



**Conseil Économique  
et Social**

Distr.  
GÉNÉRALE

EB.AIR/WG.1/1999/8  
8 juin 1999

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  
(Dix-huitième session, Genève, 25-27 août 1999)  
Point 5 d) de l'ordre du jour provisoire

PROGRÈS DES TRAVAUX DE MODÉLISATION ET DE CARTOGRAPHIE  
(DEGRÉ II) DES TAUX D'OZONE POUR LES CULTURES  
ET LA VÉGÉTATION NATURELLE

Rapport succinct du Centre de coordination du Programme international  
concerté relatif aux effets de la pollution atmosphérique  
et d'autres phénomènes perturbateurs sur les cultures  
et les végétaux non ligneux (PIC-Végétation)

I. INTRODUCTION

1. Le niveau critique de degré I pour l'ozone déterminé sur la base de l'indice AOT40 est considéré comme une condition minimale pour la cartographie des dépassements (UBA, 1996). Les facteurs locaux, tels que espèces cultivées et cultivars, stade phénologique, déficit en humidité du sol, présence simultanée avec d'autres polluants et facteurs climatiques (déficit de pression de vapeur et vitesse du vent) devraient être pris en compte lors

Les documents établis sous les auspices ou à la demande de l'Organe exécutif de la Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance aux fins d'une distribution GÉNÉRALE doivent être considérés comme provisoires tant qu'ils n'ont pas été APPROUVÉS par l'Organe exécutif.

du calcul des niveaux critiques d'ozone par site. Au moment de l'Atelier de Kuopio, toutefois, on disposait de données insuffisantes pour pouvoir inclure des facteurs de degré II dans la définition révisée du niveau critique à long terme. C'est pourquoi l'on a fixé le niveau critique (degré I) à une AOT40 de 3 000 ppb.h accumulée pendant les heures diurnes ( $> 50 \text{ Wm}^{-2}$ ) sur trois mois, l'AOT40 étant la somme des concentrations moyennes horaire au-dessus de 40 ppb (UBA, 1996).

2. Cette année, les travaux du PIC-Végétation ont été en grande partie axés sur l'analyse des données et l'élaboration de modèles devant être utilisés à l'Atelier sur les niveaux critiques pour l'ozone (degré II) tenu récemment (Gerzensee, Suisse, 11-15 avril 1999). L'Atelier a examiné les progrès accomplis depuis l'Atelier de Kuopio; l'objectif était d'évaluer divers instruments de modélisation et d'examiner quels principes directeurs techniques pourraient être inclus dans le manuel sur la cartographie (voir le document EB.AIR/WG.1/1999/12). Les progrès accomplis par les travaux du PIC-Végétation et la contribution apportée par celui-ci à l'Atelier sur les niveaux critiques seront examinés dans ce rapport.

## II. ÉLABORATION D'UN MODÈLE DU DEGRÉ II À PARTIR DES DONNÉES DU PIC-VÉGÉTATION SUR DES CLONES DE TRÈFLE BLANC

3. Le réseau du PIC-Végétation s'étend sur plus de 15 pays européens plus les États-Unis d'Amérique, et il compte actuellement 35 sites d'essai. Au cours de ces dernières années, les participants à ce réseau ont exécuté une expérience sur des clones de trèfle blanc (*Trifolium repens* L.), l'un résistant à l'ozone (NC-R), l'autre sensible à l'ozone (NC-S), sélectionnés à l'origine par Heagle et al. (1994) en un site à faible taux de  $\text{NO}_x$  situé en Caroline du Nord, aux États-Unis. En comparant le rapport de biomasse des deux clones, on a pu évaluer l'impact du taux d'ozone ambiant sur les sites d'essai du réseau PIC. Un sous-ensemble des données provenant de 13 sites où les niveaux de  $\text{O}_3$  et  $\text{NO}_x$  sont régulièrement mesurés (voir le tableau 1) a été utilisé pour déterminer l'importance relative des facteurs modificateurs (degré II) sur la relation dose-réponse pour le trèfle.

