

IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LE COMPORTEMENT DE LA VÉGÉTATION DANS LE FOSSÉ RHÉNAV

L. JAEGER¹, A. GESSLER⁶, P. KASTENDEUCH³, N. KODAMA⁴,
I. LEHNER², G. NAJJAR³, E. PARLOW², P. PAUL³,
H. RENNENBERG⁴, J. ROST¹, D. VIVILLE⁵, R. VOGT²
et M. ZYGMUNTOWSKI³

¹ Institut de Météorologie, Université de Fribourg, Werderring 10, D-79098 Freiburg
lutz.jaeger@meteo.uni-freiburg.de

² Institut de Météorologie, Climatologie et Télédétection, Université de Bâle, Suisse

³ Faculté de Géographie, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France

⁴ Institut de Botanique Forestière et de Physiologie des Arbres, Université de Fribourg

⁵ Centre de Géochimie de la Surface, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France

⁶ Institut National de Recherche Agonomique (INRA) Champenoux/Nancy, France

Résumé

D'après des résultats de modèles, le changement climatique régional se manifestera par des étés plus chauds et plus secs dans la région du Rhin supérieur en Europe centrale. Comme cette région est déjà la plus chaude et la plus sèche d'Allemagne, le Fossé rhénav apparaît bien adapté à de telles recherches interdisciplinaires. Il conviendrait de savoir quelles modifications dans la disponibilité en eau conduiront à des changements dans les récoltes et dans le stockage du carbone dans l'esprit du protocole de Kyoto. Le groupe de travail international, coordonné par l'Institut de Météorologie à Fribourg en Allemagne, s'est fixé pour objectif de répondre à ces questions. Les plantes-test sélectionnées sont le blé (France), le pin (Allemagne) et le maïs (Suisse). En raison de leur rendement, ces espèces végétales ont des demandes en eau différentes (plantes C3 et C4). Avec des méthodes d'investigations novatrices, il est possible d'expliquer la production de biomasse en fonction de la dynamique complexe de l'offre de carbone atmosphérique et de l'alimentation en eau. Le projet nécessite des mesures simultanées sur les trois sites, associées à des analyses en laboratoire et à un traitement des données. Un des résultats de ce projet sera la présentation de bilans régionaux du carbone. Des méthodes de micrométéorologie et de physiologie végétale sont utilisées conjointement. Une détermination micrométéorologique des flux de CO₂ avec la méthode des fluctuations sera confrontée à une évaluation physiologique de la transpiration à l'aide des traceurs ¹³C et ¹⁸O et de mesures porométriques. Un bilan est nécessaire pour estimer la capacité de stockage du carbone de l'écosystème. Ceci permettra aux pays participant au projet de disposer de bases plus précises pour équilibrer les capacités de stockage de carbone par la végétation et les émissions polluantes.

Mots-clés : Changement du climat, Impact, Plantes-C3 et -C4, Stockage de carbone, Déficit en eau, Programme INTERREG III A, Protocole de Kyoto, Fossé rhénan.

Abstract

Impacts of climate change on the behaviour of vegetation in the Rhine valley

Following results of regional climatic models, the regional impact of climate change in the southern Rhine valley in Central Europe will result in hotter and dryer summer seasons. Because this region is already the warmest and driest area in Germany, it seems to be favourite to perform interdisciplinary research on climate change impacts. Which modifications in plant water supply will result in which yield changes and in which carbon stock changes in relation to the sense of the protocol of Kyoto? The international working group defined these questions to be a research task in finding answers. Test plants are wheat (France), pine (Germany) and corn (Switzerland). We have different water use efficiencies (C3- and C4-plants). With new research methods, jointly applying the individual specific contributions of the four partners it will be possible to explain the relations between the atmospheric carbon supply and the biomass production and its variations in time and related to the weather. The project consists in simultaneous measurements at the three sites combined with isotopic analyses in the laboratory and joint data analyses. Micrometeorological flux and storage term estimates of CO₂ are completed with physiological transpiration measurements by means of ¹³C and ¹⁸O tracers and porometric measurements. Then budget calculations are required to estimate the storage capacity of the ecosystems under investigation. This will enable the three states involved in the project to present more precise capacity calculations in carbon stock of the vegetation and carbon exchange with the atmosphere.

Keywords: Climate change, Impact, C3- and C4-plantes, Carbon sequestration, Water use efficiency, INTERREG III A program, Kyoto protocol, Upper Rhine valley.

