



HAL
open science

Quantification et comparaison des dépôts stomatiques et non stomatiques d'ozone entre deux jeunes pinèdes sur deux années de croissance

Julien Kammer

► **To cite this version:**

Julien Kammer. Quantification et comparaison des dépôts stomatiques et non stomatiques d'ozone entre deux jeunes pinèdes sur deux années de croissance. [Stage] 2012, 17 p. hal-02808789

HAL Id: hal-02808789

<https://hal.inrae.fr/hal-02808789>

Submitted on 6 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Université Bordeaux1

Master sciences , technologies, santé
Mention Chimie
Spécialité écotoxicologie et chimie de l'environnement
(EXCE)

Kammer Julien

**Quantification et comparaison des dépôts stomatiques et non
stomatiques d'ozone entre deux jeunes pinèdes sur deux années de
croissance**

Période de stage : 23/04/2012 au 26/06/2012

Maître de stage : Eric Lamaud

Année universitaire : 2011-2012

Unité d'accueil :

EPHYSE

Unité de Recherche Ecologie fonctionnelle et PHYSique de l'Environnement

INRA, Centre de Bordeaux – Aquitaine

71 avenue Edouard Bourleaux

33883 Villenave d'Ornon

FRANCE

Sommaire

<u>Remerciements</u>	2
<u>Présentation de la structure d'accueil</u>	3
<u>1 Introduction</u>	4
<u>2 Matériels et méthodes</u>	5
<u>2.1 Sites d'études</u>	5
<u>2.2 Mesures des flux turbulents et paramètres associés</u>	5
<u>2.3 Description du modèle de dépôt d'ozone</u>	6
<u>2.3.1 Modèle big-leaf</u>	6
<u>2.3.1 Conductance stomatique</u>	6
<u>2.2.3 Conductance de dépôt au sol</u>	7
<u>2.3.4 Conductance cuticulaire</u>	7
<u>3 Résultats et discussion</u>	8
<u>3.1 Validation du modèle de partition du dépôt d'ozone</u>	8
<u>3.2 Dépôts d'ozone cumulés sur les sites de Bilos et Bilos 2</u>	9
<u>4 Conclusions et perspectives</u>	13
<u>Abréviations</u>	14
<u>Bibliographie</u>	15

Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier Eric Lamaud, mon maître de stage, qui a accepté de me prendre en stage durant 4 mois. Je le remercie pour toutes les explications, l'encadrement et l'aide qu'il a pu m'apporter tout au long de ce stage. Je souhaite également le remercier pour sa gentillesse et sa disponibilité de tous les instants.

Je remercie également Denis Loustau pour avoir accepté mon stage.

Merci à Virginie Moreaux pour ses explications sur le site de Bilos, surtout sur les dynamiques des pins et de la végétation adventice.

Enfin, je remercie Amen Al Yaari, Damien Commandoire, Elise Potier et Jean-Charles Salamens pour les conversations et la bonne humeur régnant dans la salle commune où nous nous trouvions.

Merci à toute les personnes de l'unité pour leur accueil et leur sympathie.

Présentation de la structure d'accueil

L'unité de recherche en Ecologie fonctionnelle et PHYSique de l'Environnement, EPHYSE, est une unité de l'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) rattachée aux départements Environnement et Agronomie (EA) et Ecologie des Forêts, Prairies et milieux Aquatiques (EFPA). L'Unité implantée sur deux sites, le domaine de la Grande Ferrade à Villenave d'Ornon et le domaine de l'Hermitage à Cestas Pierroton, dépend du centre INRA de Bordeaux Aquitaine.

L'unité a pour objectif de développer des recherches scientifiques finalisées sur le fonctionnement des écosystèmes continentaux comme les cultures ou les forêts, qui composent l'essentiel des paysages ruraux et naturels en Europe. Ces activités se placent dans le champ de l'écologie fonctionnelle et de la physique appliquée et ont une vocation environnementale.

Les recherches visent à assurer une meilleure compréhension et une meilleure description des interactions entre la végétation et l'atmosphère, l'originalité de l'unité étant ici de combiner un savoir-faire sur les processus physiques (échanges radiatifs, échanges énergétiques, échanges gazeux, turbulence atmosphérique) avec un savoir-faire sur les processus biologiques mis en jeu (régulation stomatique, utilisation de l'eau par les plantes, croissance). Les applications nombreuses concernent des échelles d'espace très différentes allant de l'échelle très locale de la parcelle agricole à des échelles plus vastes (le paysage, la région) nécessitant des méthodes d'observation adaptées. L'ensemble des recherches privilégie des approches combinant à la fois des activités expérimentales et des activités de modélisation.

L'unité a ainsi été constituée autour de 3 équipes : Mécanique des Fluides Environnementale, Fonctionnement Biophysique des Ecosystèmes et Spatialisation et Télédétection.

L'équipe mécanique environnementale, au sein de laquelle j'ai effectué mon stage, aborde des thématiques environnementales mettant en jeu l'écoulement atmosphérique et les échanges sol-plante-atmosphère sur une large gamme d'échelles spatiales, dont celle du paysage hétérogène (de quelques mètres à plusieurs kilomètres), et temporelles. Ces thématiques rentrent dans le double contexte (i) du changement climatique et du possible accroissement des événements extrêmes (tempêtes, sécheresse), et (ii) de nouvelles pratiques agricoles et de leurs conséquences agro-environnementales. Pour mener à bien ses travaux, le laboratoire utilise conjointement l'observation en atmosphère réelle, la simulation expérimentale en laboratoire et la modélisation numérique.

