

**CONTRIBUTION A L'ELABORATION DU BILAN CARBONE D'UNE  
CULTURE DE FROMENT D'HIVER (*Triticum aestivum* sp.) :  
SUIVI DU DEVELOPPEMENT ET DE LA BIOMASSE**

**CONTRIBUTION TO THE WINTER WHEAT (*Triticum aestivum* sp.)  
CARBON BALANCE ELABORATION: CROP GROWTH AND  
BIOMASS MONITORING**

**Tourneur D., B. Bodson, M. Aubinet, F. Vancutsem, C. Moureaux et A. Falisse**

Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux (<http://www.fsagx.ac.be>);  
e-mail: falisse.a@fsagx.ac.be

**Key Words:** winter wheat, biomass, carbon fluxes, carbon flows, dry matter, GLAI, PAR, VAI  
**Mots clés:** froment d'hiver, matière sèche, biomasse, flux de carbone, GLAI, PAR, VAI

**Résumé :** L'expérimentation en champ avait pour objectif de suivre l'évolution du développement de la culture, de mesurer la production primaire nette de la culture (ou NPP) et les flux de carbone échangés et de les mettre en relation entre eux et avec le développement et la croissance de la culture. La culture a intercepté entre 90 et 95% du PAR (Rayonnement Photosynthétiquement Actif). En période de forte croissance, le GLAI (Green Leaf Area Index) s'est élevé à 3 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>. Le VAI (Vegetation Area Index) mesuré selon deux méthodes était proche de 5 en fin de saison. La teneur en carbone dans la biomasse aérienne n'a pas varié (43%), et ainsi l'évolution de la biomasse a été semblable à celle de la NPP cumulée. La biomasse totale produite à la récolte a été de 19,7 t/ha de matière sèche (- 8,7 t C/ha de NPP cumulée). Une partie du carbone a été exportée du champ par les grains et les pailles (5,8 t C/ha), une autre constituée des résidus de culture et des racines a été incorporée au sol (3 t C/ha).

**Abstract:** This field trial aimed to follow the crop development evolution, to measure its net primary production (NPP) and the exchanged carbon flows and to study the relations between them and the crop growth and development. The crop intercepted between 90 and 95 % of the PAR (Photosynthesis Active Radiation). During the period of intense growth, GLAI (Green Leaf Area Index) rised up to 3 m<sup>2</sup> per m<sup>2</sup>. The VAI (Vegetation Area Index) measured following two methods was close to 5 at the end of the growth season. Aerial biomass carbon content has shown no variation (43%) and thus the biomass evolution has been parallel to the cumulated NPP evolution. Part of the carbon has been exported from the field by grains and straws (5.8 t C/ha), part has been incorporated into the soil through the residues and roots (3.0 t C/ha).

## INTRODUCTION

La vapeur d'eau et le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) sont les gaz qui participent le plus à l'effet de serre. Depuis la révolution industrielle, la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone n'a cessé d'augmenter. Il est donc important de comprendre la dynamique du carbone en relation avec les changements climatiques. C'est pourquoi un réseau mondial (FLUXNET) de mesure en continu des flux de CO<sub>2</sub> par la méthode de covariance de turbulence a été mis en place. De plus, la Communauté française de Belgique a développé un projet intitulé « Action de Recherche Concertée : Mesure des flux de CO<sub>2</sub> et de bilan carboné des grandes cultures ». L'objectif est de comparer le développement et la croissance des

cultures aux différents flux de carbone. Plusieurs unités de la Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux (FUSAGx) y travaillent en étroite collaboration :

- L'Unité de Phytotechnie des Régions Tempérées suit le développement et la croissance des cultures, ainsi que la production primaire nette (NPP).
- L'Unité de Physique des Biosystèmes effectue les mesures d'échange net de l'écosystème (NEE) et modélise la production primaire brute (GPP).

Les flux de carbone pris en compte sont la NPP, qui correspond au carbone stocké par la culture, la GPP, qui représente le carbone que la culture fixe par photosynthèse et la NEE qui est le flux net de carbone mesuré au dessus de l'écosystème. Ces flux permettent de déterminer les respirations hétérotrophe et autotrophe de la culture.

