



**Conseil économique
et social**

Distr.
GÉNÉRALE

ECE/EB.AIR/WG.1/2006/8
19 juin 2006

FRANÇAIS
Original: ANGLAIS

COMMISSION ÉCONOMIQUE POUR L'EUROPE

ORGANE EXÉCUTIF DE LA CONVENTION
SUR LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE
TRANSFRONTIÈRE À LONGUE DISTANCE

Groupe de travail des effets

Vingt-cinquième session
Genève, 30 août-1^{er} septembre 2006
Point 5 iv) de l'ordre du jour provisoire

**EFFETS DE L'OZONE SUR LA VÉGÉTATION
DANS LE CONTEXTE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE**

Rapport établi par le Centre de coordination du Programme international
concerté relatif aux effets de la pollution atmosphérique sur la végétation
naturelle et les cultures (PIC-Végétation)

INTRODUCTION

1. De nombreuses études menées ont concerné les effets de la pollution par l'ozone (O₃) sur la végétation. Elles consistaient tant en l'examen des effets au niveau cellulaire ou sous-cellulaire qu'en la prévision des effets à l'échelle régionale ou internationale. Lors de la prévision des effets futurs de l'ozone, il était toutefois devenu de plus en plus important de les examiner dans le contexte du changement climatique mondial plutôt qu'isolément.
2. On a observé que les niveaux actuels de l'ozone troposphérique étaient responsables de l'endommagement des cultures, des arbres et de la végétation naturelle ou semi-naturelle. La recherche, s'appuyant sur les effets, a permis d'établir des niveaux critiques d'ozone pour la végétation. À l'origine, ces niveaux étaient obtenus à partir de la concentration d'ozone dans l'atmosphère. Il était néanmoins admis depuis longtemps que les réactions des végétaux à l'ozone étaient plutôt liées à la dose d'ozone absorbée ou au flux instantané d'ozone à travers les stomates. Récemment, en se fondant sur le flux stomatique, on a défini des niveaux critiques d'ozone pour certaines espèces cultivées et, provisoirement, pour les arbres (PIC-Modélisation et cartographie, 2004), compte tenu de l'influence variable sur l'absorption d'ozone de la

température, du déficit de pression de vapeur (DPV) d'eau, de la lumière, du potentiel hydrique du sol (PHS), de la concentration d'ozone atmosphérique et du développement de la plante (phénologie). Ainsi définis, ils ont permis de comprendre les effets dans le contexte du changement climatique, puisque des facteurs comme le taux élevé de dioxyde de carbone (CO_2), la température ou les modifications des précipitations affectaient le flux stomatique d'ozone dans les feuilles par leurs effets directs ou indirects sur la conductance stomatique (g_s). Contrairement à l'approche fondée sur la concentration, les principes de l'approche fondée sur le flux permettaient d'intégrer dans les évaluations des niveaux critiques les facteurs responsables du changement climatique. Il était important de comprendre que de tels facteurs, parmi d'autres, pouvaient non seulement agir comme «modificateurs des doses» mais aussi influencer la capacité de détoxification de la plante.

3. Les scénarios d'émission utilisés par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) prévoyaient à l'échelle mondiale qu'à la fin du XXI^e siècle la concentration moyenne d'ozone troposphérique de fond serait modifiée de - 2 à + 62%, que la température moyenne augmenterait de 1,4 à 5,8 °C, que la concentration de dioxyde de carbone (CO_2) augmenterait de 540 à 970 parties par million (ppm), que la configuration des précipitations de par le monde serait altérée et que la fréquence des événements extrêmes augmenterait. Vingarzan (2004) a prédit, en employant différents scénarios du GIEC, que les concentrations moyennes futures d'ozone troposphérique de fond à l'échelle mondiale seraient comprises entre 40 et 80 parties par milliard (ppb). On a observé qu'en Europe les concentrations moyennes d'ozone de la basse atmosphère augmentaient tandis que les concentrations de pointe diminuaient. À l'avenir, les concentrations de pointe d'ozone diminueraient probablement encore avec la mise en application du Protocole de Göteborg, mais cette question devrait être examinée dans le contexte d'une augmentation de la concentration de fond à l'échelle mondiale.