Zusammenfassung

Ergebnisse regional angewandter Simulationsmodelle sagen für das Oberrheingebiet in Zukunft wärmere und trockenere Sommer voraus. Da diese Region bereits jetzt zu den trockensten und wärmsten Gebieten Deutschlands zählt, kommt dem Untersuchungsgebiet Modellcharakter zu. Welche Veränderungen in der Wasserverfügbarkeit führen zu Änderungen in den Ernteerträgen, und welches Speicherpotential für Kohlenstoff im Sinne des Kyoto-Protokolls stellen die untersuchten Oberflächen bereit? Eine internationale Arbeitsgruppe hat sich als Aufgabe gestellt, auf diese Fragen zu antworten. Die gewählten Testpflanzen dazu sind Weizen in Frankreich (C3), Kiefern in Deutschland (C3) und Mais für die Schweiz (C4). C3- und C4-Pflanzen haben unterschiedlichen Wasserverbrauch bezogen auf den damit verbundenen Einbau von Kohlenstoffatomen in ihre Biomasse. Mit innovativer Untersuchungsmethodik, zu denen jeder der vier Antragspartner Teilbereiche beisteuern kann, ist es möglich, interdisziplinär das komplexe Wechselspiel von atmosphärischem Kohlenstoffangebot und Wasserversorgung im Hinblick auf eine witterungsgesteuerte Biomassenproduktion zu erklären. Hierfür ist der gleichzeitige Betrieb von drei Dauermessstellen sowie damit verbundene Laboruntersuchungen und Datenauswertung erforderlich. Die im Projekt erarbeiteten Kohlenstoffbilanzen werden dazu beitragen, dass die beteiligten Länder Deutschland, Frankreich und die Schweiz über präzisere Grundlagen verfügen werden, ihre pflanzlichen Speicherkapazitäten in Äckern und

Wäldern mit ihrem jeweiligen atmosphärischen Schadstoffaustausch verrechnen zu können.

Schlüsselwörter : Klimawandel, Klimawirkung, C3-, C4-Pflanzen, Kohlenstoffspeicherung, Water use efficiency, INTERREG III A-Programm, Kyoto-Protokoll, Oberrheintal

Introduction

Les modèles climatiques globaux et régionaux prévoient pour l'Europe centrale, c'est-à-dire pour le Fossé rhénan, une recrudescence dans le futur d'étés chauds et secs (Parry, 2000). Cette nouvelle situation devrait créer, d'une part, une demande accrue de l'atmosphère, et d'autre part un manque d'eau au niveau de la surface. Or l'alimentation en eau du sol et la disponibilité d'azote sont des facteurs qui limitent la croissance et déterminent la concurrence dans tous les écosystèmes terrestres. Des modifications dans la disponibilité en eau peuvent avoir des conséquences sur la croissance et la vitalité des écosystèmes (Adams & Grierson, 2001). En ce qui concerne les forêts, un déficit hydrique pourrait engendrer des modifications dans le rajeunissement naturel de la végétation (Fotelli et al., 2001) et donc influencer considérablement le bilan des substances nutritives et l'accroissement des arbres adultes (Geßler et al., 2001). Il est communément admis que les plantes C4 comme le maïs ont une meilleure résistance à la sécheresse et une plus grande capacité d'adaptation de la production de biomasse que les plantes C3 (par exemple les arbres), ce qui se traduit par une meilleure assimilation du carbone et un meilleur rendement dans l'utilisation de l'eau disponible (water use efficiency).

Afin de quantifier les conséquences du changement climatique sur l'agriculture, la sylviculture et l'hydrologie en vue de caractériser le cadre climatique de croissance et de vitalité de l'écosystème, il est nécessaire de mener des études interdisciplinaires sur la consommation d'eau et de CO₂ par des plantes C3 et C4 dans différentes conditions climatiques et notamment en conditions de sécheresse. L'importance des différents changements climatiques varie avec l'altitude, l'orographie et l'occupation du sol. Elle est visible dans les différentes phases phénologiques (Chmielewski et Rötzer, 2001; Kirchgäßner, 2001).

Les changements des composantes climatiques sont essentiellement provoqués par des modifications du bilan d'énergie et du bilan d'eau, liés par le flux de chaleur latente, c'est-à-dire l'évapotranspiration, dont les causes pourraient être naturelles ou/et anthropiques. Le projet proposé a pour objectif d'étudier les différentes relations entre ces bilans et les conditions atmosphériques et d'occupation du sol. Il est basé sur une approche combinant les mesures et la modélisation dans le continuum sol-plante-atmosphère (Schmugge et André, 1991). Ce type de démarche nécessite une approche

interdisciplinaire alliant des mesures atmosphériques, physiologiques et dans le sol.

1. Sites de mesures

Trois sites ont été choisis dans le Fossé rhénan de manière à représenter les différents types de cultures C3 et C4.