## MATERIEL ET METHODES

### **Le site d'expérimentation**

La culture de froment d'hiver suivie lors de la saison culturale 2004-2005 a été installée sur une parcelle agricole à Loncée (Belgique), en Hesbaye, région caractérisée par un sol limoneux à horizon argilique et un climat de type tempéré océanique, avec une température moyenne annuelle de 10°C et des précipitations annuelles de l'ordre de 800 mm. Sur la saison considérée, les précipitations ont été significativement inférieures à la normale puisque seulement 440 mm ont été observés, ce qui a eu un impact sur la croissance de la culture. La phytotechnie appliquée est représentative de celle pratiquée dans la région : 230 unités d'azote apportées en trois fractions (45-35-150), un désherbage et une application de fongicides.

### **Le suivi du développement de la culture**

Le suivi du développement de la culture a été effectué par la détermination des principaux stades phénologiques entre le 15 mars et la récolte (3 août). De plus, les comptages réalisés ont permis de suivre la densité de population.

### **Le suivi de la croissance de la culture**

Premièrement, la croissance de la culture a été suivie par la mesure de la biomasse aérienne produite entre le 15 mars et la récolte. De plus, la matière sèche a été déterminée pour chaque organe aérien séparément : les tiges, les feuilles vertes, les feuilles mortes et les épis. Le poids de mille grains et l'humidité du grain ont également été déterminés au cours de son remplissage. La biomasse aérienne présente dans les résidus de cultures a été mesurée après récolte du grain et de la paille afin de déterminer les restitutions au sol. Enfin, la biomasse racinaire a été estimée par la relation entre la biomasse totale et la biomasse racinaire proposée par **Baret et al. (1992)**.

Deuxièmement, des mesures d'interception de PAR (Rayonnement Photosynthétiquement actif) ont été effectuées à sept reprises entre le 12 mai et le 15 juillet à l'aide d'un ceptomètre (Sunscan, Delya-T Devices, Cambridge, UK) composé d'une sonde et d'un capteur que l'on place respectivement dans et au-dessus de la végétation. Le placement de la sonde à différentes hauteurs permet de connaître le PAR intercepté par l'épi, la dernière feuille (DF) et l'avant dernière feuille (ADF).

Troisièmement, l'indice de surface de feuilles vertes (GLAI) a été déterminé à partir du 22 avril en utilisant un analyseur d'image WinDIAS (WinDIAS, Delta-T Devices, Cambridge, UK).

### **Le suivi des flux de carbone**

La NEE a été mesurée par la méthode de covariance de turbulence développée par **Baldocchi (2003)**; cette méthode a demandé l'installation du système de mesure décrit par **Moureaux (2004)**. La GPP a été modélisée à partir des mesures de NEE et des observations

météorologiques. Enfin, les prélèvements de biomasse aérienne, les estimations sur la biomasse racinaire et les mesures de teneur en carbone ont permis d'estimer la NPP.

## RESULTATS ET DISCUSSIONS

La présentation des résultats est présentée en fonction de différentes périodes et stades clés de la culture. Les principales mesures effectuées (matière sèche, GLAI et flux de carbone) sont présentées au Tableau 1.

### **Du semis au 15 mars :**

La production de matière sèche est limitée, la biomasse totale ne représente que 0,5 t/ha au 15 mars. Lors de cette période, la culture traverse la saison hivernale et se met en place et n'est pas encore en pleine croissance. 220 plantes/m<sup>2</sup> sont présentes après la levée. Les flux de carbone sont limités puisque seule 0,2 t C/ha est stockée par la culture, de plus, la fixation photosynthétique est faible puisque seulement 0,6 t C/ha est fixée par la culture et que la respiration autotrophe cumulée au 15 mars représente 0,4 t C/ha. Enfin, la culture dégage du carbone vers l'atmosphère (1,3 t C/ha) car les fixations photosynthétiques sont faible et que la respiration hétérotrophe venant des résidus de la culture précédente est importante (1,5 t C/ha).

### **Du 15 mars au 19 avril :**

Lors de cette phase, il y a une reprise de la végétation et la culture est plein tallage. En effet, la biomasse totale va passer de 0,5 t/ha à 2,7 t/ha. Au 19 avril, le GLAI vaut 1,5 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>. La matière sèche des feuilles vertes vaut 1 t/ha. Les flux de carbone cumulés deviennent significatif puisque la culture a fixé 2,7 t C/ha et qu'elle stocke 1,2 t C/ha au 19 avril. La NEE devient alors négative (du carbone est prélevé de l'atmosphère vers la culture).