4. Les effets globaux du réchauffement sur le flux d'ozone au niveau du couvert végétal étaient difficiles à prévoir et dépendaient, par exemple, de l'emplacement de la végétation, de l'ampleur et du rythme du réchauffement, ainsi que de ses effets sur le PHS et sur la phénologie des plantes (y compris la période de croissance, le développement du couvert végétal et l'indice foliaire). Les espèces végétales avaient souvent un intervalle de températures optimales pour la g_s (PIC-Modélisation et cartographie, 2004) et pouvaient, en fonction des conditions locales environnementales, s'acclimater au réchauffement dans cet intervalle. Le réchauffement pouvait favoriser un développement végétal précoce et accru, conduisant à un avancement dans l'année de la période pendant laquelle les plantes absorbaient de l'ozone. Cela pouvait entraîner une modification du flux stomatique d'ozone si les concentrations de pointe d'ozone, actuellement liées au plein été, coïncidaient avec un stade plus avancé du développement des plantes. Peu de données expérimentales, recueillies en particulier sur le terrain, étaient disponibles sur les effets cumulés de l'ozone et du réchauffement sur la végétation.

5. De nombreuses études ont montré que l'enrichissement en dioxyde de carbone atmosphérique réduisait la g_s . Bien qu'il ait été proposé que la g_s puisse s'acclimater à l'exposition de longue durée à un taux élevé de dioxyde de carbone, cette hypothèse n'a pu être étayée par des preuves convaincantes. En raison de cela, lorsque les plantes étaient exposées à l'ozone en présence d'un taux élevé de dioxyde de carbone, l'absorption de l'ozone diminuait souvent. En général, un taux élevé de dioxyde de carbone atténuait les sollicitations induites par l'ozone tandis qu'un taux élevé d'ozone atténuait ou modérait les réactions induites par un taux

élevé de dioxyde de carbone, parce que les taux élevés de dioxyde de carbone et d'ozone avaient des effets inverses sur la végétation (Fuhrer, 2003; Karnosky *et al.*, 2003).

6. Les effets des changements dans la configuration des précipitations étaient susceptibles de se manifester sous la forme a) d'effets du DPV sur la g_s , l'augmentation du DPV causant une diminution du flux et b) de modifications du PHS, la diminution du PHS conduisant à une diminution du flux stomatique (PIC-Modélisation et cartographie, 2004).

I. ÉTUDE D'UNE MODÉLISATION POUR LE BLÉ D'HIVER

7. Une étude de modélisation pour le blé d'hiver a été menée (*Triticum aestivum*). Le Programme concerté de surveillance continue et d'évaluation du transport à longue distance des polluants atmosphériques en Europe/Centre de synthèse météorologique Ouest (EMEP/CSM-O) a fourni pour l'année 1997 les concentrations horaires d'ozone pendant un an à une altitude de 50 m et à la hauteur du couvert végétal (à savoir 1 m) ainsi que les données météorologiques proches de la surface du couvert végétal, pour cinq mailles EMEP données. Celles-ci correspondaient aux cinq zones climatiques en Europe, telles qu'elles étaient décrites dans le *Manuel de cartographie* intitulé «*Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, risks and trends*» (PIC-Modélisation et cartographie, 2004). Le modèle de flux stomatique décrit dans le *Manuel de cartographie*, fondé sur la composante stomatique du modèle de dépôt d'ozone et de modification stomatique (DO₃SE) (Emberson *et al.*, 2006), a été utilisé pour calculer le flux stomatique d'ozone accumulé, supérieur au seuil de 6 nmol par mètre carré de surface foliaire projetée (SFP) par seconde (FA_{st6}), pour le blé d'hiver. L'élément central du modèle de flux foliaire d'ozone était l'algorithme multiplicatif permettant d'obtenir la conductance stomatique (g_{sto}):