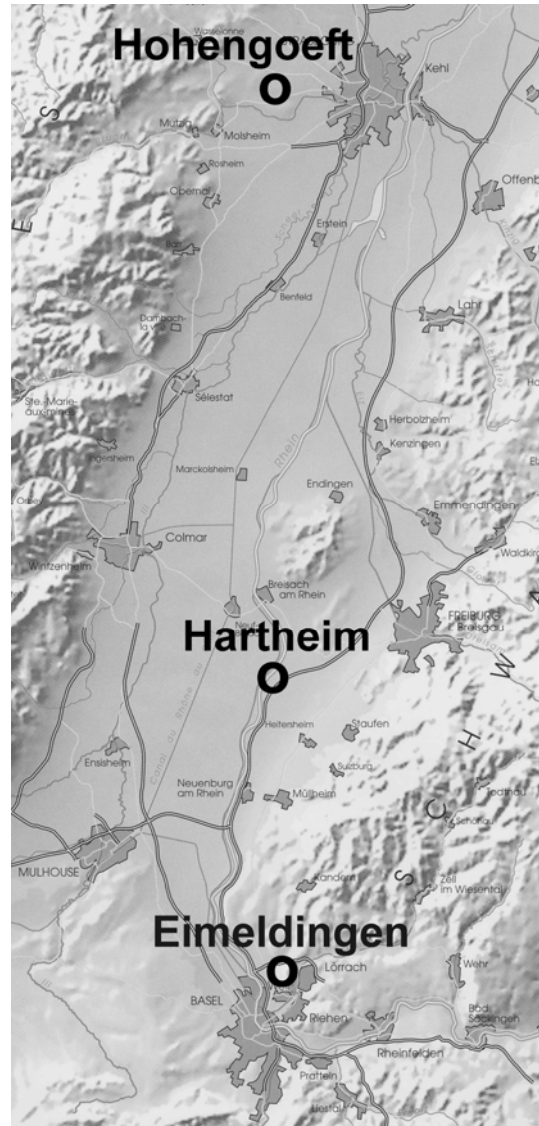


Figure 1: Localisation des sites de mesure dans le fossé rhénan (Fiedler, 1995).
Location of the experimental sites in the rift valley of the river Rhine (Fiedler, 1995)

- Pinède (plante C3)

La station de mesures de Hartheim/Rhin de l'Institut de Météorologie de l'Université de Freiburg a été choisie pour étudier le stockage de carbone dans un peuplement forestier (Fig. 1). Ses coordonnées géographiques sont : 47° 56' N, 7° 37' E ; l'altitude est de 201 m (Garthe et al. 1986; Jaeger et Kessler, 1996). Elle est située à quelques centaines de mètres du Rhin.

- Blé (plante C3)

Du côté français, un champ de blé a été choisi près du village de Hohengoelt à environ 20 km l'ouest de Strasbourg (48° 40' N, 7° 29' E, altitude : 220 m). La station est gérée par la Faculté de Géographie de l'Université Louis Pasteur à Strasbourg.

- Maïs (Plante C4)

L'Institut de Météorologie, Climatologie et Télédétection de l'Université de Bâle en Suisse a installé et gère une station dans un champ de maïs près du village de Eimeldingen au nord de Bâle (47° 37' N, 7° 35' E, altitude: 267 m).

2. Méthodes de mesure

Pour déterminer les différentes composantes des bilans d'énergie et d'eau, les méthodes utilisées sont adaptées à chacun des compartiments du système (Humbert et Najjar, 1992). Pour les mesures atmosphériques, trois méthodes sont utilisées: la méthode du rapport Bowen (méthode Sverdrup), la méthode aérodynamique et la méthode des fluctuations (eddy-covariance method, Foken, 2003 ; Haberer, 2002).

Les mesures écophysiologicals et isotopiques permettent de caractériser les bilans d'eau de la couverture végétale (Granier et al., 1996). En combinant les flux de sève (méthode écophysiological), les flux d'eau et de carbone déterminés par des méthodes micrométéorologiques et les signatures isotopiques dans le phloème, il est possible de quantifier la relation entre la disponibilité actuelle en eau et la croissance des plantes. De plus, les analyses isotopiques doivent permettre de différencier les flux de CO₂ dus à la photosynthèse ou à la respiration. La connaissance précise de ces deux flux permet de détecter les impacts du changement du climat (par exemple, la sécheresse estivale) sur la capacité de stockage du carbone dans la végétation. Ces informations sont d'une grande utilité dans l'élaboration d'une gestion forestière et agricole répondant aux impératifs du protocole de Kyoto concernant les gaz à effet de serre (IPCC, 2001).

3. Systèmes de mesure

Les trois sites ont été équipés d'une manière identique, ce qui permet d'utiliser les mêmes méthodes et ainsi de comparer les résultats. Le tableau 1 présente la liste des appareils installés sur chaque site.

Paramètre	Capteur	Fabricant	Position
Rayonnement global	CM 21	Kipp & Zonen	au-dessus de la canopée
Rayonnement réfléchi	CM 21	Kipp & Zonen	au-dessus de la canopée
Rayonnement infrarouge incident	CG4	Kipp & Zonen	au-dessus de la canopée
Rayonnement infrarouge en haut	CG4	Kipp & Zonen	au-dessus de la canopée
PAR	Li-190S2	LiCor	au-dessus de la canopée
PAR	Li-190S2	LiCor	dans le peuplement
Précipitations	Pluvio	Ott	au-dessus la canopée
Flux de chaleur dans le sol	HFP02SC	Hukseflux	dans le sol
Humidité du sol	CS616	Campbell	dans le sol
Température du sol	Pt100	Heraeus	dans le sol
Température de l'air	Psychromètre	Inst. Mét.Fribourg	au-dessus de la canopée et au-dessous de la canopée
Humidité de l'air	Psychromètre	Inst. Mét. Fribourg	dans le peuplement
CO ₂	Li7500	LiCor	au-dessus de la canopée
Vapeur d'eau	Li7500	LiCor	au-dessus de la canopée
Fluctuations du vent	CSAT3	Campbell	au-dessus de la canopée

