changement. En particulier, des recherches sont encore nécessaires pour comprendre le rôle que peuvent jouer les écosystèmes terrestres en général et les forêts en particulier dans l'atténuation du changement climatique.

Il est en effet établi que la cause principale du changement climatique est l'augmentation de la teneur de l'atmosphère en gaz à effet de serre (GES) suite aux activités humaines. Parmi ces gaz, le plus important est le dioxyde de carbone (CO₂). Mais on sait aussi que le CO₂ est échangé, d'une part, entre l'atmosphère et les océans et, d'autre part, entre l'atmosphère et les écosystèmes terrestres, ces derniers séquestrant environ 30 % du CO₂ émis par les activités humaines¹⁶ (figure 1). Ils contribuent donc à atténuer le changement climatique en ralentissant l'augmentation de la teneur en CO₂ de l'atmosphère qui, sans eux, serait encore plus rapide.

Toutefois on comprend beaucoup moins quels sont les mécanismes responsables de cette séquestration. De fait, on observe que l'intensité du puits de carbone* constitué par les écosystèmes terrestres varie fortement d'une année à l'autre (figure 2) sans que l'on puisse en identifier clairement les causes. En conséquence, il est impossible de prédire si, dans un avenir proche, cette séquestration va s'accroître, se maintenir, diminuer, voire s'inverser complètement, les écosystèmes se transformant alors en sources de carbone*. De ce comportement futur dépendra non seulement l'ampleur mais aussi la vitesse d'établissement du changement climatique.

Une compréhension plus fine des mécanismes contrôlant les échanges nets de CO₂ à l'échelle des écosystèmes est donc nécessaire. Toutefois, la difficulté provient du fait qu'il y a deux mécanismes concurrents : d'une part, la photosynthèse* des plantes (productivité primaire brute*, PPB) absorbe le CO₂ de l'atmosphère ; d'autre part, la respiration des plantes et des microorganismes du sol (respiration totale de l'écosystème, RECO*) réémet du CO₂ (voir illustration encart 1). Le comportement de source ou de puits de carbone des écosystèmes terrestres dépendra finalement du mécanisme qui l'emportera. Or, si ces mécanismes sont bien connus et quantifiables à l'échelle de la cellule ou de la bactérie, ils sont plus difficiles à évaluer à l'échelle de l'écosystème : en effet, comme l'échange net* est typiquement dix fois plus petit que la PPB et la RECO, il suffit d'une varia-

tion de 10 % d'un de ces flux pour que l'écosystème bascule complètement d'un puits net à une source nette de carbone.

Dans ce contexte, une mesure directe de ces échanges constitue un apport précieux. De plus, si cette mesure se réalise de manière continue et à long terme, elle peut permettre d'étudier les dynamiques journalières, saisonnières et, à l'échelle interannuelle, permet de couvrir des années contrastées du point de vue climatique (stress hydrique, canicule, gel...), de suivre l'évolution de la phénologie des arbres en lien avec le changement climatique ou d'étudier les arrière-effets de saisons particulières. Ceci permet d'améliorer notre compréhension des mécanismes régissant les échanges de CO₂ à l'échelle des écosystèmes. Dans le cas des forêts, cette compréhension est aussi indispensable à la mise en place de toute stratégie de gestion qui chercherait à optimiser leur rôle de puits.

C'est avec ces objectifs qu'a été installé il y a près de vingt ans l'Observatoire Terrestre de Vielsalm (OTV). Après en avoir fait un bref historique, nous mettrons en évidence quelques résultats clés issus des multiples recherches qui y ont été développées.

Historique

Jusqu'à la fin des années '90, il semblait admis que le rôle des écosystèmes terrestres dans le bilan global de carbone était limité : on supposait en effet que, dans les écosystèmes matures, l'absorption de CO₂ par les feuilles lors de la photosynthèse étant compensée par son émission lors de la respiration de l'écosystème, l'ensemble produisant un bilan nul. C'est le deuxième rapport d'évaluation du GIEC¹⁸ qui fera apparaître une discordance entre les croissances annuelles de la concentration atmosphérique de CO₂ mesurées par les stations de mesure atmosphériques¹⁴ et celles calculées sur base d'un inventaire des flux échangés par les différents puits et sources de carbone. Cette discordance se traduira par un puits non expliqué de 1,3 PgC/an (le « *missing sink* ») et plusieurs pistes, impliquant tous les écosystèmes terrestres, seront avancées. Avant tout, la nécessité de mieux évaluer les échanges entre ces écosystèmes et l'atmosphère s'imposera.

Le problème était que pour réaliser cette évaluation, il était nécessaire de réaliser une mesure directe, continue et à long terme de l'échange net de CO₂ par

* Les termes ou expressions suivis d'un astérisque sont définis dans l'encart 1.