$$g_{sto} = g_{max} * [\min(f_{phén}, f_{O_3}) * f_{lum} * \max\{f_{min}, (f_{temp} * f_{DPV} * f_{PHS})\}]$$

où g_{sto} était la conductance stomatique observée (mmol O₃ m⁻² SFP s⁻¹) et g_{max} était la conductance stomatique maximale propre à l'espèce (mmol O₃ m⁻² SFP s⁻¹). Les paramètres $f_{phén}$, f_{O_3} , f_{lum} , f_{min} , f_{temp} , f_{DPV} et f_{PHS} étaient tous des grandeurs relatives exprimées en fraction de g_{max} (c'est-à-dire comprises entre 0 et 1). Ces paramètres permettaient de modifier l'influence de la phénologie (phén) et de l'ozone ainsi que de quatre variables environnementales (lumière (éclairage), température, déficit de pression de vapeur (DPV) atmosphérique et potentiel hydrique du sol (PHS)) sur la conductance stomatique à évaluer. Une simple modélisation de type «bilan hydrique» a été employée pour évaluer le déficit en humidité du sol (DHS). Cette méthode employait l'évaluation au moyen de modèles multiplicatifs de la g_{sto} du couvert végétal, liée au déficit hydrique atmosphérique, pour évaluer la transpiration effective du couvert végétal. Ainsi, on obtenait une modélisation cohérente de l'accumulation du DHS, du PHS résultant et des effets sur la g_{sto} (déterminés en fonction des espèces ou du paramètre f_{SWP} propre au type de couvert végétal, en fonction du type de sol et en fonction de la profondeur des racines).

8. Les simulations dans le modèle stomatique DO₃SE ont été effectuées avec, en entrée, le taux d'ozone et les données météorologiques, tant actuels (1997) que dans le contexte du changement climatique. Pour les simulations liées au changement climatique, les données en entrée de l'année 1997 ont été modifiées comme indiqué dans le tableau 1, notamment à l'aide d'une augmentation de la concentration d'ozone (CC + O₃) et sans augmentation (CC), afin de

mesurer les effets sur le flux stomatique d'ozone attribuables au climat, indépendamment de ceux qui résultaient d'une modification de la concentration d'ozone. Le scénario climatique utilisé prenait en compte la moyenne des modifications à l'échelle mondiale, prévue pour la fin du XXI^e siècle. On a incorporé dans le modèle DO₃SE les effets d'un taux élevé de dioxyde de carbone sur la conductance stomatique en multipliant g_{\max} par un facteur 0,65, sur la base de la diminution mesurée de g_{\max} lors d'une étude sur l'enrichissement de l'air libre en dioxyde de carbone (FACE). Cette étude concernait le blé de printemps, pour lequel les concentrations de dioxyde de carbone avaient été augmentées jusqu'à 550 ppm. Quant aux précipitations, aucune modification n'a été apportée, à l'exception de petites augmentations (10 %) de la quantité horaire des précipitations, en fonction de la zone climatique, mais la fréquence est restée inchangée. On a modifié le DPV en supposant une humidité absolue constante et une augmentation de la température de 3 °C. Comme cette estimation de la modification du DPV était peu sûre et que certaines prévisions de modèles suggéraient que les concentrations de vapeur d'eau augmentent, on a effectué les deux simulations suivantes: a) sans modifier le DPV et b) en modifiant le DPV (cas indiqué par la mention (DPV)). Il aurait été possible d'utiliser des scénarios plus spécifiques et plus localisés de changement climatique dans ces simulations, mais en raison des incertitudes des prévisions régionales, il a été décidé d'appliquer les mêmes changements en différents endroits en Europe et de comparer les effets de ceux-ci seulement.