Tableau 1: Capteurs installés sur les sites de mesure. *Measuring devices used at the three sites*

Avec la méthode des fluctuations, les mesures des flux de CO₂ et de vapeur d'eau au-dessus de la couverture végétale des trois sites sont effectuées à une fréquence de 20 Hz. L'ensemble des données est acquise par une centrale de mesures CR5000 Campbell Scientific. Deux types de calculs sont réalisés en ligne et sur les données brutes au laboratoire.

4. Calcul des flux

À partir des valeurs brutes, on peut calculer des flux au pas de temps de 30 minutes en effectuant une rotation des données dans le sens des vents dominants (Wilczak et al., 2001). Les données de déficit spectral sont corrigées en utilisant la procédure de Moore (1986), celles de température sonique virtuelle le sont avec la méthode de Schotanus et al. (1983) et celles de fluctuations de la densité de l'air sont complétées par la méthode de Webb et al. (1980). Les lacunes dans les données dues aux précipitations (liquides ou solides, givre, rosée) ont été comblées en utilisant les mêmes relations mathématiques que pour les sites FLUXNET (Falge et al., 2001; Rost et Jaeger, 2005).

Le stockage dans le peuplement et les échanges de carbone avec le sol sont obtenus à l'aide d'un modèle, par ex. RothC-26.3 (Coleman et al., 1997).

5. Physiologie des plantes

A l'échelle des écosystèmes, on détermine les flux de CO₂-net entre l'atmosphère et la végétation avec des méthodes micro-météorologiques. Il n'est qu'indirectement possible de distinguer le flux de CO₂ provenant de la respiration de celui de la photosynthèse (Goulden et al., 1996). En déterminant conjointement le flux de CO₂ à l'aide de la méthode d'eddy covariance et la signature isotopique de $\Delta^{13}\text{C}$ du flux de CO₂, il est possible de différencier la part provenant de la respiration de celle provenant de la photosynthèse. Cette possibilité de distinction est d'une grande importance, car une variation de l'importance du puits net de CO₂, peut conduire à une fixation réduite du CO₂, et à une respiration modifiée (augmentée ou réduite). En ce qui concerne les systèmes agricoles, en changeant les pratiques agricoles (travaux du sol), on peut modifier la respiration du sol et donc l'importance des puits de CO₂ des surfaces agricoles.

6. Résultats préliminaires

On peut considérer l'année 2004 comme une phase d'initialisation. Les anémomètres sonic des trois sites ont d'abord été étalonnés dans la soufflerie de l'École Polytechnique à Zürich en Suisse. Puis, les systèmes de mesure ont été mis en place à Eimeldingen, à Hartheim et à Hohengoef à la fin de l'année 2004. A Hartheim, des campagnes de mesures intensives réalisées précédemment (Vogt et al., 1996) dans le cadre de REKLIP (Fiedler, 1995) ont fourni de nombreuses informations complémentaires ainsi que sur le climat local des trois sites étudiés. Par exemple, la figure 2, provenant de la campagne de mesures HartX, montre des concentrations de CO₂ au-dessus de la couronne de la pinède (Kessler et Jaeger, 1994).

Le même expérimentateur présente des flux de CO₂ négatifs par niveau, ce qui donne aussi des indications sur l'origine (air, stomates, cuticules, branches, sous-étage et sol). La figure 3 représente la situation du 18 mai 1992 (Joss, 1996).

L'évolution moyenne journalière de juin 2005 des composantes du bilan radiatif et du flux turbulent de CO₂ sont présentés sur la figure 4 pour la pinède et le maïs. Sur le maïs, en raison de la réflexion importante, le bilan net de rayonnement est inférieur de 30 % à celui de la pinède; les flux de chaleur dans le sol étant identiques dans les deux sites, les flux de chaleur sensible et latente sont donc réduits sous le maïs. Les rapports de Bowen (latente/sensible) sont de 1.2 pour la pinède et de 0.6 pour le maïs. L'évolution journalière des flux de CO₂ est identique dans les deux sites. On constate que durant la nuit (jusque vers 5 h du matin), le bilan radiatif étant négatif, le flux de CO₂ est positif car