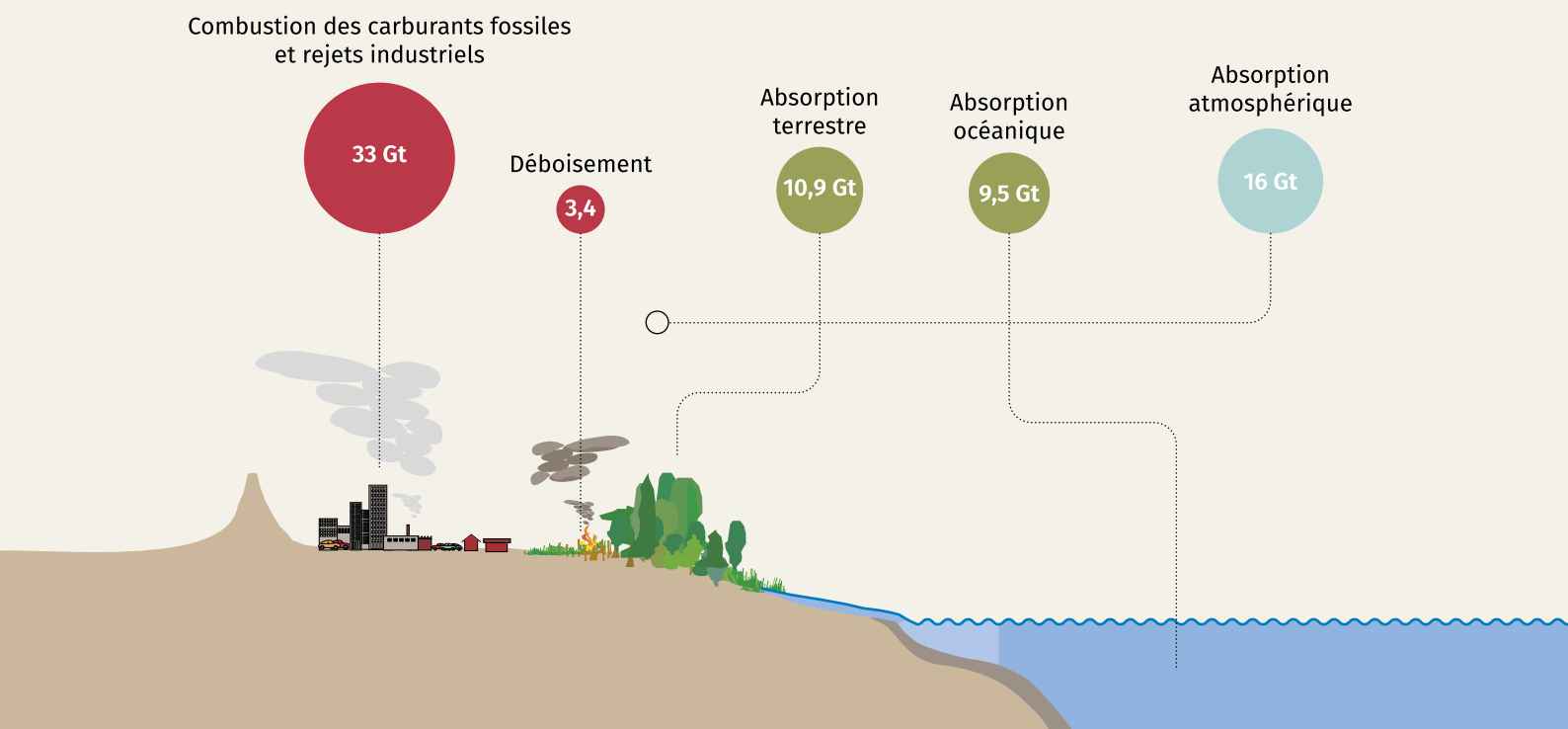
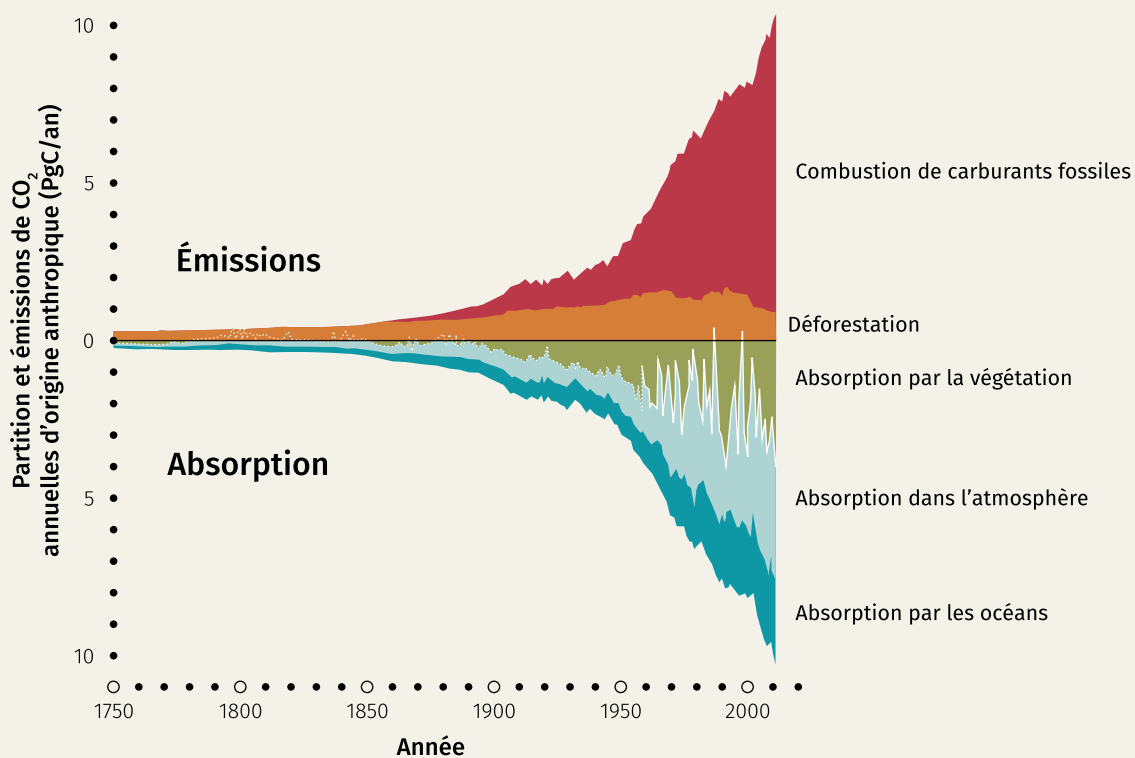


Figure 1. Perturbations du cycle global de carbone causées par les activités anthropiques (en Gt de CO₂/an). Moyenne globale pour la période 2005-2014. On voit que, sur les 36,4 Gt de CO₂ émises par les activités humaines, 10,9 sont réabsorbées par les écosystèmes terrestres et 9,5 par les océans¹⁶ (source : Global Carbon Project 2015).

Figure 2. Évolution annuelle de la partition des émissions anthropogéniques entre atmosphère, océans et biosphère terrestre (PgC/an)⁷ (source : Global Carbon Project 2015¹⁶).



Encart 1. Quelques définitions

Réservoir de carbone. À l'échelle de la planète, les réservoirs de carbone sont l'atmosphère, les océans, la biosphère (en ce compris les sols), la lithosphère... À l'échelle d'une forêt, les réservoirs principaux sont le sol (y compris la litière et l'humus), la biomasse aérienne et racinaire et les produits du bois.

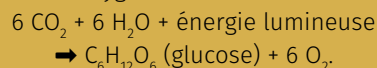
Stock de carbone. Une masse de carbone capitalisée dans un réservoir.

Flux de carbone. Transport d'une quantité de carbone durant un intervalle de temps donné (masse de carbone par unité de temps, tC/an). Une tonne de CO₂ est comptabilisée comme 0,273 tonne de carbone (on ne compte pas les deux atomes d'oxygène). On appelle **flux net** la différence entre le flux sortant et le flux entrant d'un réservoir. Le flux net de CO₂ à l'interface écosystème-atmosphère s'appelle la **NEE** (*Net Ecosystem Exchange*) et se mesure par la **méthode des fluctuations turbulentes** (*eddy covariance*).

Source de carbone. Un réservoir qui émet du carbone vers l'atmosphère (**flux net positif**). Exemples de processus par lesquels un réservoir devient source : la combustion d'énergies fossiles, la production de ciment et le changement d'affectation des terres.

Puits de carbone. Un réservoir qui prélève du carbone à l'atmosphère (**flux net négatif**). Exemple de processus

impliqué : la photosynthèse. Cette réaction biochimique est réalisée par les feuilles. Elle consiste en la synthèse de glucides à partir du CO₂ atmosphérique et de l'eau, avec libération d'oxygène :



L'eau utilisée dans cette équation représente moins de 5 % du flux transpiratoire.

Productivité Primaire Brute (PPB). Elle correspond à la photosynthèse réalisée par l'ensemble des feuilles à l'échelle de l'écosystème⁶.