Tableau 1. Modifications des données météorologiques actuelles (1997) en journée et de la concentration d'ozone, en entrée, destinées à tenir compte du changement climatique.

Paramètre	Changement climatique (CC)	Changement climatique + augmentation d'O ₃ (CC + O ₃)
[O ₃] (ppb)	Pas de modification de la concentration d'O ₃	Augmentation de la concentration d'O ₃ de 5 ppb à toutes les heures de la journée
Température (°C)	+ 3 °C	+ 3 °C
Effet du CO ₂ sur la g_s	$g_{\max} * 0,65$	$g_{\max} * 0,65$
Précipitation (P) (mm) ^a	Si P > 0, augmenter P de 10 % en Europe septentrionale et centrale	Si P > 0, augmenter P de 10 % en Europe septentrionale et centrale
DPV (kPa)	Supposer que l'humidité absolue reste constante, calculer DPV en fonction d'une augmentation de la température de 3 °C	Supposer que l'humidité absolue reste constante, calculer DPV en fonction d'une augmentation de la température de 3 °C

^a Seules étaient modifiées les précipitations horaires, de sorte que la magnitude, et non la fréquence des précipitations, était augmentée.

9. Outre la prévision des modifications du FA_{st6}, on a évalué la concentration d'ozone accumulé supérieure au seuil de 40 ppb pendant la journée (AOT40) au moyen de fenêtres d'accumulation propres au climat, non modifiées pour le changement climatique, qui étaient décrites dans le *Manuel de cartographie*. L'AOT40 futur, à la hauteur du couvert végétal, a aussi

été évalué à partir des concentrations d'ozone à cette hauteur. Celles-ci ont été déduites des données sur la concentration d'ozone à une hauteur de 50 m, et augmentées de 5 ppb soit a) en ajoutant simplement 5 ppb à la concentration d'ozone obtenue par l'EMEP à la hauteur du couvert végétal, soit b) en évaluant les concentrations d'ozone au niveau du couvert végétal à l'aide de la méthode de l'équilibre indifférent, décrite dans le *Manuel de cartographie*. Cela a permis d'incorporer dans l'évaluation du profil de la concentration d'ozone les valeurs g_s au niveau du couvert végétal dans le contexte du changement climatique et donc de déterminer l'effet que le changement climatique pourrait avoir sur l'AOT40 à travers les modifications du dépôt d'ozone sur les surfaces recouvertes de végétation.