### **Du 19 avril au 24 mai :**

La biomasse totale passe de 2,7 t/ha à 11,2 t/ha. La matière sèche des feuilles vertes va doubler ainsi que le GLAI qui passe de 1,5 à 3 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>. En effet, car les dernières feuilles apparaissent lors de cette phase. Le GLAI va se maintenir autour de 3 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> entre le 28 avril et le 7 juin. Mais c'est surtout la matière sèche des tiges qui augmente car la culture est en plein redressement. La densité de population est maximale le 26 avril (fin tallage) avec 1140 tiges/m<sup>2</sup> et diminue avec la sélection. Les mesures d'interception de PAR ont été réalisées en plaçant la sonde perpendiculairement au sens des lignes. En effet, l'interception du PAR par la culture était significativement inférieure lorsque la sonde était placée parallèlement au sens des lignes. De plus, en plaçant la sonde perpendiculairement au sens des lignes l'hétérogénéité de la culture est mieux prise en compte. C'est ainsi que 91% du PAR est intercepté par la culture lors de cette phase.

### **Du 24 mai au 31 mai :**

La culture est en pleine épiaison, la culture possède alors 450 épis/m<sup>2</sup>. La biomasse totale vaut 11,2 t/ha. L'émergence de l'épi fait diminuer la matière sèche de la tige qui passe de 6,4 t/ha à 5,6 t/ha. Le GLAI se maintient à 3 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> et 91% du PAR est intercepté par la culture. Les flux de carbone cumulés continuent d'augmenter puisque 8,6 t C/ha sont fixées par la culture, dont 4,9 t C/ha y sont stockées et que la NEE cumulée vaut 3,8 t C/ha. La respiration autotrophe est alors dominante sur la respiration hétérotrophe cumulée qui semble se stabiliser.

### **Du 31 mai au 7 juin :**

Lors de cette phase de floraison de la culture, la biomasse totale continue d'augmenter pour arriver à 14,2 t/ha, cette matière sèche est essentiellement dirigée vers les tiges car le remplissage des épis n'a pas encore commencé. Le GLAI et la matière sèche des feuilles

verte se maintiennent. 91% du PAR est toujours intercepté par la culture. Les flux de carbone cumulés suivent leur progression pour arriver à 9,7 t C/ha fixées par la culture, 6,2 t C/ha y sont stockées et l'échange net de l'écosystème représente -4,5 t C/ha.

**Tableau 1 : Suivi de la production de matière sèche, de sa distribution dans la plante, du GLAI et des flux de carbone (NEE, GPP et NPP)**

Date	Stade	Matière sèche						GLAI	NEE	GPP	NPP
		Totale	Tiges	Feuilles vertes	Feuilles brunes	Paille	Epis				
Unités		t ha <sup>-1</sup>						m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup>	t C ha <sup>-1</sup>		
		g m <sup>-2</sup> j <sup>-1</sup>						m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> j <sup>-1</sup>	g C m <sup>-2</sup> j <sup>-1</sup>		
14-10	Semis	0	0	0	0	0		0	0	0	0
		+0,3							+0,9	-0,4	-0,1
15-03		0,5	+0,5	+0,5	+0,2	+1,1		+0,008	+1,3	-0,6	-0,2
	Tallage	+6,3							-3,1	-6	-2,9
19-04	Redressement	2,7	0,9	1	0,3	2,1		1,5	0,2	-2,7	-1,2
		+24,3	+15,7	+3,1	+3,1	+20,0		+0,046	-9,1	-13,7	-0,3
24-05	Dernière feuille étalée	11,2	6,4	2,1	0,7	9,1		3,1	-3,0	-7,5	-4,9
		0,0	-11,4	-5,7	-1,4	-17,1		-0,014	-11,4	-15,7	0,0
31-05	Epiaison	11,2	5,6	1,7	0,6	7,9	1,1	3	-3,8	-8,6	-4,9
		+42,9	+24,3	0,0	+5,7	+30,0	+10,0	+0,014	-10	-15,7	-18,6
07-06	Floraison	14,2	7,3	1,7	1	10	1,8	3,1	-4,5	-9,7	-6,2
	Formation du grain	+22,9	+2,9	-2,9	+2,1	+2,9	+15,0	-0,057	-10	-16,4	-9,3
21-06	Grain laiteux	17,4	7,7	1,3	1,3	10,4	3,9	2,3	-5,9	-12,0	-7,5
	Formation du grain	+16,7	-10	-3,3	+2,4	-11,0	+32,4	-0,081	-3,8	-10,9	-7,1
12-07	Grain pâteux	20,9	5,6	0,6	1,8	8,1	10,7	0,6	-6,7	-14,3	-9,0
	Maturation du grain	-6,0		-3,0			+0,5	-0,030	+2,5	-3,5	+1,5
01-08	Grain dur	19,7		0			10,8	0	-6,2	-15,0	-8,7

#### Du 7 juin au 21 juin :

Cette période représente la première phase de remplissage du grain. En effet, la biomasse totale continue d'augmenter (17,4 t/ha) mais à la fois dans les tiges et les épis (Tableau 1). Le poids de mille grains (PMG) vaut 9 g au 21 juin. Le GLAI et la matière sèche des feuilles vertes commencent à diminuer vu que seules l'avant dernière feuille et la dernière feuille sont encore en partie verte. Cependant 94% du PAR est alors intercepté par la culture. Les flux de carbone cumulés suivent toujours la même progression.