Productivité Nette de l'écosystème (PNE). Elle correspond à la différence entre la PPB et la **respiration de l'écosystème (RECO)**. Cette dernière est la somme de la **respiration autotrophe (Ra** : respiration des organes des végétaux) et de la **respiration hétérotrophe (Rh** : respiration des décomposeurs et de l'activité microbienne). L'équation de la respiration est l'inverse de celle de la photosynthèse.

$$\text{PNE} = \text{PPB} - (\text{Ra} + \text{Rh}) \text{ avec } (\text{Ra} + \text{Rh}) = \text{RECO}$$

Sur des intervalles de temps courts, la **PNE** peut être assimilée à la **NEE**. À des échelles de temps plus longues, il faut prendre en compte également les pertes en carbone via les incendies, les éclaircies, les récoltes etc., ce que l'on appelle les **flux latéraux**.

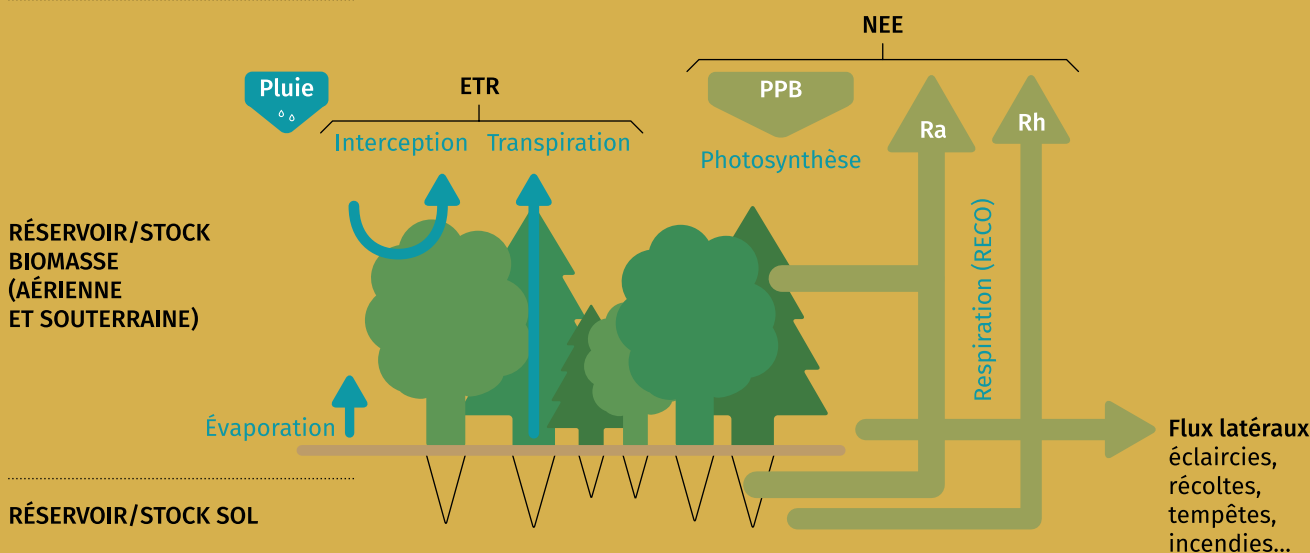
Flux de CO₂ et d'H₂O mesurés par *eddy covariance* (respectivement NEE et ETR) et processus associés (en bleu) ; à gauche, les réservoirs/stocks.

Ordres de grandeur en gC/m²/an¹⁹
(valeurs moyennes pour les forêts européennes) :

- PPB : 1107 (± 55)
- Ra : 589 (± 88)
- Rh : 368 (± 107)
- NEE : 150
- flux latéraux : 75 (± 11)

ATMOSPHÈRE

Climat



les écosystèmes. Or, grâce aux récentes avancées des techniques métrologiques et de la recherche en physique atmosphérique, la méthode de covariance de turbulences (ou *eddy covariance*) commençait à devenir réalisable. Une première campagne de mesures à long terme de flux par *eddy covariance* sera en effet présentée en 1993 par une équipe de l'université de Harvard²³.

Forts de cette technique, les chercheurs se proposeront de mesurer les flux de CO₂ échangés par les écosystèmes terrestres à une échelle continentale et pluri-annuelle. C'est lors du congrès de La Thuile, en 1994⁵, que sera décidée la mise en place des premiers réseaux de mesure internationaux. Tout d'abord, le réseau européen EUROFLUX²² verra le jour en 1996 suivi, en 1997, du réseau Nord-Américain (AMERIFLUX) et de bien d'autres. Ces réseaux continentaux seront fédérés en un réseau global, FLUXNET^{4,8}, parrainé par la NASA.

Vingt ans plus tard (en janvier 2016), le réseau FLUXNET comporte 517 sites répartis dans le monde entier, couvrant une large variété d'écosystèmes terrestres : forestiers, agricoles, milieux ouverts (tourbières, landes), voire urbains. En Europe, au réseau EUROFLUX succèdera CarboEurope et, enfin, le projet d'infrastructure européen ICOS¹¹, financé en Région Wallonne par le Service Public de Wallonie (DGO6) (encart 2).

C'est dans le cadre du réseau européen EUROFLUX, initié lors du congrès de La Thuile, que l'OTV sera créé en 1996. Installé dans le Grand Bois de Vielsalm sur une parcelle mixte constituée d'un mélange de conifères (douglas, épicéa et sapin) et de hêtres, le dispositif est constitué d'un système d'« *eddy covariance* » et d'une station micro-météorologique, le tout installé au sommet d'une tour permettant de réaliser les mesures au-dessus de la canopée (encart 3). Les mesures démarreront le 21 mai 1996 et, à partir du 4 juillet 1996, le système commencera à fonctionner de manière continue. La tour, initialement à 40 mètres de hauteur sera surélevée à 50 mètres en 2009. Le système fonctionne quasi sans interruption depuis 1996 et est actuellement en cours d'intégration au réseau européen ICOS.

Technique

La technique de mesure par covariance de turbulences a été imaginée en 1951 par SWINBANK²¹. Il a en effet montré que les échanges de gaz trace (dioxyde de carbone et vapeur d'eau notamment) sont contrôlés essentiellement par la turbulence at-

mosphérique : au mouvement moyen horizontal du vent se surimposent des tourbillons ascendants et descendants qui peuvent apporter des gaz trace à la surface ou les emporter à partir de la surface. Il a dès lors démontré qu'une mesure de la covariance de la composante verticale de la vitesse du vent et de la concentration du gaz étudié permettait de quantifier les flux. Toutefois, cette mesure est difficile à mettre en œuvre : elle nécessite notamment une haute fréquence d'acquisition (de l'ordre de la dizaine de hertz), une détection de la composante verticale de la vitesse du vent et le placement des capteurs au-dessus de la canopée ce qui, en forêt, nécessite l'érection d'une tour. De plus, elle requiert aussi une grande capacité de stockage de données, une mesure de flux pendant une demi-heure nécessitant le traitement de près de 200 000 mesures instantanées. Enfin, le traitement de données est complexe et requiert une expertise spécifique. Il faudra attendre le début des années '90 pour qu'apparaissent des dispositifs suffisamment robustes pour réaliser ces mesures *in situ* et pendant une longue durée. Actuellement, une méthodologie de la technique d'*eddy covariance* est proposée¹ qui permet une standardisation de la mesure et de son traitement.