II. RÉSULTATS DE L'ÉTUDE DE MODÉLISATION

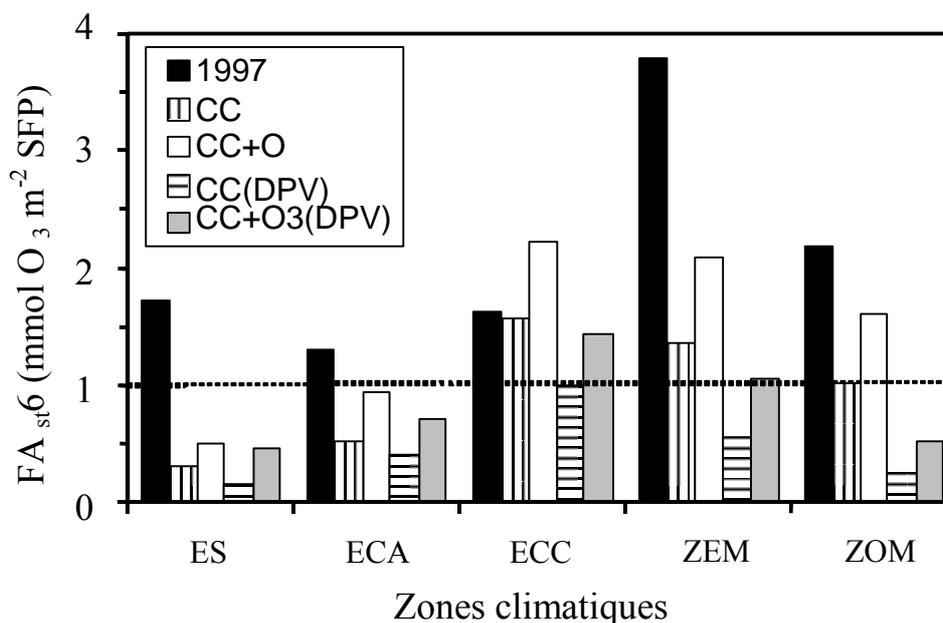


Figure 1. Modélisation du flux stomatique d'ozone accumulé, supérieur au seuil de $6 \text{ nmol m}^{-2} \text{ SFP s}^{-1}$ (FA_{st6}), pour le blé d'hiver, dans cinq zones climatiques différentes d'Europe, pour l'année de référence 1997 et pour un climat futur, au moyen des scénarios de changement climatique (voir le texte), décrits dans le tableau 1. La ligne en pointillé indique le niveau critique d'ozone, fondé sur le flux, pour le blé ($FA_{st6} = 1 \text{ mmol m}^{-2} \text{ SFP}$). Les abréviations suivantes ont été employées pour les zones climatiques: ES = Europe septentrionale, ECA = Europe centrale atlantique, ECC = Europe centrale continentale, ZEM = Zone est-méditerranéenne, ZOM = Zone ouest-méditerranéenne.

10. Avant d'interpréter les résultats pour les cinq zones climatiques en Europe, il convenait de noter que les simulations avaient été effectuées pour une seule maille EMEP donnée dans chacune des zones. Les scénarios de changement climatique («CC») ont fait apparaître une diminution du FA_{st6} pour le blé d'hiver (malgré une augmentation de la concentration d'ozone troposphérique de fond («CC + O₃»)) dans la plus grande partie de l'Europe, mais pas en Europe centrale continentale (fig. 1). Dans le modèle, une augmentation du DPV entraînait une diminution importante du FA_{st6} pour le blé d'hiver. Ceci était dû aux effets directs de réduction de la g_s , mais était aussi lié aux effets du DPV sur la valeur du DHS. Le DHS était le responsable

clef de la réduction du flux, lors des simulations dans les conditions actuelles (1997) et des simulations «CC + O₃ (DPV)», en Europe septentrionale et dans la zone ouest-méditerranéenne. Le DHS élevé en Europe septentrionale résultait de DPV élevés (plus élevés que dans d'autres parties de l'Europe, en raison de la saison de croissance tardive, malgré une augmentation de la température de 3 °C), qui étaient la cause du passage rapide de l'eau à travers la plante, du sol dans l'atmosphère, passage subsistant malgré les 10 % d'augmentation des précipitations. Pour la zone ouest-méditerranéenne, les DPV plus élevés conduisaient aussi à un DHS plus élevé. L'Europe centrale continentale connaissait quant à elle une réduction du DHS dans les conditions actuelles mais pas dans les conditions climatiques futures, état de choses principalement dû à l'avancement de la période de croissance dans l'année, qui dès lors coïncidait avec des précipitations plus fortes. Ceci expliquait pourquoi le FA_{st6} pour le blé d'hiver ne diminuait pas en Europe centrale continentale, dans le cas du scénario «CC», par rapport à sa valeur dans les conditions actuelles (1997). Les simulations sans changement dans les précipitations pour l'Europe septentrionale et l'Europe centrale n'ont fourni que des résultats très légèrement modifiés. L'emploi de la méthode du temps thermique pour évaluer le temps de la demi-anthèse ainsi que le début et la fin de la saison de croissance indiquait qu'avec le réchauffement mondial la période de croissance et d'accumulation débutait et s'achevait plus tôt partout (Harmens *et al.*, 2006).