1 Introduction

L'ozone, composant mineur de l'atmosphère, est un polluant secondaire, c'est-à-dire qu'il n'existe pas, ou quasiment pas, de source directe d'ozone. En effet, il n'est pas directement émis dans l'atmosphère, mais issu de différents processus physico-chimiques. De plus, l'ozone troposphérique est un gaz à effet de serre relativement important, et un fort oxydant. Ses échanges entre l'atmosphère et la phytosphère sont contrôlés par des interactions complexes de processus météorologiques et biologiques, encore mal connus (Grunhage et al., 2000). Il est également avéré que ce polluant a des effets néfastes sur l'homme (sur les voies respiratoires notamment) et sur les plantes, dont la gravité dépend de la concentration et du temps d'exposition à l'ozone. De par son fort caractère oxydant, l'ozone affecte également les conditions sanitaires puisqu'il peut dégrader certains matériaux composant les infrastructures humaines (dégradation des peintures, des murs, des métaux, ...).

Depuis l'ère préindustrielle, en raison des activités humaines, une augmentation entre 20 et 50% des concentrations d'ozone troposphérique a été constatée (Denmann et al., 2007). Si les tendances actuelles se maintiennent, l'ozone pourrait augmenter de 20 à 25% d'ici 2050 et de 40 à 60% d'ici 2100 selon les différents scénarii. Sur la base de ces prévisions, des questions concernant les dommages imputés à l'ozone sur les écosystèmes peuvent être posées. Ces dommages peuvent être de différents ordres et, dépendant des caractéristiques physiologiques des plantes, varier d'une espèce à l'autre. La variation de la sensibilité selon l'espèce pose la question de l'évolution des communautés végétales du fait d'un possible avantage compétitif pour les espèces tolérantes.

En matière de prévision des dommages, des directives nationales et européennes ont été instaurées en 1990. Elles sont basées sur des seuils critiques définis à partir d'indices d'exposition des végétaux à la concentration d'ozone ambiante, comme l'AOT40 (concentration d'ozone cumulée au dessus d'un seuil de 40 ppb). Mais ces critères pourraient être améliorés, en développant par exemple des indices basés sur les flux d'ozone absorbés par les plantes *via* leurs échanges stomatiques.

Pour cela, il faut d'abord être capable de distinguer, dans le flux d'ozone capté par un écosystème donné, la part du dépôt stomatique, potentiellement néfaste pour les plantes, et la part du dépôt non stomatique, qui ne les affecte *a priori* pas. Dans un second temps, il est également nécessaire de prendre en compte les phénomènes chimiques de détoxification intervenant dans les cellules végétales, qui constituent des mécanismes de défense des plantes vis-à-vis de l'ozone, en diminuant la dose effectivement absorbée.

Centré sur le premier aspect du problème, le travail présenté dans ce rapport vise à comprendre et modéliser les mécanismes d'échanges d'ozone entre l'atmosphère et la phytosphère, qui vont déterminer la part des dépôts stomatiques et non stomatiques. L'étude s'appuie sur l'analyse de flux d'ozone mesurés sur deux parcelles voisines de pins maritimes d'âge différent et ayant subi des traitements différents. Pour la modélisation, nous utiliserons un modèle de type *big-leaf*, développé initialement par Lamaud et al. (2009) pour un champ de maïs. Ce modèle permet de différencier les différentes composantes du flux d'ozone : stomatique, cuticulaire et sur le sol. Les paramètres du modèle seront adaptés à notre site d'étude.

2 Matériels et méthodes

2.1 Sites d'études

Le site d'étude est une zone d'environ 60 hectares localisée à 50 km au sud-ouest de Bordeaux, dans la forêt des Landes de Gascogne, à Bilos (44°29'38.08" N ; 0°57'22" O, altitude : 40 m). Le site a été divisé en deux parcelles de 30 hectares, qui sont chacune constituées de pins maritimes (*Pinus pinaster* Ait.) semés en juillet 2004 pour la parcelle que l'on nommera Bilos 1, et en juillet 2005 pour celle que l'on nommera Bilos 2. Le sous-bois est constitué de différentes espèces de petite taille, dont l'espèce majoritaire est l'ajonc (*Ulex Europaeus* L.) sur Bilos 2. La bruyère (*Calluna Vulgaris* L.) et la molinie (*Molinia coerulea* L.) sont également des espèces présentes dans la strate herbacée de chacune des deux parcelles. Sur les deux sites d'études, le sol est de nature sableuse et recouvert d'une litière de matière végétale morte.

S'intégrant dans un schéma sylvicole détaillé par Moreaux (2012), Bilos 1 a été dépressé et débroussaillé en novembre 2008. Le débroussaillage a pour objectif de limiter la propagation d'incendie par la rupture de la continuité du couvert végétal, mais également de diminuer la compétition interspécifique entre les pins et les espèces du sous-bois. Le dépressage permet quant à lui d'obtenir une densité d'arbres de l'ordre de 1800 tiges par hectare. Un second débroussaillage a été effectué en novembre 2009 afin de conserver la même structure en 2010 (voir figure 1). La parcelle de Bilos 2 n'a quant à elle subi aucun traitement mécanique. Le LAI (*Leaf Area Index*), qui représente la surface foliaire par unité de surface de sol, est de l'ordre de 1 pour Bilos 1 et de 3 pour Bilos 2 sur la période étudiée.



Bilos 1



Bilos 2

Figure 1 : sites de Bilos 1 et Bilos 2 en 2010

2.2 Mesures des flux turbulents et paramètres associés

La mesure des flux turbulents (O_3 , CO_2 , vapeur d'eau, ...) entre la végétation et l'atmosphère est réalisée par la méthode des corrélations, qui consiste à coupler un anémomètre sonique mesurant la vitesse du vent dans les 3 dimensions avec les capteurs mesurant les variables

turbulentes considérées. Ces mesures sont complétées par des mesures météorologiques (rayonnement global, température et humidité de l'air, pluviométrie, ...) et des mesures de température et de contenu en eau du sol. Toutes les mesures effectuées sur le site de Bilos sont décrites dans l'article de Moreaux et al. (2011). Les données utilisées lors de ce stage concernent la période allant du 1^{er} mai 2009 (Day of Year 121) au 31 octobre 2010 (Day of Year 305), où des mesures ont été effectuées en parallèle sur les parcelles de Bilos 1 et Bilos 2.