Le grand avantage de la technique est qu'elle permet, à partir d'un point unique de mesure, de quantifier le flux net, intégré sur une surface de l'ordre de 1 hectare. De plus, comme le système fonctionne de manière automatique, il peut capter les flux 24 heures sur 24 pendant toute l'année. Enfin, vu sa grande longévité, cette mesure peut être prolongée de nombreuses années. Toutes ces caractéristiques en font la technique idéale pour quantifier l'absorption ou l'émission de CO₂ à l'échelle d'un écosystème. Elle n'a pas d'équivalent à ce jour.



D'un autre côté, la capacité d'intégration de la technique constitue sa propre limite : en effet, les flux nets captés par le système résultant des effets mêlés des différents processus d'émission et de séquestration par l'écosystème (encart 1), leur analyse est rendue plus complexe et les mécanismes sont difficiles à séparer. Cette situation est encore compliquée dans le cas d'écosystèmes hétérogènes, où les échanges se réalisent avec différentes espèces végétales. Comme dans beaucoup de sites européens, ce problème est rencontré à l'OTV, la station étant couverte d'une forêt mixte comprenant des hêtres et plusieurs espèces de conifères. Toutefois leur répartition autour du point de mesure dessine des secteurs dans lesquels une relative homogénéité est observée (voir la rose des vents dans l'encart 3) : on identifie ainsi un secteur Nord-Est (330-90 °N) qui est dominé par les douglas et un secteur Sud-Ouest (180- 330 °N) constitué

Encart 2. Le réseau ICOS en Belgique


Le réseau **Integrated Carbon Observation System (ICOS)** est une infrastructure de recherche dont l'objectif est de quantifier et de comprendre le bilan des gaz à effet de serre (GES) sur le continent européen, en particulier celui du CO₂.

L'infrastructure ICOS est structurée comme un triple réseau d'observatoires terrestres, atmosphériques et marins mesurant la concentration et les flux de CO₂. Le réseau terrestre est composé de plus de cinquante observatoires terrestres qui mesurent les échanges de GES et d'énergie entre les écosystèmes terrestres et l'atmosphère, ainsi que de nombreuses variables liées à la végétation, à la météorologie et au sol. En Belgique le réseau terrestre intègrera six stations (trois en Flandre et trois en Wallonie).

En Belgique, ICOS est coordonné par deux groupes de recherches :

- Le Centre de Recherche en Écologie des Plantes et de la Végétation, PLECO, Université d'Anvers
 www.uantwerpen.be/pleco
- L'Axe Échanges Écosystèmes-Atmosphère de l'Unité TERRA, Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech
 www.gembloux.ulg.ac.be

Les trois observatoires terrestres ICOS situés en Wallonie (Lonzée, Vielsalm et La Robinette) sont étudiés par l'Université de Liège et l'Université catholique de Louvain. Le CRA-W et l'ISSEP sont également associés au projet, qui est financé par le Service Public de Wallonie.

 www.icos-belgium.be

 www.icos-ri.eu



d'une forêt mixte dominée par les hêtres, accompagnés d'épicéas et de sapins.

Résultats

Mesure des flux de CO₂

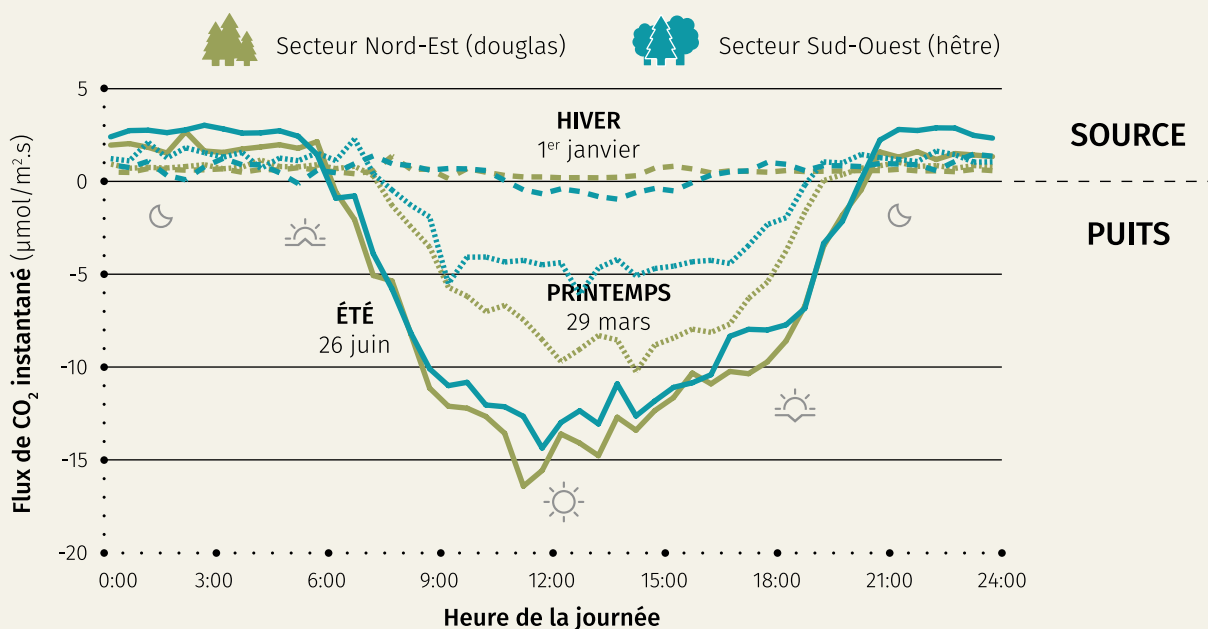
Nous proposons ici une synthèse des vingt années de mesures de flux de CO₂ et de H₂O récoltées à l'OTV. La figure 3 présente l'évolution journalière moyenne des flux de CO₂. Celle-ci est marquée, ce qui se comprend aisément : la photosynthèse nécessitant de la lumière, la séquestration ne peut s'opérer que pendant la journée alors que la respiration et l'émission qui en résulte se réalisent nuit et jour. En conséquence, on observe que, pendant la nuit, l'écosystème se comporte comme une source de CO₂ (flux positif) alors que dès le lever du soleil et jusqu'à son coucher, la photosynthèse l'emporte sur la respiration et la forêt devient un puits de CO₂ (flux négatif). De plus, comme il est lié à l'intensité du rayonnement, le puits s'intensifie pendant la matinée, culmine à midi avant de diminuer l'après-midi. La figure montre aussi que l'importance du puits diurne varie avec la saison : elle est plus élevée en été qu'en hiver, non seulement suite à un rayonnement plus élevé et à une durée du jour plus longue mais aussi, pour les feuillus, en réponse au développement foliaire. Par ailleurs, on constate que la respiration nocturne est aussi plus élevée pendant la nuit en été, essentiellement en réponse à la température.

Les schémas journaliers présentés ici représentent des comportements moyens sur 20 ans mais ceux-ci peuvent bien entendu se modifier d'un jour à l'autre, en fonction des conditions météorologiques, mais aussi du type de végétation et de sa phénologie.