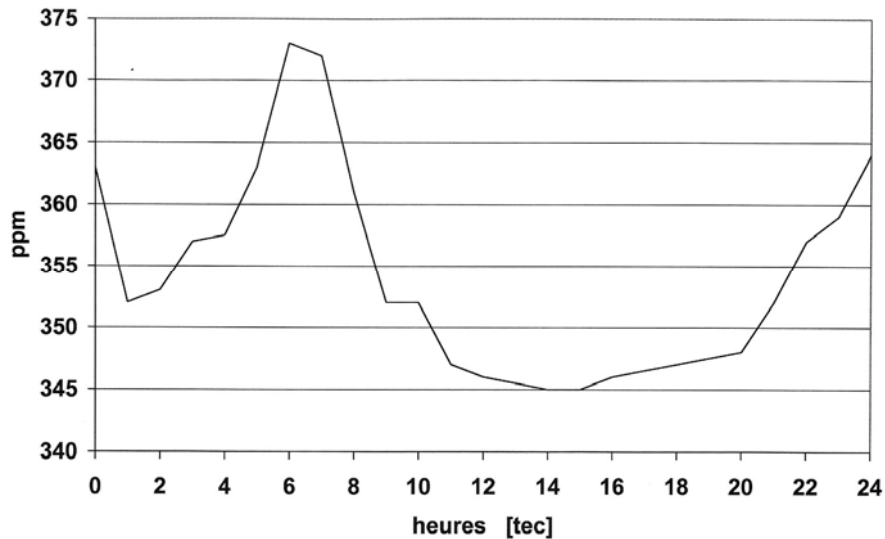


Figure 2 : Evolution journalière des flux de CO₂ [mol/m²s] d'une pinède à Hartheim le 18 mai 1992 à trois niveaux différents. *Daily pattern of the CO₂ flux [mol/m²s] at Hartheim pine forest at three different levels on May, 18, 1992.*

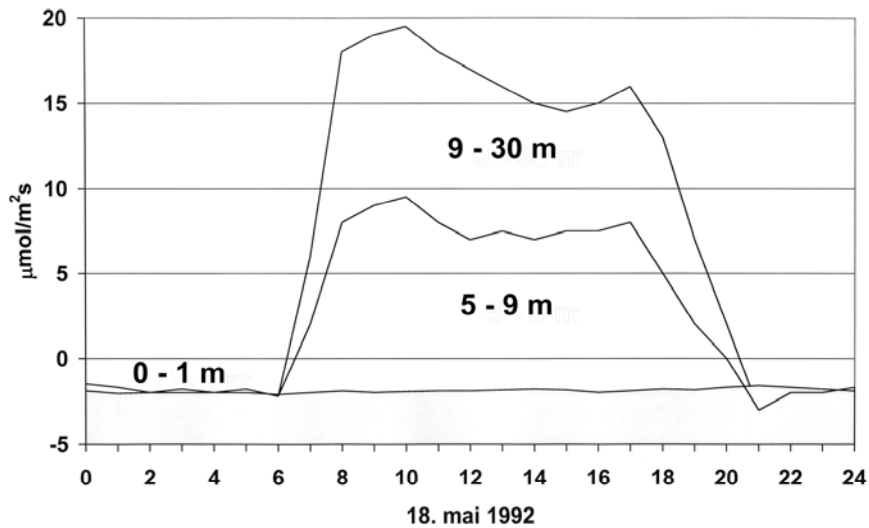


Figure 3 : Evolution journalière de la concentration de CO₂ [ppm] à 15 et 3 m au dessus de la canopée de la pinède à Hartheim. Moyenne de trois journées consécutives, mai 1992. *Daily pattern of the CO₂ concentration [ppm] at 15 m height, 3 m above the canopy at Hartheim pine forest. Mean values of three following days of radiation, May 1992.*

les plantes rejettent du CO₂ ; lorsque le bilan radiatif devient positif, le flux turbulent de CO₂ devient négatif en raison de la consommation de CO₂ par les plantes. Le maximum de consommation est atteint entre 10 et 11 h, peu avant le maximum du bilan radiatif. Lorsque le bilan radiatif redevient négatif le soir, le flux de CO₂ redevient positif en raison de l'arrêt de la photosynthèse. Le flux maximal de CO₂ observé sur la pinède est le double de celui observé sur le maïs.

Les moyennes journalières du flux de CO₂ mesuré, les valeurs corrigées (van't Hoff) et le rayonnement global sont présentés sur la figure 5. On constate qu'il existe une relation étroite entre le bilan net de CO₂ et les conditions climatiques ; en effet, lorsque le rayonnement est élevé, la consommation de CO₂ par les plantes est importante : c'est le cas durant la première partie du mois de juin. Par contre, durant la deuxième partie du mois, malgré un rayonnement global élevé, la consommation de CO₂ par les plantes est faible en raison d'une humidité du sol réduite en raison de la sécheresse, ce qui conduit à une fermeture des stomates et à la diminution de l'activité photosynthétique.

Un exemple de profil de teneur en eau du sol mesuré, d'une part par TDR (CS616) et, d'autre part, obtenu par prélèvement d'échantillons, est présenté sur la figure 6 pour la journée du 23 juin 2005. Dans ce sol limoneux, les teneurs en eau du sol diminuent fortement de la surface vers la profondeur. Durant les trois semaines précédant les mesures, il n'y a pas eu de précipitation ; on assiste donc à un dessèchement à partir de la surface dû à l'évaporation via la végétation. La différence observée entre les deux méthodes est à mettre sur le compte de la méthode de calcul de la teneur en eau par TDR qui utilise un algorithme qui reste à améliorer.