2.3 Description du modèle de dépôt d'ozone

2.3.1 Modèle big-leaf

Le modèle utilisé ici pour le dépôt d'ozone est de type *big-leaf*, c'est-à-dire que l'on considère l'ensemble du couvert comme une surface d'échange uniforme, sans différenciation suivant la composante verticale, par opposition à un modèle multi-couches. La conductance globale de la canopée pour le dépôt d'ozone (g_c), et la résistance R_c correspondante, s'expriment alors sous la forme suivante :

$$g_c = \frac{1}{R_c} = \frac{V_d}{1 - V_d(R_a + R_b)} \quad (1)$$

où V_d est la vitesse de dépôt (flux normalisé par la concentration) d'ozone à la hauteur de mesure z , R_a est la résistance aérodynamique de la couche d'air entre z et la surface de dépôt, et R_b est la résistance de couche limite quasi laminaire au voisinage de cette surface.

Dans les modèles *big-leaf*, la conductance de la canopée pour le dépôt d'ozone est exprimée comme la somme de 3 conductances caractérisant les différentes voies de dépôt, qui sont la conductance stomatique (g_s), la conductance de dépôt au sol (g_{soil}) et la conductance cuticulaire (g_{cut}). La somme des deux dernières forme la conductance non stomatique (g_{ns}) :

$$g_c = g_s + g_{ns} = g_s + g_{soil} + g_{cut} \quad (2)$$

2.3.2 Conductance stomatique

La conductance stomatique (g_s) peut être estimée à partir des mesures de flux de CO₂ selon la relation suivante :

$$g_s = \alpha A^\beta \quad (3)$$

où A est le flux d'assimilation de CO₂, déduit des mesures du flux net de CO₂ suivant la méthode de Kowalski et al. (2003, 2004), et α (m³ mmol⁻¹) et β sont des coefficients dérivés des travaux de Stella et al. (2009) sur le site de Bilos.

2.3.3 Conductance de dépôt au sol

Comme dans la plupart des modèles *big-leaf*, la conductance de dépôt au sol a été exprimée de la manière suivante :

$$g_{soil} = u^* / (R_{ac} + R_{ig}u^*) \quad (4)$$

où u^* est la vitesse de frottement ($m s^{-1}$), R_{ac} est la résistance aérodynamique du couvert végétal ($s m^{-1}$) et R_{ig} est la résistance intrinsèque du sol ($s m^{-1}$).

Les résistances R_{ac} et R_{ig} ont été ajustées selon la méthode décrite par Lamaud et al. (2009). Ainsi, R_{ig} a été établie à $550 s m^{-1}$, une valeur plus élevée que celle obtenue par Lamaud et al. (2009) pour un sol plus argileux sous un couvert de maïs ($240 s m^{-1}$). Ceci est en accord avec les résultats obtenus par P. Stella pour le dépôt d'ozone sur différents types de sol nu (communication personnelle). En effet, les travaux de P. Stella montrent que les sols de type sableux comme celui de Bilos présentent une résistance au dépôt d'ozone plus importante que les sols argileux ou limoneux. Bien sûr, la proximité des deux parcelles étudiées ici implique que la résistance intrinsèque du sol au dépôt d'ozone est la même pour Bilos 1 et Bilos 2.

La résistance aérodynamique du couvert (R_{ac}) dépend théoriquement de sa structure et est censée évoluer avec l'indice foliaire et la hauteur de végétation (van Pul et Jacobs, 1994) sur la période de 16 mois étudiée ici. Cependant, l'ajustement de R_{ac} sur un pas de temps mensuel n'a pas montré de variation saisonnière significative. Ceci peut être dû à une variation trop faible de la structure du couvert, et surtout au fait que la résistance intrinsèque du sol (R_{ig}) soit trop forte pour que les éventuelles variations de R_{ac} aient un impact notable sur le dépôt d'ozone au niveau du sol. R_{ac} a donc été établie à $130 s m^{-1}$ pour Bilos 1 et $150 s m^{-1}$ pour Bilos 2 pour l'ensemble de la période d'étude.

2.3.4 Conductance cuticulaire

Plusieurs études expérimentales ont montré que le dépôt cuticulaire d'ozone augmente avec l'humidité relative de l'air (Lamaud et al., 2002 ; Zhang et al., 2002 ; Zhang et al., 2003 ; Lamaud et al., 2009). C'est pourquoi les modèles de dépôt intègrent depuis peu ce phénomène en exprimant la conductance cuticulaire (g_{cut}) sous la forme suivante :

$$\frac{g_{cut}}{u^*} = \frac{f(RH)}{R_{cut0}} \quad (5)$$

où u^* est la vitesse de frottement ($m s^{-1}$), RH est l'humidité relative de l'air (%) et R_{cut0} (sans unité) est une résistance cuticulaire intrinsèque pouvant dépendre de l'espèce végétale considérée et des caractéristiques structurales du couvert, notamment le *LAI*.

Si la forme générale de cette équation est maintenant admise, l'expression exacte de $f(RH)$ fait encore débat. Pour un champ de maïs, Lamaud et al. (2009) ont proposé l'expression suivante :

$$f(RH) = 1 \quad \text{si } RH < RH_0 \quad (6a)$$

$$f(RH) = e^{k(RH-RH_0)} \quad \text{si } RH > RH_0 \quad (6b)$$

où RH_0 est une valeur seuil de l'humidité relative en dessous de laquelle celle-ci n'affecte pas le dépôt cuticulaire. Pour le maïs, Lamaud et al. (2009) ont observé une valeur de 60% pour RH_0 .