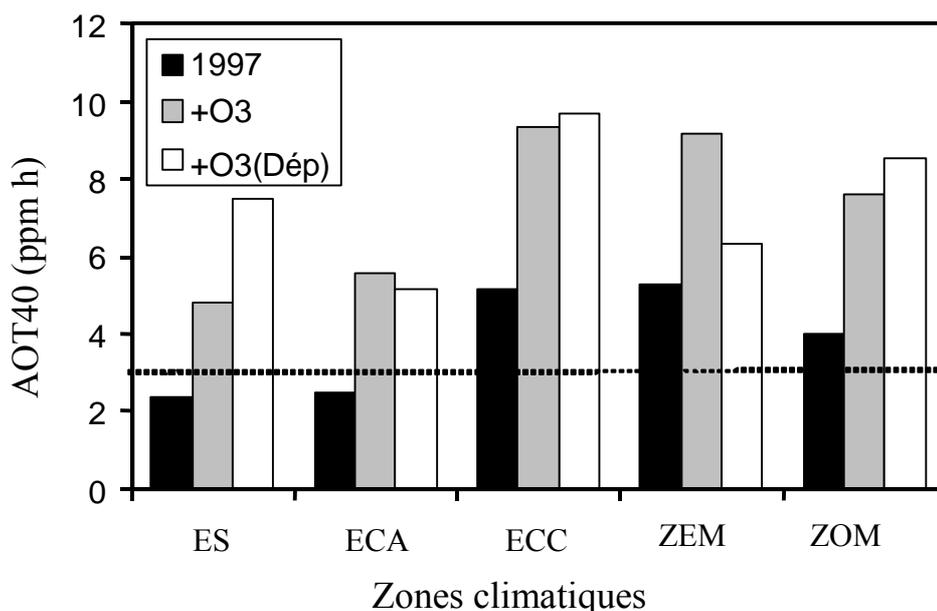


Figure 2. Effets du changement climatique (scénario «CC + O₃ (DPV)»; voir le tableau 1), par rapport au climat actuel (1997), sur le paramètre f_{PHS} pour le blé d'hiver dans cinq zones climatiques différentes en Europe (voir la figure 1 pour les détails). N'ont pas été indiquées les données pour les zones climatiques pour lesquelles $f_{PHS} = 1$ tout au long de l'année.

11. En général, le dépôt total d'ozone dans le climat futur diminuait en raison de la diminution du flux stomatique (qui entraînait aussi une diminution du flux dans les feuilles au sommet du couvert végétal et des valeurs plus faibles pour le FA_{st6}, indiquées dans la figure 1), impliquant que moins d'ozone passait de l'atmosphère dans la végétation. Cette diminution du flux

stomatique et donc du dépôt total conduisait à des concentrations atmosphériques d'ozone plus élevées, qui à leur tour étaient susceptibles de conduire à des AOT40 plus élevés. La figure 2 indique qu'une telle situation existe en Europe septentrionale, en Europe centrale continentale et dans la zone ouest-méditerranéenne. Toutefois, en Europe centrale atlantique et dans la zone est-méditerranéenne, ce n'était pas le cas, parce que les périodes d'accumulation (AOT40) plus précoces préconisées pour ces zones climatiques coïncidaient avec des périodes pendant lesquelles le dépôt dans le contexte du changement climatique était plus élevé que le dépôt actuel. La raison en était que la période de croissance plus précoce du blé dans le contexte du changement climatique (évaluée au moyen du modèle de temps thermique) avait lieu dans des conditions moins contraignantes pour la g_s (c'est-à-dire à des températures et des DPV inférieurs).