En sommant ces flux sur une journée et en analysant une année complète de mesure, il est possible d'obtenir une image de leur évolution saisonnière. Celle-ci est donnée en figure 4. Ici encore, chaque courbe représente une moyenne sur 20 ans de l'évolution saisonnière des flux journaliers. Chaque courbe correspond à un secteur de vent dominé par une espèce particulière.

En hiver, d'octobre-novembre à février-mars, les flux sont dominés par la respiration et l'écosystème se comporte comme une source. Au début du printemps, les flux s'inversent suite au redémarrage de la photosynthèse et la séquestration culmine vers le mois de juin avant de diminuer progressivement en automne. Il est intéressant de voir que les deux secteurs analysés ne se comportent pas de la même manière : dans le secteur Nord-Est, le démarrage de la photosynthèse est plus précoce et son extinction plus tardive que dans le secteur Sud-Ouest : ce secteur est en effet dominé par les douglas qui, sempervirents, ont la possibilité de photosynthétiser dès que les conditions climatiques (rayonnement, température) le permettent, ce qui se produit de février jusque fin novembre. Par contre, le secteur Sud-Ouest est do-

Figure 3. Évolution journalière moyenne des flux de CO₂ échangés par la forêt de Vielsalm. Chaque courbe correspond à une moyenne sur 20 ans du flux journalier.



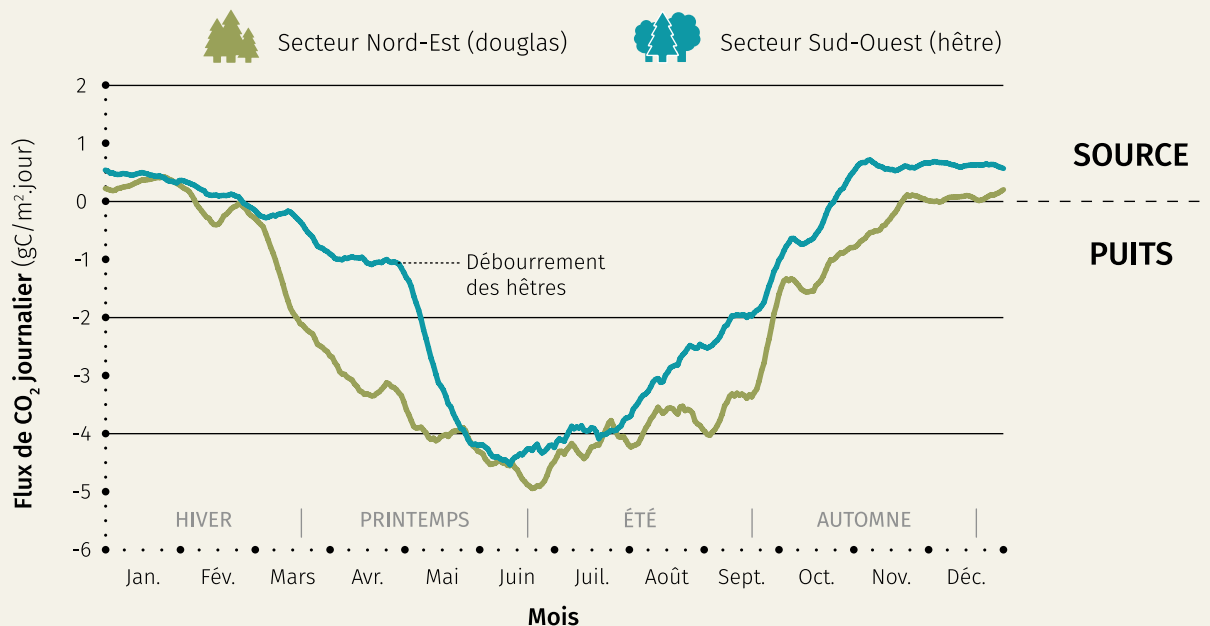


Figure 4. Évolution saisonnière moyenne des flux journaliers de CO₂ échangés par la forêt de Vielsalm.

miné par les hêtres pour lesquels la séquestration est dépendante du développement foliaire. Or, les feuilles ne sont présentes et actives qu'entre mai et octobre.

Remarquons enfin qu'un flux négatif est tout de même observé en mars et avril dans le secteur Sud-Ouest. Celui-ci résulte du fait que le secteur comprend aussi des sapins et des épicéas isolés au milieu des hêtres.

À l'échelle annuelle, ces résultats montrent bien que la forêt se comporte sans conteste comme un puits de carbone, quel que soit le secteur considéré. En moyenne sur 20 ans, le secteur Sud-Ouest (dominé par les hêtres) absorbe 508 gC/m²/an alors que le secteur Nord-Est (dominé par les douglas) en absorbe 813. Ceci montre tout d'abord qu'une forêt, même mature (les hêtres ont été plantés en 1908, les douglas entre 1935 et 1937), se comporte comme un puits de carbone. Ce résultat n'est pas spécifique à l'OTV : des mesures effectuées dans d'autres forêts du monde ont confirmé ce résultat.

Par ailleurs, si pratiquement toutes les forêts étudiées se comportent comme des puits de carbone, il faut remarquer que la séquestration observée à l'OTV est très supérieure à la moyenne européenne qui n'est que de 143 gC/m²/an¹⁹. Cette différence est probablement due au climat, particulièrement propice dans nos régions : en effet, sous nos latitudes, les conditions de croissance sont optimales car elles ne sont

limitées ni par des sécheresses comme en zone méditerranéenne, ni par de longs hivers comme en zone boréale.

Enfin, la différence entre le secteur Nord-Est, dominé par les douglas, et le secteur Sud-Ouest, dominé par les hêtres est remarquable. Elle ne fait que confirmer que le douglas est une espèce à croissance soutenue, qui stocke plus de matière sèche et donc plus de carbone que le hêtre. Sur la période 1996-2009, les accroissements annuels moyens en circonférence ont été de 0,9 cm/an pour les hêtres et de 3,2 cm/an pour les douglas. Sur la même période, les douglas ont gagné 6 mètres de hauteur, alors que les hêtres se sont stabilisés à 29 mètres. La différence de séquestration entre les espèces résulte essentiellement de la durée de la période de végétation, plus courte pour les hêtres que pour les douglas. En effet, en période de plein développement de la végétation (juin-juillet), les séquestrations journalières moyennes des deux secteurs sont proches.

En outre, la séquestration annuelle de carbone présente une variabilité interannuelle importante. Selon les années, elle s'élève à plus ou moins 150 gC/m²/an. Les causes de cette variation sont plus difficiles à établir. Toutefois, nous avons pu mettre certains faits en évidence.