Les données obtenues à Bilos se situent dans une gamme d'humidité relative comprise entre 20 % et 100 %, ce qui nous a permis de tester si la valeur de 60% pour RH_0 restait valable pour ces deux jeunes pinèdes. Il s'est avéré que ce n'était pas le cas car, pour Bilos 1 comme pour Bilos 2, le tracé de $\log(g_{cut}/u_*)$ en fonction de RH ne présente pas de palier en dessous de $RH = 60\%$, ni d'ailleurs pour aucune autre valeur de RH . Ceci peut être lié à la forme des aiguilles de pins et des ajoncs, qui diffèrent fortement de celles des feuilles de maïs, ou à la densité foliaire des deux pinèdes, qui est très inférieure à celle d'un champ de maïs. En tout état de cause, pour les deux pinèdes, RH_0 a été fixée à 0 dans le modèle de conductance cuticulaire qui s'exprime donc comme :

$$\frac{g_{cut}}{u_*} = \frac{e^{k.RH}}{R_{cut0}} \quad (7)$$

Par ailleurs, les données ont montré que les paramètres k et R_{cut0} présentaient un cycle annuel, avec des valeurs plus faibles de k et de la conductance g_{cut0} (i.e. l'inverse de la résistance R_{cut0}) d'octobre à mars, que l'on peut attribuer à la phénologie des deux couverts forestiers. Ceci a été pris en compte dans le modèle, en ajustant les paramètres k et R_{cut0} sur un pas de temps mensuel.

3 Résultats et discussion

3.1 Validation du modèle de partition du dépôt d'ozone

Afin de vérifier la validité du modèle, et par suite d'accorder confiance à la partition du dépôt qu'il nous fournit, nous avons systématiquement comparé les conductances de dépôt globales sur la canopée (g_c) observées et modélisées, sous forme notamment de séries chronologiques comme illustré par les graphiques 1 (pour Bilos 1) et 2 (pour Bilos 2). Chacun des deux graphiques présentent des résultats obtenus dans trois situations contrastées en termes de conditions météorologiques et physiologiques, qui s'accompagnent donc d'une partition très contrastée entre dépôts stomatique, cuticulaire et sur le sol. La première période, en juin 2009, correspond à une forte croissance des deux pinèdes, du fait d'un contenu en eau du sol élevé et d'un fort rayonnement, ce qui se traduit par une forte conductance stomatique pour le dépôt d'ozone (graphiques 1b et 2b). La seconde période est hivernale (décembre 2009) et pluvieuse, d'où une réduction de la conductance stomatique (graphiques 1d et 2d). Enfin, la troisième période (août 2010) est caractérisée par une sécheresse édaphique, ce qui se traduit par une conductance stomatique faible (graphiques 1f et 2f), comme pour la seconde période mais pour des raisons

différentes liées non pas à un faible rayonnement mais à un stress hydrique. Il est à souligner que, dans ces différentes situations, le modèle est généralement en adéquation avec les mesures, hormis quelques épiphénomènes (comme la nuit du DOY 338 de 2009) qui restent à analyser de façon plus approfondie. Ceci nous autorise à accorder confiance à la partition du dépôt d'ozone (illustrée par les graphiques 1b,d,f et 2b,d,f) qui va nous servir maintenant à établir et à comparer les bilans d'ozone déposé sur les deux pinèdes, par les voies stomatique, cuticulaire et de dépôt au sol.

3.2 Dépôts d'ozone cumulés sur les sites de Bilos 1 et Bilos 2

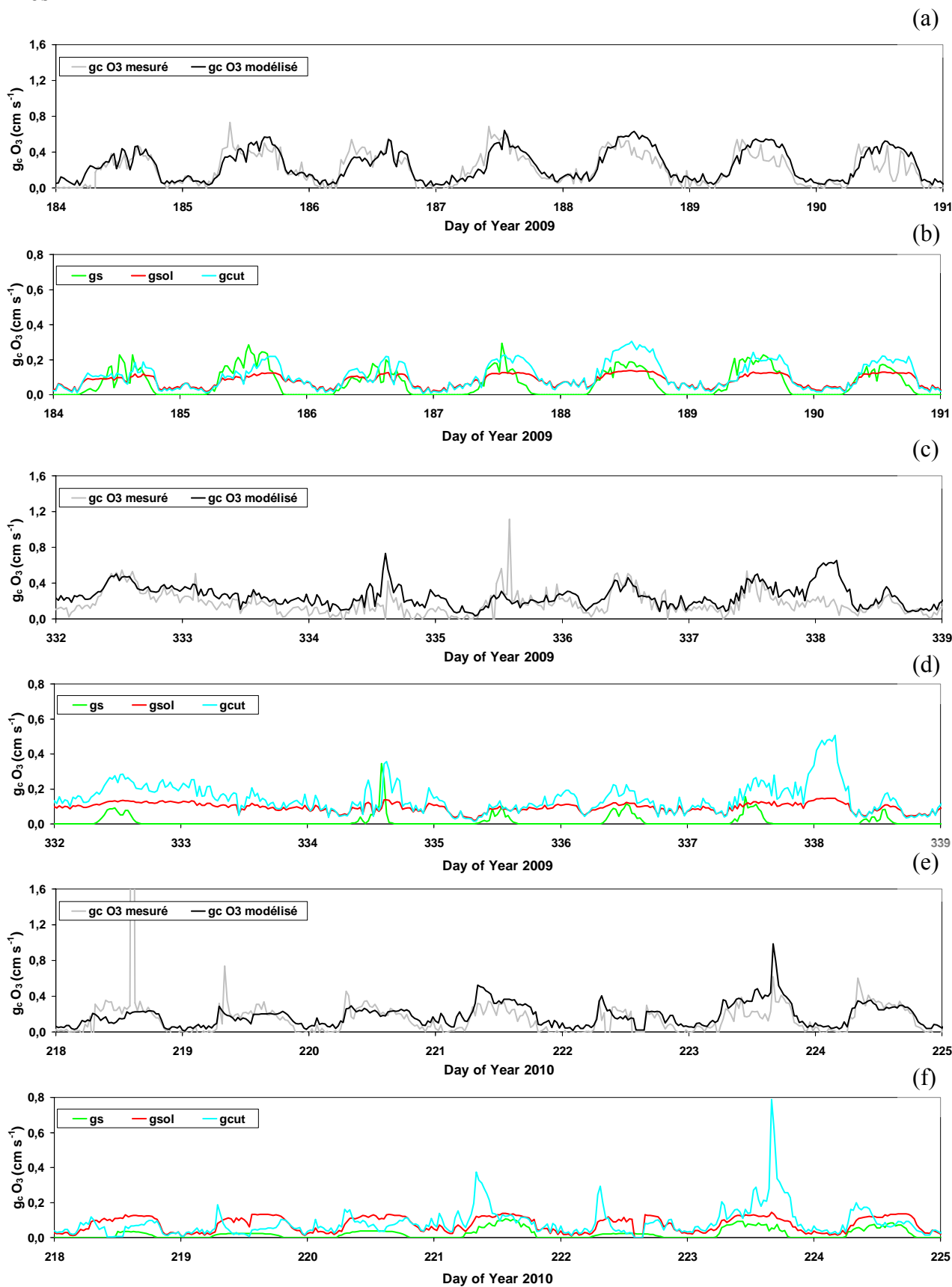
Le graphique 3 présente, pour les 2 sites, les sorties du modèle en termes de cumuls de flux d'ozone globaux et pour chacune des voies de dépôt (stomatique, cuticulaire et au sol).