#### Du 21 juin au 12 juillet :

Lors de cette deuxième phase de remplissage du grain, la biomasse totale continue d'augmenter (20,9 T/ha). Mais cette fois, seule la matière sèche des épis augmente alors que la matière sèche des tiges diminue (Tableau1). C'est pourquoi on observe une forte augmentation du PMG qui passe de 9 à 38 g. Il y a donc mobilisation des réserves de la tige vers les épis. Le GLAI continue de diminuer car seule la dernière feuille est encore en partie verte le 12 juillet. L'interception du PAR passe de 94 à 91% probablement du au recroquevillement des feuilles sénescences. Durant cette période, l'épi intercepte 61% du PAR alors que la dernière feuille et l'avant dernière feuille intercepte respectivement 16 et 11% du PAR, ces valeurs sont similaires à celles de **de Gellinck (2003)**. Les flux de carbone continue

de croître pour atteindre 14,3 t C/ha fixées par la culture, 9 t C/ha stockées par la culture et un échange net de - 6,7 t C/ha.

#### Du 12 juillet au premier août :

Enfin lors de cette dernière période, la culture est en phase de maturation. La biomasse totale c'est stabilisée à 19,7 t/ha, le GLAI c'est annulé avec la sénescence de la dernière feuille. La matière sèche de chacun des organes n'évolue plus et l'épi représente 60% de la biomasse aérienne. Le PMG est stabilisé à 42 g et la maturation de la culture est visible par la perte en humidité des grains qui passe de 42 à 15%. Jusqu'à cette phase, l'avancement de la culture était similaire aux autres dans la région. Cependant, lors de cette phase une accélération de la sénescence de la culture a été mise en évidence par des comparaisons de surface vertes des 2 dernières feuilles et de rendement avec les essais de l'Unité de Phytotechnie des Régions Tempérées (FUSAGx). En effet, la culture suivie présentait 50 et 40% de surface verte en moins sur respectivement l'avant dernière feuille et la dernière feuille. De plus, un rendement significativement inférieur de 750 kg/ha était observé. Cette différence étant due au fait que la culture suivie a été particulièrement touchée par la sécheresse accentuée par le non labour avant le semis. Tout comme la production de biomasse, les flux de carbone se sont également stabilisés pour atteindre 15 t C/ha fixé par la culture, 8,7 t C/ha stockées par celle-ci et un échange net de -6,2 t C/ha peu avant la récolte. Enfin, à la récolte la respiration hétérotrophe cumulée et la respiration autotrophe cumulée valent respectivement 2,3 t C/ha et 6,6 t C/ha

#### Les restitutions au sol

A la récolte, la culture étudiée a produit 19,7 t/ha de matière sèche (ou 8,7 t C/ha). Cette biomasse va en partie être récoltée ; 8,8 t/ha de matière sèche (ou 3,7 t C/ha) vont être exportées du champ par les grains et 4,2 t/ha de matière sèche (ou 2,1 t C/ha) vont également être enlevées du champ par la paille. Il restera donc 4,7 t/ha de matière sèche (ou 2 t C/ha) sur le champ dans les résidus de culture que sont les éteules, les balles, les grains perdus, les paillettes etc. A cela, il faut encore ajouter l'estimation de la biomasse racinaire qui est de 2 t/ha de matière sèche (ou 0,9 t C/ha) à la récolte. C'est donc 6,7 t/ha de matière sèche et de carbone qu'elle contient (2,9 t C/ha) qui seront restitués au sol et dégradés les années suivantes pour être réémis vers l'atmosphère par la respiration hétérotrophe.