Tout d'abord, aucune tendance à long terme n'a été observée. Cela signifie que, sur la période investiguée,

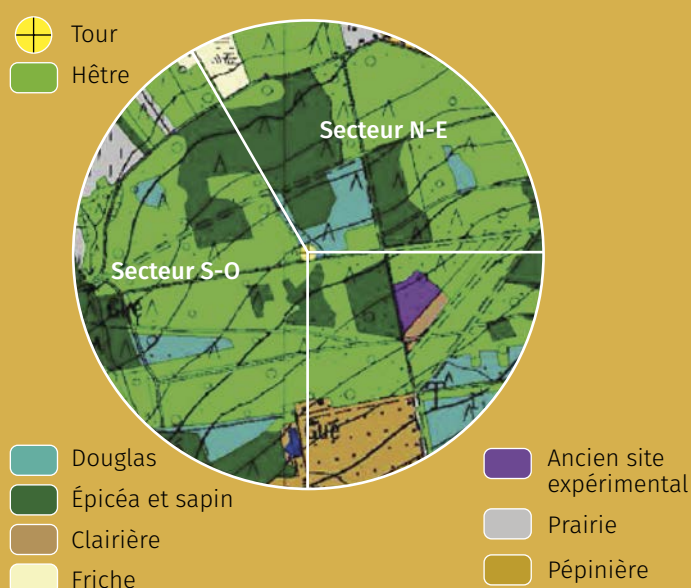
Encart 3. L'observatoire Terrestre de Vielsalm

Mesure à long terme des flux de gaz à effet de serre

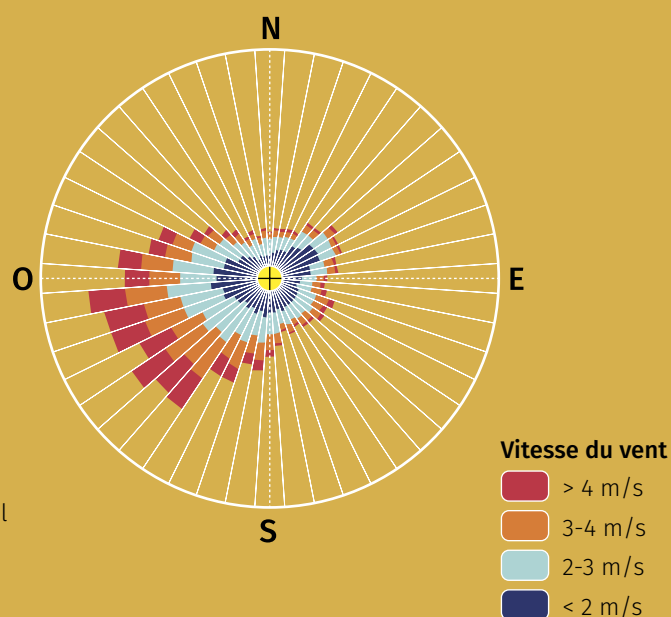
La forêt

Plantation	Hauteur en 2014	Sol	Température annuelle	Précipitations annuelles
Hêtres : 1908	Hêtres : 29 m	Classification FAO : Dystric cambisol	Moyenne : 8 °C	Moyenne : 1040 mm
Douglas : 1935-1950-1960	Douglas : 41 m	Profondeur : > 100cm	Maximale moyenne : 30 °C	
Épicéas et sapins : 1908	Épicéas et sapins : 33 m		Minimale moyenne : -12 °C	

Composition



Rose des vents



Mesures réalisées

En continu

- Flux net de CO₂, productivité primaire brute, respiration totale de l'écosystème
- Évapotranspiration réelle
- Flux de chaleur
- Variables micrométéorologiques (voir figure ci-contre)

Campagnes de mesures

- Campagnes de vérification de la méthodologie
- Respiration du sol
- Transpiration des arbres (flux de sève)
- Émissions d'isoprène, de monoterpènes et de méthanol
- Inventaires de biomasse
- Largeur de cernes
- Déposition d'azote

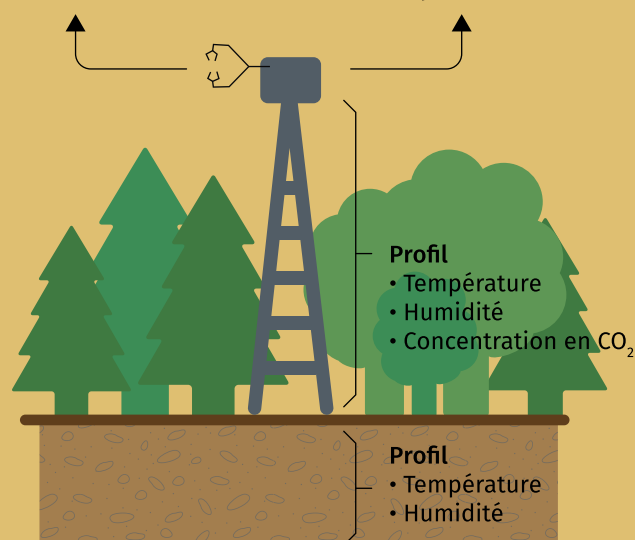
Équipement du site

Système d'eddy covariance

- Vitesse du vent (3 composantes)
- Concentration en CO₂ et H₂O

Variables météorologiques

- Rayonnement, température, précipitations, pression...



nous n'avons pas observé d'effet sur la séquestration de carbone d'un changement climatique ou d'une fertilisation liée à l'augmentation de la teneur en CO_2 de l'atmosphère. La période investiguée reste toutefois trop courte pour conclure définitivement à ce propos.

Par ailleurs, nous n'avons pas identifié de relation générale entre la variabilité interannuelle des flux et une variabilité climatique. Il est à ce propos remarquable que les causes de variation des flux ne sont pas les mêmes à l'échelle interannuelle qu'aux échelles horaire ou journalière. Ceci est parfaitement illustré aux figures 5 où les relations entre flux net de CO_2 et rayonnement sont représentées à ces trois échelles. On constate que si ces relations sont bien marquées aux échelles horaire et saisonnière, reflétant essentiellement les cycles diurne et saisonnier, à l'échelle interannuelle, cette relation disparaît complètement, suggérant qu'à cette échelle de temps la variabilité du flux est plus complexe à expliquer, étant sans doute influencée par d'autres facteurs. Il est probable par exemple que les attaques biotiques (chenilles, scolytes...) ou les arrière-effets de stress biotiques ou abiotiques (canicule, sécheresse printanière ou estivale...) constituent des facteurs déterminants à cette échelle. Une approche visant à analyser ces facteurs est actuellement en cours de développement.

Mesure des flux de vapeur d'eau

Le système d'*eddy covariance* mesure également les flux de vapeur d'eau depuis 1996, correspondants à l'évapotranspiration réelle (ETR, mesurée en millimètre). Pour rappel, l'ETR est la somme de la transpiration, de l'interception des pluies et de l'évapotranspiration du sol et du sous-étage (encart 1). La

figure 6 présente l'évolution saisonnière moyenne sur 20 ans.

Cumulée sur l'année, elle s'élève à 300 et 343 mm/an dans les secteurs Sud-Ouest et Nord-Est, respectivement. La différence entre secteurs apparaît nettement moins marquée (moins de 15 %) que pour les flux de CO_2 . Cette faible différence entre les secteurs (effet espèce) a été observée dans d'autres sites à l'échelle « peuplement »^{2,3}. Elle soutient la théorie de conservation des flux d'évapotranspiration pour des stations similaires, indépendamment de l'espèce, de la hauteur ou de l'âge des peuplements^{13,17}. Par contre, la répartition de chacun des flux de l'ETR est différente entre les secteurs : la transpiration par exemple, mesurée en 2010-2011, représente 86 % de l'ETR des hêtres et 67 % de l'ETR des douglas²⁰. La somme annuelle des précipitations s'élève à 965 mm, suggérant que l'évapotranspiration de la forêt intervient pour pratiquement 30 à 35 % des précipitations.