Pour Bilos 1 (parcelle débroussaillée et dépressée), le cumul de dépôt d'ozone global sur l'écosystème s'élève sur la période étudiée (mai 2009 à août 2010) à 50,5 kg/hectare. La répartition entre dépôts stomatique, cuticulaire et au sol est de respectivement 9,9 kg/hectare, 21,7 kg/hectare et 18,9 kg/hectare. Pour Bilos 2, le cumul global s'élève à 67,2 kg/hectare, avec une répartition entre cumuls stomatique, cuticulaire et au sol de 13,9 kg/hectare, 36,5 kg/hectare et 16,8 kg/hectare, respectivement. Le cumul de dépôt d'ozone est donc nettement supérieur à Bilos 2 (parcelle non débroussaillée), puisque 16,7 kg d'ozone par hectare se sont déposés en plus au cours des 16 mois étudiés. Cette différence est en grande partie due à la différence entre les dépôts cuticulaires sur les deux sites (14,78 kg/hectare au profit de Bilos 2, le couvert le plus développé), et dans une moindre mesure au dépôt stomatique dont la différence est de 3,98 kg/hectare en faveur de Bilos 2. Le dépôt au sol est lui supérieur à Bilos 1, où la résistance aérodynamique du couvert est plus faible du fait de la moindre densité foliaire après débroussaillage et dépressage. Néanmoins, la différence entre les deux parcelles est faible (2,05 kg/hectare) en raison de l'importance de la résistance intrinsèque du sol sableux (identique pour les deux sites) devant la résistance aérodynamique.

Le dépôt cuticulaire est censé dépendre de la surface foliaire sur laquelle l'ozone peut se déposer, mais on ne trouve pas dans la littérature de relation très précise entre dépôt cuticulaire et indice foliaire (*LAI*). La comparaison du rapport des cumuls de dépôt cuticulaire et du rapport des *LAI* sur Bilos 2 et Bilos 1 peut nous permettre d'étudier ce point. Il s'avère que le premier est de 1,7 alors que le second est de 3. Le dépôt cuticulaire ne semble donc pas être directement proportionnel au *LAI*. On peut ainsi penser qu'au-delà d'un certain stade de développement d'un couvert végétal (par exemple à partir du moment où le couvert est fermé), l'augmentation du *LAI* ne s'accompagne pas d'une augmentation du dépôt cuticulaire aussi rapide qu'aux premiers stades de croissance. Ceci conduirait à introduire dans le modèle de dépôt cuticulaire une notion de *LAI* efficace, dépendant évidemment du *LAI* total mais pondéré par la structure du couvert.