III. ANALYSE GÉNÉRALE

12. À partir de l'étude de modélisation pour le blé d'hiver, deux conclusions différentes, dans le contexte du changement climatique, ont pu être dégagées, selon la méthode d'évaluation des risques employée: a) l'approche fondée sur le flux prévoyait pour le blé d'hiver, dans la plupart des zones d'Europe, une diminution de la dose d'ozone absorbée dans le contexte du changement climatique, résultant en un dépassement moindre du niveau critique fondé sur le flux; b) l'approche fondée sur la concentration prévoyait un dépassement considérablement accru du niveau critique fondé sur la concentration, dans les conditions climatiques futures. Ces tendances étaient généralement observées dans diverses zones climatiques en Europe, malgré le fait que la modélisation n'ait été appliquée qu'à une maille par zone climatique. Dans le cas de l'approche fondée sur la concentration, la simple modélisation effectuée ici indiquait qu'un tel dépassement pourrait être accru en certains endroits en raison de l'effet du dépôt réduit d'ozone sur les surfaces recouvertes de végétation. Il n'était toutefois pas tenu compte de l'augmentation de l'indice foliaire, qui pouvait se produire pour certaines espèces dans le contexte du changement climatique et réduirait certainement les diminutions estimées du dépôt sur la surface recouverte de végétation.

13. Les simulations étaient fondées sur des hypothèses simples, relatives aux éventuels changements climatiques et à l'exposition possible à l'ozone en Europe au cours des prochaines décennies. Elles n'avaient pas pour but de prédire les divers effets dans les différentes régions. Néanmoins, l'utilisation du modèle aux différents endroits a révélé des différences importantes quant à la réaction, qui ont permis de mieux comprendre les effets des facteurs clés dans la modification du flux stomatique d'ozone dans le contexte du changement climatique. Il aurait pu être tenu compte d'un certain nombre d'autres facteurs. On aurait pu, par exemple, modifier de plusieurs manières les conditions d'exposition à l'ozone dans le contexte du changement climatique. Les augmentations d'ozone troposphérique de fond auraient pu ne pas être constantes tout au long de l'année, alors que les pics d'ozone troposphérique de fond se produisaient au printemps plutôt qu'en plein été; les avantages d'un début précoce de la saison de croissance en auraient été réduits. Des températures à la surface plus élevées auraient aussi pu conduire à une augmentation des émissions de composés organiques volatils (COV) biogènes et, en conséquence, à une production régionale d'ozone plus grande. Ces facteurs et d'autres encore nous incitent à incorporer un modèle de dépôt et de flux dans les modèles de chimie de l'atmosphère et dans les modèles de transport de manière que les effets combinés du climat sur la formation d'ozone, sur son transport et sur son dépôt puissent être évalués d'une façon intégrée.

Finalement, les résultats présentés ne concernaient qu'une espèce de culture donnée et ne devraient pas être considérés comme présageant de la réaction des autres espèces.

14. Les effets de l'ozone étudiés séparément ont été employés pour établir des relations dose-réaction ou flux-effet. Lors de la prévision des effets futurs de l'ozone, il était toutefois devenu de plus en plus important de les examiner dans le contexte du changement climatique mondial. Les réactions de la végétation au changement climatique étaient guidées par les interactions complexes entre les facteurs abiotiques et biotiques, tels que le dioxyde de carbone atmosphérique, la température, la disponibilité des nutriments et de l'eau, les polluants atmosphériques, les caractéristiques du sol, la gestion et l'utilisation des terres et la composition ou la diversité des espèces, et étaient difficiles à prévoir. Les réactions de la végétation à chacun des facteurs responsables du changement climatique (y compris les modifications des concentrations d'ozone troposphérique) ne pouvaient pas simplement être extrapolées pour obtenir les réactions à des facteurs multiples. Il fallait à l'évidence disposer d'une approche combinant les expériences où intervenaient de multiples facteurs et un modèle afin d'améliorer les prévisions des effets à long terme du changement climatique sur les végétaux. Un taux d'ozone supérieur à la normale, à des concentrations relativement faibles, pourrait freiner sensiblement l'accélération de la croissance, due au taux élevé de dioxyde de carbone, et donc réduire le piégeage du carbone. Cela pourrait vouloir dire que les stimulations de la croissance à l'échelle mondiale ne seraient pas aussi grandes que prévu par les précédents modèles et études expérimentales, où il n'était tenu compte que d'un taux élevé de dioxyde de carbone (et non du taux élevé d'ozone en tant que facteur associé). En conséquence, il était aussi important d'arriver à comprendre que l'ozone avait des effets modérateurs sur les réactions au changement climatique dans les modèles à l'échelle mondiale de productivité terrestre primaire nette et de piégeage du carbone.