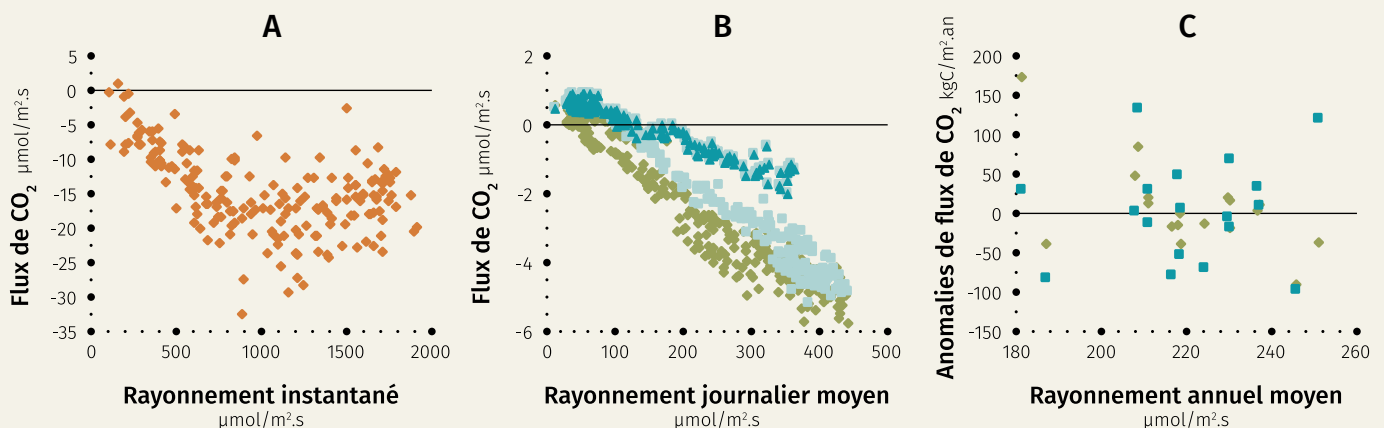
Disposer de mesures d'évapotranspiration et de flux de CO_2 autorise l'évaluation de l'efficacité de l'utilisation de l'eau (*Water Use Efficiency*), qui est un indice de productivité. À l'échelle du peuplement ou de chaque secteur elle peut être calculée comme le rapport entre la PPB et l'ETR¹⁵. À Vielsalm elle est de 6,2 ($\pm 0,6$) $\text{gCO}_2/\text{kg H}_2\text{O}$ de 1998 à 2008.

Conclusions

La technique d'*eddy covariance* permet d'évaluer la séquestration de carbone par les écosystèmes terrestres et les forêts. Elle permet aussi de mettre en

Figures 5. Relation entre flux net de CO_2 et rayonnement à plusieurs échelles temporelles.

- A.** Échelle journalière : chaque point correspond à une mesure instantanée, sans distinction des espèces.
- B.** Échelle saisonnière : chaque point correspond à une journée moyennée sur 20 ans (vert : douglas ; bleu foncé : hêtre au printemps ; bleu clair : hêtre en été).
- C.** Échelle interannuelle : chaque point correspond à une année (vert : douglas ; bleu : hêtre).



Chaque point correspond à l'écart à la moyenne du flux calculé sur une année

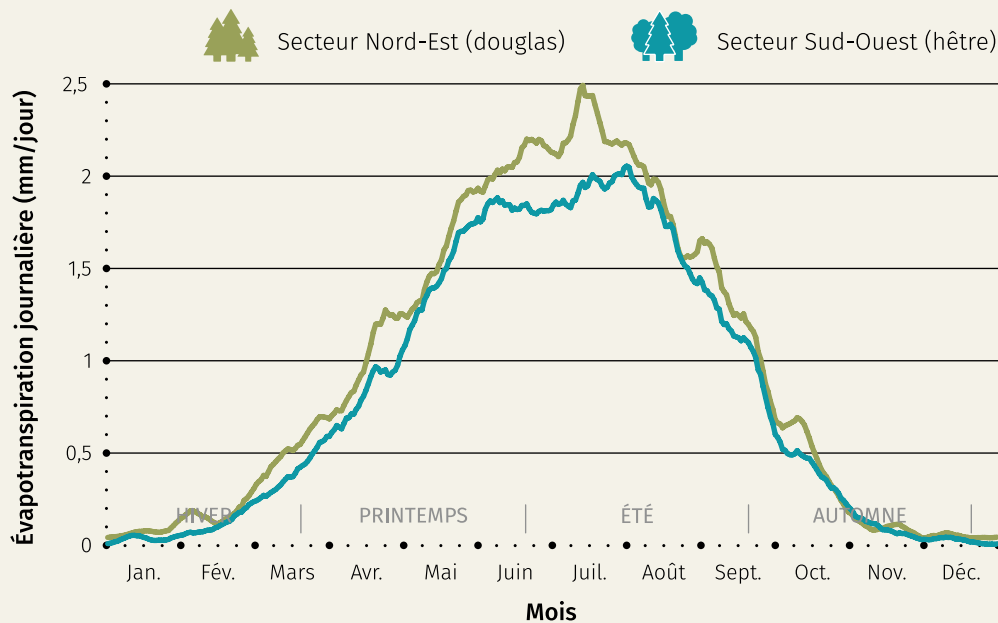


Figure 6. Évolution saisonnière moyenne de l'évapotranspiration à la forêt de Vielsalm.



évidence leur dynamique journalière, saisonnière et interannuelle. En parallèle, la mesure de l'évapotranspiration réelle permet d'évaluer la consommation en eau des espèces présentes.

Les mesures effectuées à l'OTV pendant près de vingt années montrent que la forêt se comporte chaque année comme un puits de carbone. L'importance de ce puits est une des plus grandes observées sur des écosystèmes terrestres, ce qui résulte de conditions climatiques optimales.

Toutefois, la séquestration est soumise à une variabilité interannuelle dont les causes restent à déterminer mais dont on peut affirmer que, sur la période investiguée, elle ne suit pas d'évolution à long terme et n'est pas liée aux variations de rayonnement.