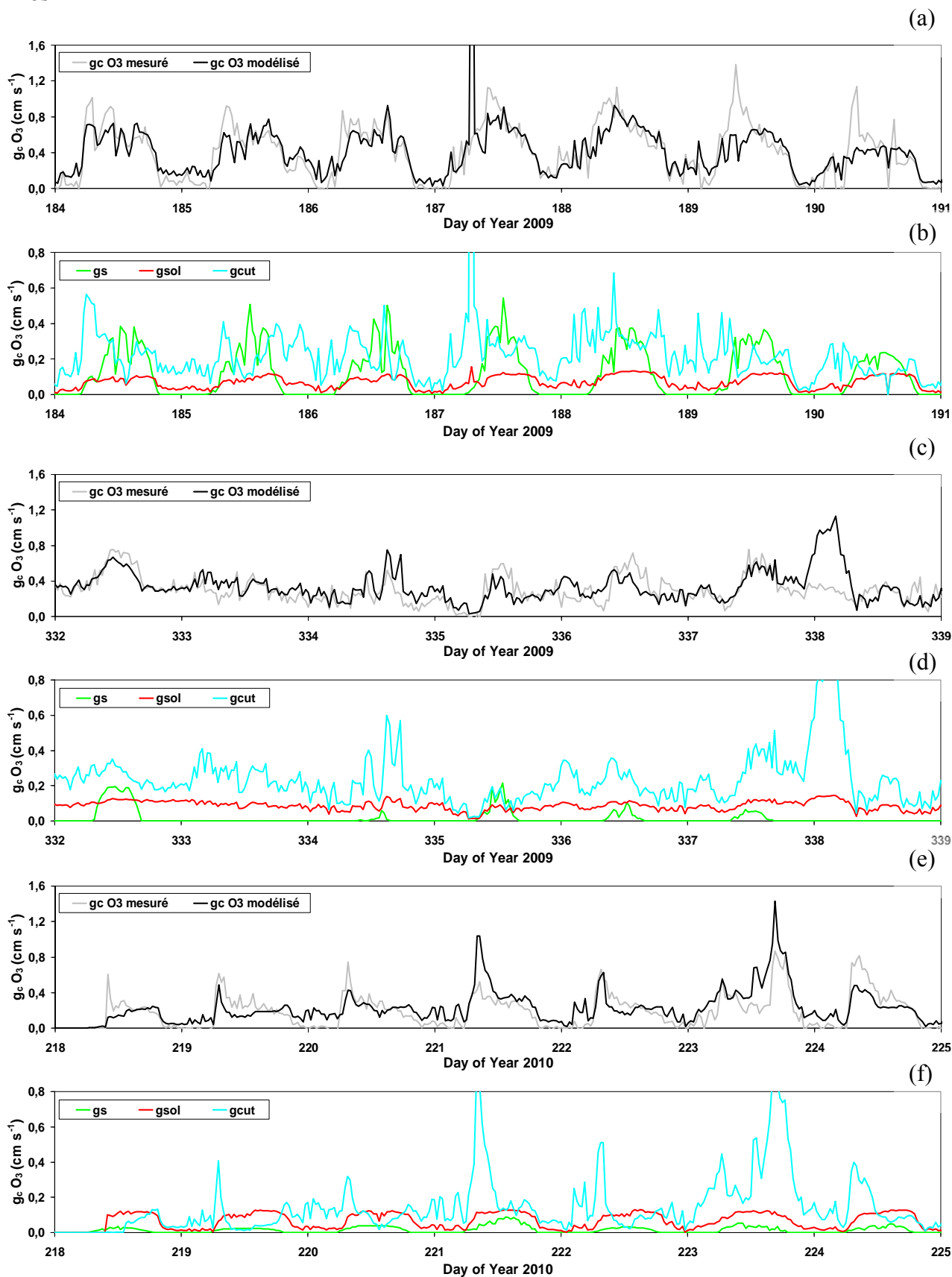
Le dépôt stomatique présente une dynamique plus marquée que les deux autres voies de dépôt. Ainsi, même si le cumul de dépôt stomatique ne constitue pour les deux parcelles qu'une composante minoritaire (20% environ) du bilan, c'est lui qui confère au dépôt d'ozone global l'essentiel de sa dynamique. Nous allons donc maintenant nous intéresser de plus près à cette voie de dépôt, en analysant les périodes de mai à août, pour lesquelles nous avons des mesures pour les deux parcelles et pour les deux années. Le graphique 4 va nous permettre de comparer les deux parcelles au cours de chacun des étés, et le graphique 5 chacune des parcelles entre les deux étés.

Bilos 1

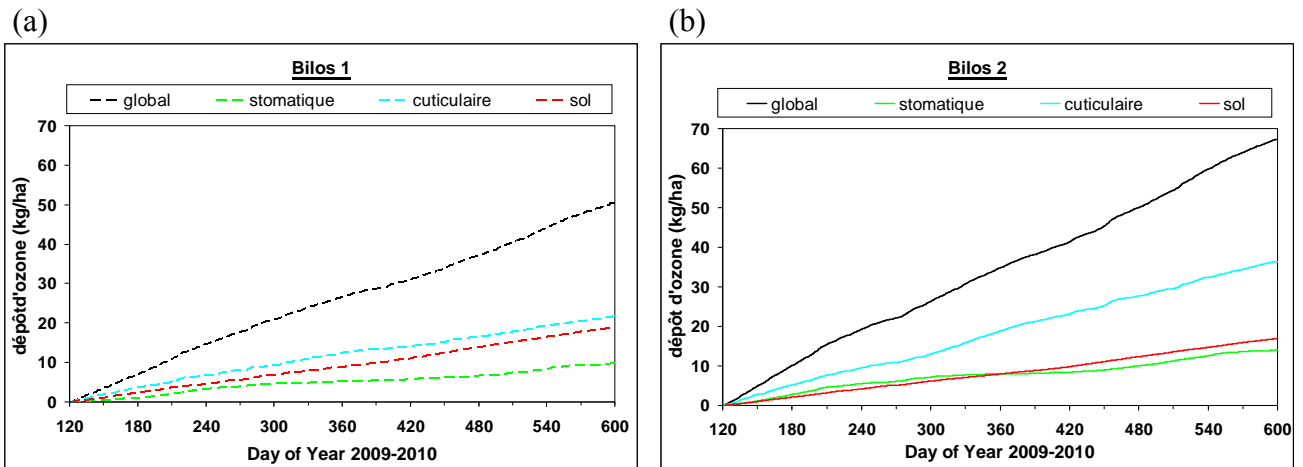


Graphique 1 : Séries chronologiques de la conductance globale (g_c) pour le dépôt d'ozone, mesurée et modélisée (a,c et e) et de la partition en conductances stomatique (g_s), cuticulaire (g_{cut}) et de dépôt au sol (g_{sol}) (b, d et f) pour 3 semaines de juin 2009 (DOY 184-191), décembre 2009 (DOY 332-339) et août 2010 (DOY 218-226) sur le site de Bilos 1.