Conclusion

Le projet INTERREG IIIa 3c.10 nécessite des mesures rapides des fluctuations de la vitesse du vent et des concentrations de gaz associés (CO₂ et H₂O) pour calculer les flux de CO₂ et de vapeur d'eau dans les trois sites. Des mesures porométriques et des analyses isotopiques de ¹²C et ¹³C complètent l'approche. Cela permet de déterminer l'efficacité de la consommation en eau (water use efficiency), qui est différente pour des plantes C3 ou C4. Le stockage et la respiration sont ensuite calculés. De plus, il est également nécessaire de corriger les flux et de compléter les données manquantes. Des mesures complémentaires permettent de déterminer le niveau de la respiration pendant la nuit et des analyses de «footprint» sont effectuées. Toute cette information permettra d'extraire des paramètres météorologiques afin d'établir une relation avec le changement climatique, et également en utilisant les résultats d'autres groupes de travail (figure 7, exemple d' ESCOMPTE, Fotiadi, 2003).

La méthode d'investigation, décrite ici, est novatrice dans le domaine de la climatologie géographique française. Le projet est ambitieux, et nécessite une

intense coopération interdisciplinaire et transfrontalière, ce qui fait également le charme de cette recherche.

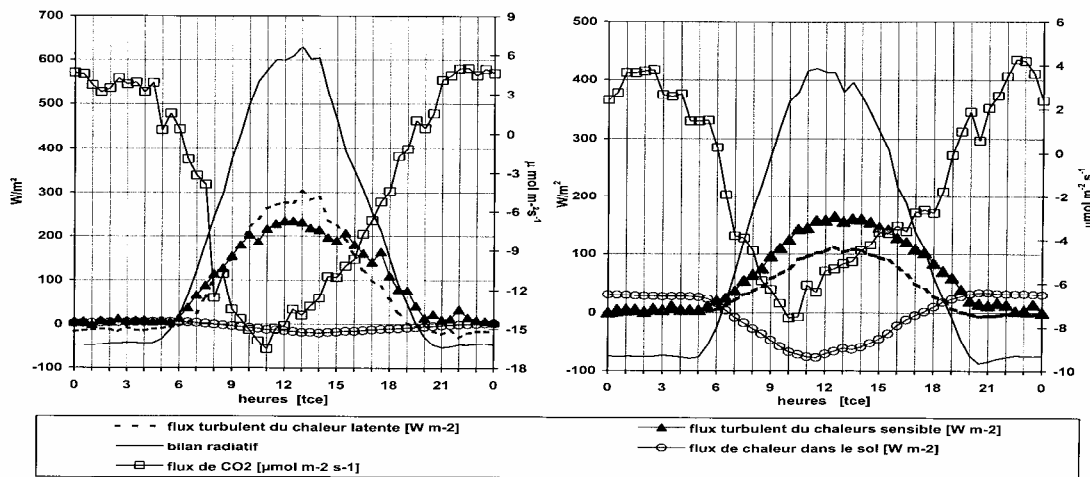


Figure 4: Evolution journalière moyenne des flux turbulents d'une pinède (à gauche) et de maïs (à droite) au cours du mois de juin 2005. *Mean daily turbulent fluxes at Hartheim site (pine trees) (left) and at Eimeldingen (maize) (right) in June 2005.*

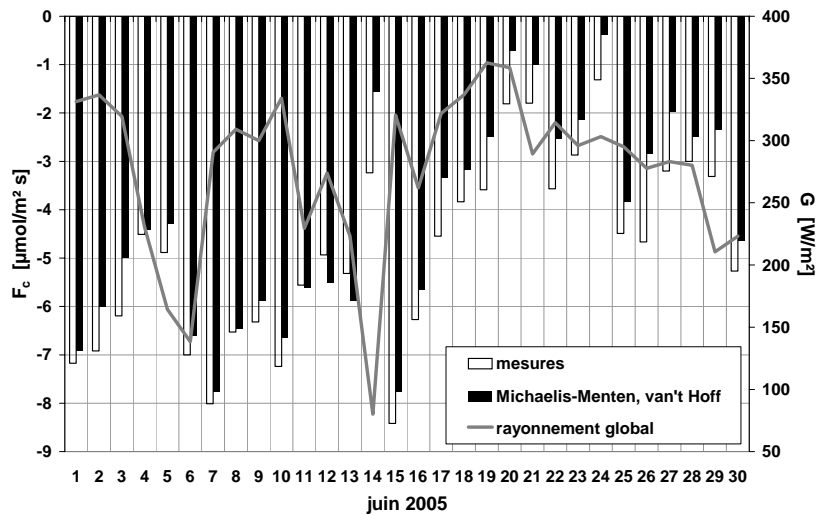


Figure 5 : Mesures journalières brutes et corrigées (Michaelis-Menten et van't Hof) des flux de carbone et de rayonnement global de la pinède au cours du mois de juin 2005. *Measured and gap filled daily values of carbon flux (left hand y-axis) and global radiation (right hand y-axis), evaluated at Hartheim site in June 2005*