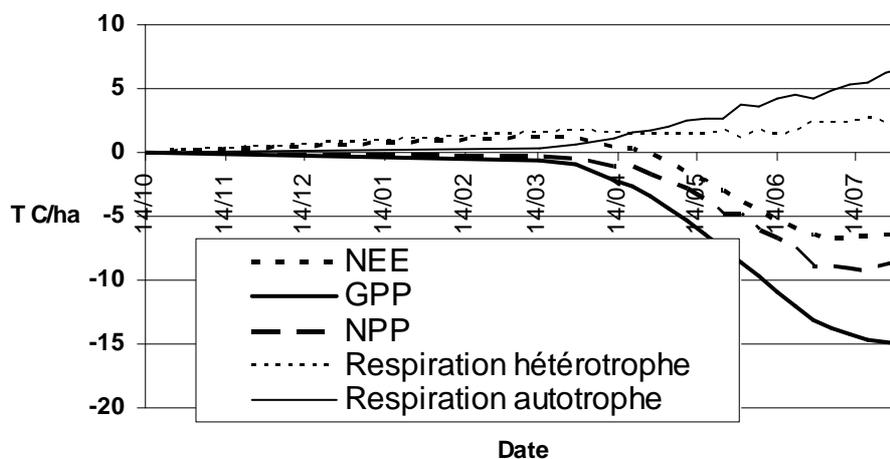


Figure 1 : Evolution des flux cumulés (NEE, NPP, GPP, respiration hétérotrophe et respiration autotrophe) en t C/ha

## CONCLUSIONS

Cet essai met évidence les liens étroits qui existent entre le développement de la culture, sa croissance et les flux de carbone en fonction des différents stades de la culture. Entre le 12 mai et le 15 juillet, la culture de blé d'hiver a intercepté 91 à 94% du PAR. Ces mesures pourraient être réalisées plus tôt dans la saison et plus régulièrement pour bien mettre en évidence la relation entre la croissance de la culture et le rayonnement intercepté. Le GLAI est proche de 3 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> entre le 28 avril et 7 juin, il diminue ensuite pour s'annuler le 26 juillet. Plus le GLAI est élevé, plus la production de matière sèche est importante. La méthode utilisée pour la mesure du GLAI pourrait être comparée à d'autres. En effet, on peut déduire le GLAI à partir de mesures réalisées sur la teneur en azote dans les pailles ou la matière sèche des feuilles vertes puisque le GLAI est corrélé avec ces deux paramètres. La pente de la relation entre le GLAI et la teneur en azote dans la paille est de 3,1 g N/m<sup>2</sup>, alors que **Scott et al. (1994)** ont observé une teneur de 3 g N/m<sup>2</sup>. De plus, la pente de la relation entre le GLAI et la matière sèche des feuilles vertes vaut 74 g/m<sup>2</sup>. La teneur en carbone pour le froment d'hiver ne varie pas (43%) au cours du temps. C'est pourquoi l'évolution de la biomasse est semblable à la NPP cumulée. Seulement 2,7 t/ha de matière sèche (ou - 1,2 t C/ha de NPP cumulée) sont présentes le 19 avril (début redressement). Ensuite, la production de matière sèche augmente considérablement jusqu'au stade « grain pâteux » (12 juillet) pour atteindre 20,9 t/ha (ou -9,0 t C/ha de NPP cumulée). Après cela, la biomasse se stabilise à 19,7 t/ha de matière sèche (ou - 8,7 t C/ha de NPP cumulée) juste avant la récolte (3 août). Une partie du carbone est exportée du champ par la récolte des pailles et des grains (5,8 t C/ha). Le reste (2,9 t C/ha) est restitué au sol. Il aurait été intéressant de réaliser des mesures de matières sèches sur la biomasse racinaire. En effet, seules des estimations ont pu être présentées dans ce travail. Il est important de rappeler les conditions particulières de sécheresse qui ont eu lieu et leur éventuel impact sur le déroulement de la fin de la saison de culture par rapport à la normale.

## REFERENCES

1. Baret F., A. Olioso, et J.L. Luciani, 1992, Root biomass fraction as a function of growth degree days in wheat. *Plant and soil*. 140: 137-144
2. Baldocchi D.D., 2003, Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rate of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology* 9 (4): 479-492
3. de Ghellinck D., 2003, Influence des modalités d'apport de la fumure azotée sur l'utilisation de l'engrais et l'élaborations du rendement chez le froment d'hiver (*Triticum aestivum* L.). Travail de fin d'étude FUSAGX. 86p
4. Moureaux C., 2004, Conception et mise au point d'un système de mesure des flux de CO<sub>2</sub> échangés par une culture agricole. DEA en sciences agronomiques et Ingénierie biologique. Gembloux : FUSAGx
5. Scott R.K., K.W. Jaggard, et al., 1994, Resource capture by arable crops. *Resource capture by crops*: Nottingham University Press. 469p: 279- 302