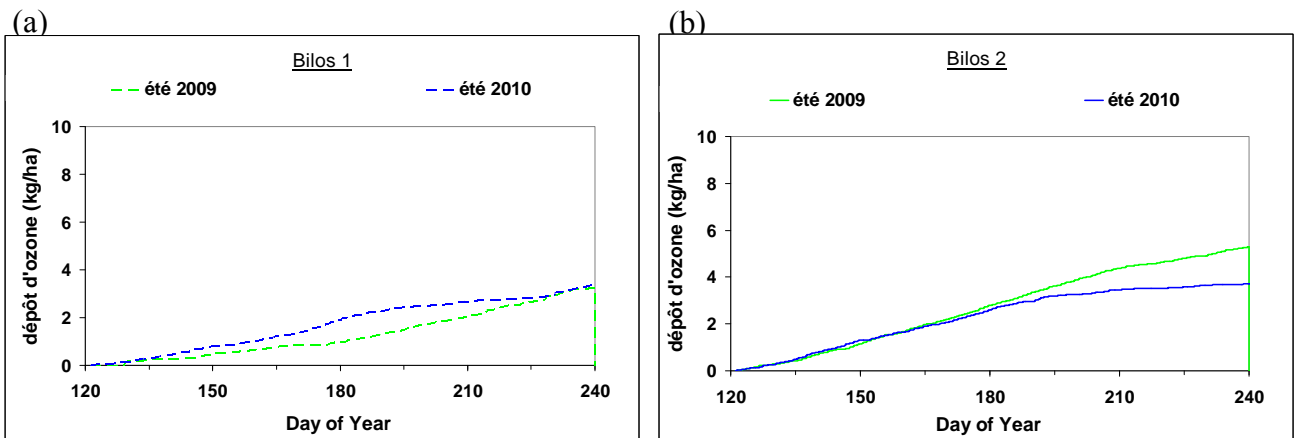
Bilos 2



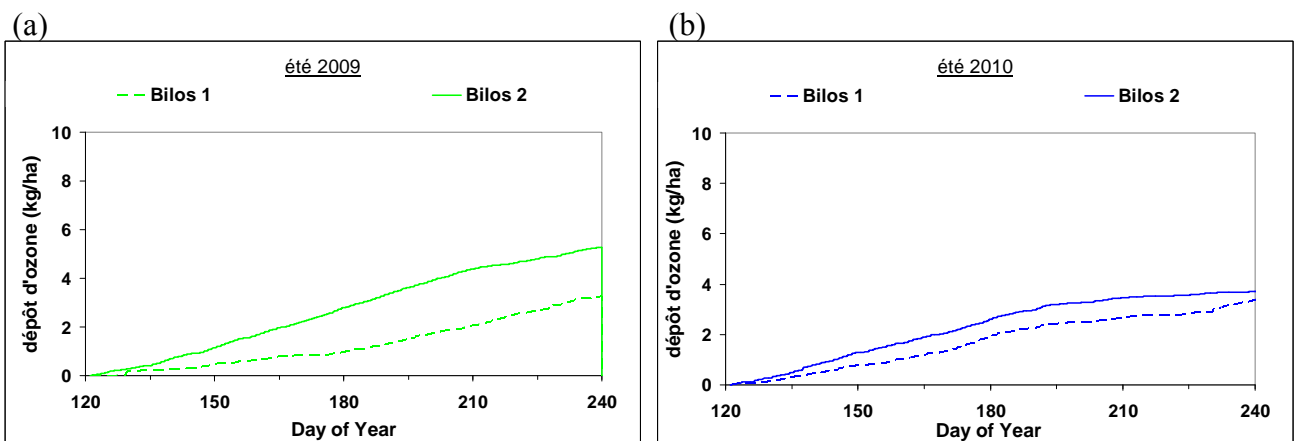
Graphique 2 : Séries chronologiques de la conductance globale (g_c) pour le dépôt d'ozone, mesurée et modélisée (a,c et e) et de la partition en conductances stomatique (g_s), cuticulaire (g_{cut}) et de dépôt au sol (g_{sol}) (b, d et f) pour 3 semaines de juin 2009 (DOY 184-191), décembre 2009 (DOY 332-339) et août 2010 (DOY 218-225) sur le site de Bilos 2.



Graphique 3 : Cumuls de dépôt d'ozone global, et de ses différentes composantes, de mai 2009 à août 2010 pour a) Bilos 1 et b) Bilos 2



Graphique 4 : Cumuls de dépôt d'ozone stomatique lors des étés 2009 et 2010 pour a) Bilos 1 et b) Bilos 2



Graphique 5 : Cumuls de dépôt d'ozone stomatique sur Bilos 1 et Bilos 2 lors de a) l'été 2009 et b) l'été 2010

Le graphique 4 montre une nette différence entre les deux parcelles en 2009, avec un dépôt stomatique plus élevé sur Bilos 2. Cette différence est beaucoup moins forte en 2010, même si elle reste en faveur de Bilos 2. L'une des raisons est d'ordre phénologique, les pins de Bilos 1 s'étant fortement développés entre 2009 et 2010, comme l'ont montré Moreaux et al. (2011). Ces derniers ont également montré que la biomasse de la végétation de l'inter-rang de Bilos 1 était deux fois plus élevée en juillet 2010 qu'en juillet 2009. A l'inverse, la biomasse de Bilos 2 a légèrement diminué entre juillet 2009 et juillet 2010 en raison du dépérissement des ajoncs (présents uniquement sur cette parcelle). L'autre raison est liée aux différences des conditions édaphiques entre les deux étés, comme nous allons le voir maintenant.

Le graphique 4 et, de façon plus nette, le graphique 5 montrent que, pour les deux parcelles, le dépôt stomatique a augmenté nettement moins durant les mois de juillet et août 2010 que pour les mêmes mois en 2009. Ceci est dû à une forte sécheresse édaphique durant l'été 2010, et donc à un stress hydrique qui a contraint les pins à réduire leurs échanges stomatiques. La dynamique des cumuls stomatiques sur le graphique 4b montre que ce stress hydrique a affecté les deux parcelles de façon similaire. Cette réduction conjointe de l'activité stomatique des pins de Bilos 1 et Bilos 2 sous l'effet du stress hydrique est l'autre raison qui explique la plus faible différence entre les deux parcelles durant l'été 2010 par rapport à l'été 2009.

Il est intéressant de souligner qu'en 2010, la quantité d'ozone absorbée par les plantes en juillet et août a été faible, alors même que les plus fortes concentrations en ozone troposphérique sont observées durant ces mois d'été. Ce n'est donc pas forcément parce que la quantité d'ozone est élevée dans l'air que les plantes en absorbent effectivement en grande quantité, dès lors que leur activité stomatique est réduite sous l'effet d'un stress hydrique. Ceci montre une fois de plus les limites des indices d'impact basés sur l'exposition des plantes à la concentration d'ozone ambiante (tels que l'AOT40), déjà mis en défaut lors de la canicule de 2003.