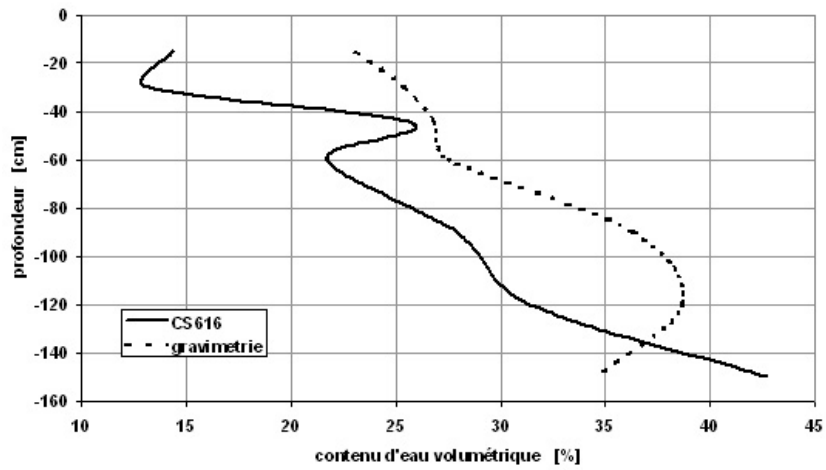


Figure 6 : Teneur en eau volumique du sol sous blé, mesurée le 23 juin 2005, à 6 profondeurs, par TDR (CS616) et par prélèvement d'échantillons. *Volumetric water content of the soil under wheat, June, 23, 2005, at 6 depths, measured by TDR method (CS616 sensor) and evaluated gravimetrically.*

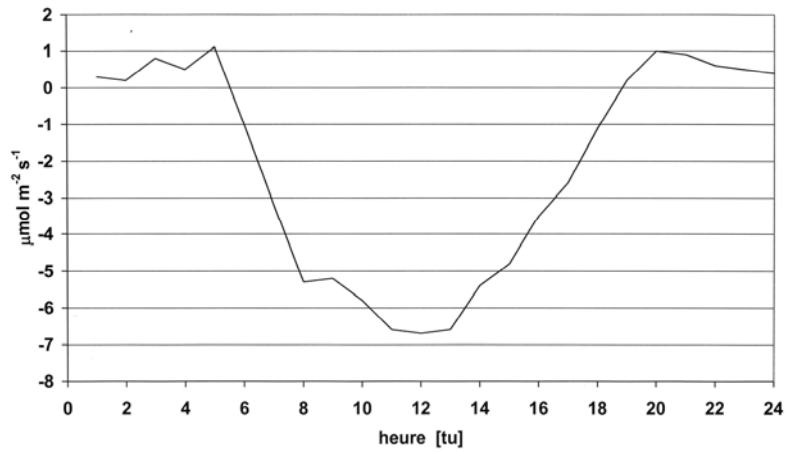


Figure 7 : Variation diurne du flux de CO₂ [μmol/m²s] pour le site Montmeyan ESCOMPTE- (moyennes de juin/juillet 2001) d'après Fotiadi (2003). *Mean daily CO₂ flux [μmol/m²s] at the ESCOMPTE site Montmeyan. Mean values from June/July 2001, after Fotiadi (2003).*

Remerciements

Cette étude est réalisée dans le cadre du projet IINTERREG III A N° 3c. 10, financé par l'Union Européenne.

Bibliographie

- ADAMS, M.A. and P.F. GRIERSON., 2001: Stable isotopes at natural abundance in terrestrial plant ecology and ecophysiology: an update. *Plant Biology*, **3**, 299 – 310.
- CHMIELEWSKI, F.-M. and T. RÖTZER, 2001: Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agr. Forest Meteorol.*, **108**, 101 – 112.
- COLEMAN, K., JENKINSON, D.S., CROCKER, G.J., GRACE, P.R. KLÍR, J., KÖRSCHENS, M., POULTON, P.R. and D.D. RICHTER, 1997: Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using RothC-26.2. *Geoderma*, **81**, 29 – 44.
- FALGE, E., BALDOCCHI D., OLSON, R., ANTHONI, P., AUBINET, M., BERNHOFER, C., BURBA, G., CEULEMANS, R., CLEMENT, R., DOLMAN, H., GRANIER, A., GROSS, P., GRÜNWARD, T., HOLLINGER, D., JENSEN, N-O., KATUL, G., KERONEN, P., KOWALSKI, A., TA LAI, C., LAW, B.E., MEYERS, T., MONCRIEFF, J., MOORS, E., MUNGER, J.W., PILEGAARD, K., RANNIK, Ü., REBMANN, C., SUYKER, A., TENHUNEN, J., TU, K., VERMA, S., VESALA, T., WILSON, K., WOFSY, S., 2001: Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agric. Forest Meteorol.* 107:43-69.
- FIEDLER, F. (ed.), 1995: *Atlas climatique du fossé rhénan méridional. REKLIP, Projet climatologique régional*. Offenbach, Strasbourg, Zürich.
- FOKEN, T., 2003: *Angewandte Meteorologie*, Springer, Berlin, 289 pp.
- FOTELLI, M., GEßLER, A. and H. RENNENBERG, 2001: Effects of drought and competition between *fagus sylvatica* seedlings and an early successional species (*Rubus fruticosus*): growth, water status and $\delta^{13}C$ composition. *New Phytologist*, **151**, 527 – 535.
- FOTIADI, A., 2003: *Echanges biosphère – atmosphère des oxydes d'azote et de l'isoprène en région Méditerranéenne (programme ESCOMPTE)*. Thèse UPS Toulouse III, 231 pp.
- GARTHE, H.-J., JAEGER, L. et A. KESSLER, 1986: L'évapotranspiration, une quantité du bilan énergétique. Une étude à long terme au sujet d'une pinède dans la plaine du Rhin supérieur. *Publ. prem. colloque scientifique des universités du Rhin supérieur « Recherches sur l'environnement dans la région »*, Strasbourg, 664 – 675.
- GEßLER, A., SCHREMPP, S., MATZARAKIS, A., MAYER, H., RENNENBERG, H. and M.A. ADAMS, 2001: Radiation modifies the effect of water ability on the carbon isotope composition of beech (*fagus sylvatica*). *New Phytologist*, **150**, 653 – 664.
- GOULDEN, M.L., MUNGER, J.W., FAN, S.-M., DAUBE, B.C. and S.C., WOFSY, 1996: Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: methods and a critical evaluation of accuracy. *Global Change Biology*, **2**, 169 – 182.