Un suivi continu de ces flux permet de mieux comprendre les mécanismes contrôlant la séquestration de carbone mais aussi d'effectuer un diagnostic pour suivre l'état de développement de la forêt. ■




Bibliographie



- ¹ Aubinet M., Vesala T., Papale D. (2012). *Eddy covariance, A practical guide to measurements and data analysis*. Ed. Springer, 424 p.
- ² Aussenac G. (1972). Étude de l'évapotranspiration réelle de quatre peuplements forestiers dans l'Est de la France. *Annales des Sciences forestières* 29(3) : 369-389.
- ³ Aussenac G., Boulangeat C. (1980). Interception des précipitations et évapotranspiration réelle dans des peuplements de feuillus (*Fagus sylvatica* L.) et de résineux (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco). *Annales des Sciences forestières* 37(2) : 91-107.
- ⁴ Baldocchi D., Falge E., Gu L., Olson R., Hollinger D., Running S. et al. (2001). FLUXNET : a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society* 82(11) : 2415-2434.
- ⁵ Baldocchi D., Valentini R., Running S., Oechel W., Dahlen R. (1996). Strategies for measuring and modelling carbon dioxide and water vapour fluxes over terrestrial ecosystems. *Global Change Biology* 2(3) : 159-168.
- ⁶ Chapin III F.S., Matson P.A., Mooney H.A. (2002). *Principles of terrestrial ecosystem ecology*. Ed. Springer-Verlag NY, 447 p.
- ⁷ Ciais P., Sabine C., Bala G., Bopp L., Brovkin V., Canadell J., Chhabra A., DeFries R., Galloway J., Heimann M., Jones C., Le Quéré C., Myneni R.B., Piao S., Thornton P. (2013). Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In : Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. (eds.). *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 
- ⁸ FLUXNET : fluxnet.ornl.gov 
- ⁹ GIEC (2007). *Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième*

POINTS-CLEFS

- ▶ L'Observatoire Terrestre de Vielsalm mesure (1) les échanges nets de CO₂ entre la forêt et l'atmosphère et (2) l'évapotranspiration de la végétation.
- ▶ Les mesures sur 20 ans montrent des différences dans la dynamique de séquestration du carbone entre peuplements (résineux ou mixtes), aux échelles journalières et saisonnières, qui peuvent être expliquées par la phénologie des essences.
- ▶ Les différences interannuelles ne peuvent pas être expliquées par la variabilité climatique. Aucune évolution à long terme des flux n'a été détectée sur la période de mesure.
- ▶ La forêt de Vielsalm se comporte comme un puits de carbone important, comparé aux autres forêts européennes, grâce aux conditions climatiques optimales dont elle bénéficie.

Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Équipe de rédaction principale, **Pachauri R.K.** et **Reisinger, A.** (direction). GIEC, Genève, Suisse, 103 p. 

- ¹⁰ **GIEC** (2013). *Résumé à l'intention des décideurs, Changements climatiques 2013 : Les éléments scientifiques*. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Sous la direction de **Stocker T.F.**, **Qin D.**, **Plattner G.-K.**, **Tignor M.**, **Allen S. K.**, **Boschung J.**, **Nauels A.**, **Xia Y.**, **Bex V.**, **Midgley P.M.**. Cambridge University Press. 
- ¹¹ **ICOS** : www.icos-ri.eu 
- ¹² **IPCC** (2001). *Climate Change 2001 : The Scientific Basis*. In : **Houghton J.T.**, **Ding Y.**, **Griggs D.J.**, **Noguer M.**, **van der Linden P.J.**, **Dai X.**, **Maskell K.**, **Johnson C.A.** (eds.). Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 881 p. 
- ¹³ **Jarvis P.G.**, **McNaughton K.G.** (1986). Stomatal Control of Transpiration: Scaling Up from Leaf to Region. *Advances in Ecological Research* 15 : 1-49.
- ¹⁴ **Keeling C.D.**, **Chin J.F.S.**, **Whorf T.P.** (1996). Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO₂ measurements. *Nature* 382(6587) : 146-149.
- ¹⁵ **Kuglitsch F.G.** et al. (2008). Characterisation of ecosystem water-use efficiency of european forests from eddy covariance measurements. *Biogeosciences* 5 : 4481-4519.
- ¹⁶ **Le Quéré C.**, **Moriarty R.**, **Andrew R.M.**, **Canadell J.G.**, **Sitch S.**, **Korsbakken J.I.**, **Friedlingstein P.**, **Peters G.P.** et al. (2015). Global Carbon Budget 2015. *Earth System Science Data* 7(2) : 349-396 (www.globalcarbonproject.org).

- ¹⁷ **Roberts J.** (1983). Forest transpiration : a conservative hydrological process ? *Journal of Hydrology* 66(1-4) : 133-141.
- ¹⁸ **Schimel D.**, **Enting I.**, **Heimann M.**, **Wigley T.M.L.**, **Raynaud D.**, **Alves D.**, **Siegenthaler U.** (1995). CO₂ and the carbon cycle. In : **Houghton J.T.**, **Meira Filho L.G.**, **Bruce J.**, **Hoesung Lee**, **Callander B.A.**, **Haites E.**, **Harris N.**, **Maskell K.** (eds.). *Climate Change 1994 : radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios*. Cambridge University Press, 339 p. 
- ¹⁹ **Schulze E.D.**, **Luyssaert S.**, **Ciais P.**, **Freibauer A.**, **Janssens I.A.** et al. (2009). Importance of methane and nitrous oxide for Europe's terrestrial greenhouse-gas balance. *Nature Geoscience* 2 : 842-850.
- ²⁰ **Soubie R.** (2014). *Évaluation de l'évapotranspiration réelle, de ses composantes et de sa régulation dans un peuplement composé de hêtre et de douglas : analyse comparative de l'effet espèce et des méthodes d'évaluation*. Thèse, Louvain-la-Neuve, Université catholique de Louvain, 353 p. 
- ²¹ **Swinbank W.C.** (1951). The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere. *Journal of Meteorology* 8 : 135-145.
- ²² **Valentini R.**, **Matteucci G.**, **Dolman A.J.**, **Schulze E.D.**, **Rebmann C.**, **Moors E.J.**, **Granier A.**, **Gross P.**, **Jensen N.O.**, **Pilegaard K.**, **Lindroth A.**, **Grelle A.**, **Bernhofer C.**, **Grünwald T.**, **Aubinet M.**, **Ceulemans R.**, **Kowalski A.S.**, **Vesala T.**, **Rannik U.**, **Berbigier P.**, **Loustau D.**, **Gudmundsson J.**, **Thorgeirsson H.**, **Ibrom A.**, **Morgenstern K.**, **Clement R.**, **Moncrieff L.**, **Montagnani L.**, **Minerbi S.**, **Jarvis P.G.** (2000). Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature* 404 : 861-865.
- ²³ **Wofsy S.C.**, **Goulden M.L.**, **Munger J.W.**, **Fan S.M.**, **Bawkwin P.S.**, **Daube B.C.**, **Bassow S.L.**, **Bazzaz F.A.** (1993). Net Exchange of CO₂ in a Mid-Latitude Forest. *Science* 260 : 1314-1317.

Crédits photos. A. Debacq (p. 17).

Marc Aubinet¹
Caroline Vincke²
Bernard Heinesch¹
Quentin Hurdebise¹
Tanguy Manise³
marc.aubinet@ulg.ac.be

- ¹ Échanges Écosystèmes-Atmosphère (ULg, GxABT)
 Passage des Déportés 2 | B-5030 Gembloux
- ² Earth & Life Institute, Environmental Sciences (UCL, ELI)
 Croix du Sud 2 bte L7.05.09 | B-1348 Louvain-la-Neuve
- ³ Phytotechnie des régions tempérées (ULg, GxABT)
 Passage des Déportés 2 | B-5030 Gembloux