4 Conclusions et perspectives

La modélisation du dépôt d'ozone sur deux jeunes pinèdes de structures différentes a permis de comparer la contribution des différentes voies de dépôt (stomatique, cuticulaire et au sol) entre les deux parcelles au cours de deux années de croissance. La quantification des cumuls d'ozone déposé a montré une nette réduction du dépôt global sur la parcelle débroussaillée et dépressée, due en premier lieu à une réduction du dépôt cuticulaire avec la diminution de la surface foliaire et dans une moindre mesure à une réduction de l'activité stomatique avec la diminution de biomasse.

La deuxième année, marquée par une forte sécheresse édaphique, a permis de souligner les limites des indices d'impact basés sur la concentration d'ozone ambiante et de renforcer l'idée que des indices basés sur la dose d'ozone effectivement absorbée par les plantes seraient plus judicieux.

Afin d'améliorer la modélisation du dépôt d'ozone en vue d'études d'impact, il serait intéressant d'utiliser le modèle multi-couches *MuSICA* développé à Ephyse (Ogée et al. 2003) afin de quantifier la dose d'ozone absorbée par les différentes strates de ces deux pinèdes.

Par ailleurs, il semble important d'analyser les processus chimiques pouvant affecter le dépôt d'ozone, comme ses réactions avec les terpènes émis par les pins, cette composante de la destruction de l'ozone troposphérique étant très mal prise en compte dans les modèles actuels.

Abréviations

A : Flux d'assimilation photosynthétique

g_c : Conductance de couvert du dépôt d'ozone

g_{cut} : Conductance du dépôt cuticulaire d'ozone

g_{ns} : Conductance non stomatique

g_s : Conductance du dépôt stomatique d'ozone

g_{sol} : Conductance du dépôt au sol d'ozone

RH : Humidité relative de l'air

DOY : Jour Julien de l'Année

LAI : Leaf Area Index

R_a : Résistance aérodynamique au-dessus du couvert

R_{ac} : Résistance aérodynamique du couvert au dépôt d'ozone

R_b : Résistance de la couche limite quasi laminaire

R_{cut0} : Résistance cuticulaire intrinsèque au dépôt d'ozone

g_{cut0} : inverse de R_{cut0} , soit la conductance cuticulaire intrinsèque au dépôt d'ozone

R_{ig} : Résistance intrinsèque du sol au dépôt d'ozone

u^* : vitesse de frottement

V_d : Vitesse de dépôt d'ozone

R_c : résistance de couvert au dépôt d'ozone

RH_0 : valeur seuil de l'humidité relative

Bibliographie

Denman, K.L., 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY.

Grünhage, L., Haenel, H.-D., Jäger, H.-J., 2000. The exchange of ozone between vegetation and atmosphere: micrometeorological measurement techniques and models. *Environmental Pollution* 109, 373–392.

Kowalski, A.S., Loustau, D., Berbigier, P., Manca, G., Tedeschi, V., Borghetti, M., Valentini, R., Kolari, P., Berninger, F., Rannik, U., Hari, P., Rayment, M., Mencuccini, M., Moncrieff, J., Grace, J., 2004. Paired comparisons of carbon exchange between undisturbed and regenerating stands in four managed forests in Europe. *Global Change Biology* 10, 1707–1723.

Kowalski, S., Sartore, M., Burlett, R., Berbigier, P., Loustau, D., 2003. The annual carbon budget of a French pine forest (*Pinus pinaster*) following harvest. *Global Change Biology* 9, 1051–1065.

Lamaud, E., Carrara, A., Brunet, Y., Lopez, A., Druilhet, A., 2002. Ozone fluxes above and within a pine forest canopy in dry and wet conditions. *Atmospheric Environment* 36, 77–88.

Lamaud, E., Loubet, B., Irvine, M., Stella, P., Personne, E., Cellier, P., 2009. Partitioning of ozone deposition over a developed maize crop between stomatal and non-stomatal uptakes, using eddy-covariance flux measurements and modelling. *Agricultural and Forest Meteorology* 149, 1385–1396.

Moreaux, V., 2012. Observation et modélisation des échanges d'énergie et de masse de jeunes peuplements forestiers du Sud-Ouest de la France, 295 pages.

Moreaux, V., Lamaud, É., Bosc, A., Bonnefond, J.-M., Medlyn, B.E., Loustau, D., 2011. Paired Comparison of Water, Energy and Carbon Exchanges Over Two Young Maritime Pine Stands (*Pinus Pinaster* Ait.): Effects of Thinning and Weeding in the Early Stage of Tree Growth. *Tree Physiology* 31, 903–921.

Ogée, J., Brunet, Y., Loustau, D., Berbigier, P., Delzon, S., 2003. MuSICA, a CO₂, water and energy multilayer, multileaf pine forest model: evaluation from hourly to yearly time scales and sensitivity analysis. *Global Change Biology* 9, 697–717.

Stella, P., Lamaud, E., Brunet, Y., Bonnefond, J.-M., Loustau, D., Irvine, M., 2009. Simultaneous measurements of CO₂ and water exchanges over three agroecosystems in South-West France. *Biogeosciences* 6, 2957–2971.

Van Pul, W.A.J., Jacobs, A.F.G., 1994. The conductance of a maize crop and the underlying soil to ozone under various environmental conditions. *Boundary-Layer Meteorology* 69, 83–99

Zhang, L., Brook, J.R., Vet, R., 2002. On ozone dry deposition—with emphasis on non-stomatal uptake and wet canopies. *Atmospheric Environment* 36, 4787–4799.

Zhang, L., Brook, J.R., Vet, R., 2003. A revised parameterization for gaseous dry deposition in air-quality models. *Atmospheric chemistry and physics*. Chem. Phys. 3, 2067–2082.