- GRANIER, A., BIRON, P., KÖSTNER, B., GAY, L.W., and G. NAJJAR, 1996: Comparison of xylem sap flow and water flux at the stand level and derivation of canopy conductance for Scots pine. *Theor. Appl. Climatol.*, **53**, 115 – 122.
- HABERER, K., 2002: *Auswirkungen von apoplastischem Ascorbat sowie weiteren physiologischen und meteorologischen Parametern auf den NO₂-Gaswechsel von Pflanzen*. Diss. Forstw. Fak., Freiburg, 185 pp.
- HUMBERT, J. et G. NAJJAR, 1992: *Influence de la forêt sur le cycle de l'eau en domaine tempéré. Une analyse de la littérature francophone*. CEREG, ULP Strasbourg, 85 pp.
- IPCC, 2001: *Climate change 2001 – The scientific basis*, 881 pp – *Impacts, adaptation and vulnerability*, 1032 pp. Cambridge, Cambridge University Press.
- JAEGER, L. et A. KESSLER, 1996: Premiers résultats de mesures microclimatique à long terme dans une pinède du fossé rhénan. *Publ. Ass. Intern. Climatol.*, **9**, 332 – 340.
- JOSS, U., 1996: Mikrometeorologie, Profile und Flüsse von CO₂, H₂O, NO₂ und O₃ in zwei mitteleuropäischen Nadelwäldern. *Stratus*, **4**, 100 pp.
- KESSLER, A. und L. JAEGER, 1994: Mittlere Tages- und Jahresgänge der Strahlungsbilanz und ihrer Komponenten über einem südwestdeutschen Kiefernwald. *Erdkunde*, **48**, 14 – 33.
- KIRCHGÄßNER, A., 2001: Phänoklimatologie von Buchenwäldern im Südwesten der Schwäbischen Alb. *Ber. Meteorol. Inst. Univ. Freiburg*, **7**, 271 pp.
- MOORE, C.-J., 1986: Frequency response corrections for eddy correlation systems. *Boundary-Layer Meteorol.* **37**:17-35.
- PARRY, M.L. (ed.) 2000: *Assessment of potential effects and adaptations for climate change in Europe: The Europe ACACIA project*. Jackson Environmental Institute, University of East Anglia, Norwich, UK, 320 pp.
- ROST, J., JAEGER, L., 2005: Variability of Carbon- and water vapour fluxes above a Scots pine forest in the southern upper Rhine plain. *Annalen der Meteorologie* **41**, 74-77.
- SCHMUGGE, T.J. and J.-S. ANDRÉ, 1991: *Land surface evaporation*. Berlin, Springer Verlag, 424 pp.
- SCHOTANUS, P., NIEUWSTADT, F-T-M., DE BRUIN, H-A-R., 1983: Temperature measurement with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluxes. *Boundary-Layer Meteorol.* **26**:81-93.
- VOGT, R., GAY, L.W., TENHUNEN, J.D., BERNHOFER, C. and A. KESSLER (ed.), 1996: HartX'92 – Vegetation – atmosphere coupling of a Scots pine plantation. *Theor. Appl. Climatol.*, **53**, 3 – 183.
- WEBB, E-K., 1982: On the correction of flux measurements for effects of heat and water transfer. *Boundary-Layer Meteorol.* **23**: 251-254.
- WILCZAK, J.M., ONCLEY, S.P. and S.A. STAGE, 2001: Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary-Layer Meteorol.*, **99**, 127 – 150.