15. Plus d'informations étaient nécessaires concernant les réactions des végétaux à l'ozone dans le contexte du changement climatique, parce que la compétition entre les espèces était susceptible d'influer sur les effets de l'ozone et du changement climatique sur chacune des espèces. Le changement climatique était aussi susceptible d'influencer la relation temporelle et spatiale entre les espèces interagissant à des niveaux troposphériques différents (par exemple, les relations plante-insecte et plante-maladie) (Fuhrer, 2003; Karnosky *et al.*, 2003).

IV. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

16. Contrairement à l'approche fondée sur la concentration, les principes de l'approche fondée sur le flux permettaient d'incorporer certains facteurs clefs responsables du changement climatique dans les évaluations des niveaux critiques d'ozone pour la végétation. Les résultats d'une étude de cas pour le blé d'hiver indiquaient que dans un climat futur le dépassement du niveau critique d'ozone en ce qui concernait le flux pourrait être moindre en Europe, même lorsqu'il était tenu compte d'une augmentation de la concentration d'ozone troposphérique. À l'opposé, le dépassement du niveau critique d'ozone en ce qui concernait la concentration pourrait augmenter en raison tant des augmentations de la concentration d'ozone troposphérique de fond, causées par les activités humaines, que des modifications du bilan massique de l'ozone à la suite de taux réduits de dépôt d'ozone.

17. Les facteurs responsables du changement climatique devaient complètement être incorporés dans l'évaluation des risques de l'ozone. Il devait être tenu compte des effets du changement climatique lors de la prévision des effets futurs de l'ozone sur la végétation (et vice versa).

18. Il fallait à l'évidence effectuer des expériences sur le terrain, mettant en jeu des facteurs multiples, pour être en mesure de fournir de meilleures informations relatives à la modélisation des effets liés au flux d'ozone, dans le contexte du climat actuel et du climat futur. Le modèle DO₃SE était un outil utile de prévision du flux stomatique d'ozone, mais les expériences sur le terrain où intervenaient de multiples facteurs étaient nécessaires pour améliorer la paramétrisation dans le contexte du climat actuel et du climat futur.

RÉFÉRENCES

ICP Modelling and Mapping. 2004. Mapping critical levels for vegetation (ed. G. Mills). In: Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, risks and trends. <http://www.icpmapping.org/>.

Fuhrer J. 2003. Agroecosystem responses to combinations of elevated CO₂, ozone, and global climate change. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 97: 1–20.

Harmens H, Mills G, Emberson L and Ashmore M. 2006. Implications of climate change for the stomatal flux of ozone. *Environmental Pollution* (submitted manuscript).

Karnosky DF, Zak DR, Pregitzer KS, Awmack CS, Bockheim JG, Dickson RE, Hendrey GR, Host GE, King JS, Kopper BJ, Kruger EL, Kubiske ME, Lindroth RL, Mattson WJ, McDonald EP, Noormets A, Oksanen E, Parsons WFJ, Percy KE, Podila GK, Riemenschneider DE, Sharma P, Thakur R, Sober A, Sober J, Jones WS, Anttonen S, Vapaavuori E, Mankovska B, Heilman W and Isebrands JG. 2003. Tropospheric O₃ moderates responses of temperate hardwood forests to elevated CO₂: a synthesis of molecular to ecosystem results from the Aspen FACE project. *Functional Ecology* 17: 289–304.

Vingarzan R. 2004. A review of surface ozone background levels and trends. *Atmospheric Environment* 38: 3431–3442.

Note: Les références sont reproduites telles qu'elles ont été reçues par le secrétariat.