4. Les données utilisées dans cette analyse avaient été recueillies lors d'essais sur des clones de trèfle exécutés par le réseau PIC-Végétation entre 1995 et 1998. Vingt échantillons de chaque clone provenant d'une source normalisée étaient fournis aux participants. Après un séjour de croissance en serre de 28 jours, les clones étaient transférés dans des pots individuels de 15 l et placés en plein air sur le site d'essai (pour plus de détails, voir les documents de la CEE/ONU de 1998). Les clones étaient alors récoltés tous les 28 jours par enlèvement de tout le feuillage et des tiges jusqu'à une hauteur de 7 cm au-dessus du sol. Quatre ou cinq récoltes étaient effectuées sur chaque site; les données de la première récolte étaient rejetées. Les données du réseau PIC-Végétation ont été analysées comme décrit ci-après au moyen des logiciels Excel, Minitab et Neuroshell2.

5. Pour chaque année et chaque site, les participants ont envoyé un tableau sur Excel des mesures horaires de température (T), de déficit de pression de vapeur (DPV), de rayonnement solaire, d'ozone, de dioxyde de soufre et d'oxyde d'azote pour la période d'essai (juin à septembre). Avant de juger les analyses comme suffisamment fiables pour servir à l'élaboration de modèles

précis, il était exécuté une évaluation en deux étapes de la qualité des données. Dans une première étape, les données étaient rejetées si l'on comptait plus de deux jours consécutifs par intervalle de 28 jours entre récolte pour lesquelles des données sur les polluants ou données climatiques manquaient. Dans la seconde étape, les données de biomasse étaient rejetées si l'un ou l'autre, ou les deux types de clones, avaient présenté un rythme de croissance anormalement lent à la fois à la première et à la deuxième récolte, ou encore avaient souffert d'attaques de parasites ou de maladies.

6. Une représentation initiale graphique de la relation entre l'AOT40 et le rapport de biomasse NC-S/NC-R pour cet ensemble de données a révélé qu'il était impossible d'adapter une relation linéaire, que ce soit aux données sur 28 jours ( $r^2=0,298$ , figure 1) ou au rapport de biomasse cumulé pour trois mois ( $r^2=0,325$ , fig. 2). Les données sur 28 jours ont été retenues pour analyse ultérieure parce que l'on disposait ainsi d'un plus grand nombre de points de données et que l'intervalle de temps plus court offrait une résolution accrue pour l'étude des effets des facteurs de degré II.

7. L'influence de plusieurs facteurs modificateurs éventuels sur la réponse à l'ozone a été examinée. Les premières tentatives pour identifier des groupes au sein des données au moyen d'analyses par grappe ou d'analyses par réseaux neuronaux Kohonen n'ont pas abouti à cause de l'étendue restreinte présentée par certains des paramètres d'entrée (tableau 1). Toutefois, il s'est dégagé un schéma lorsque les données ont été séparées en fonction de l'intervalle de récolte (fig. 1); dans ce cas, le clone NC-S apparaissait comme plus sensible à l'ozone à la quatrième récolte qu'à la deuxième récolte ( $p=0,024$ ). D'autres groupes sont apparus lorsque les sites ont été subdivisés en sites à influence urbaine et sites en zone rurale (données non présentées). Dans ce cas, les plantes ayant poussé sur des sites urbains se montraient plus sensibles que celles ayant poussé sur des sites ruraux ( $p<0,001$ ).

8. Afin de déterminer quels facteurs avaient la plus grande influence sur la relation dose-réponse, on a utilisé des techniques d'analyse multivariées telles que l'utilisation des réseaux de neurones artificiels (RNA) et la régression linéaire multiple. Tout d'abord un modèle RNA utilisant 21 paramètres (par exemple, moyenne de  $\text{NO}_2$  sur 24 h, moyenne diurne de la température, etc.) comme paramètres d'entrée a subi un apprentissage par la méthode décrite par Ball et al. (1998). Le nombre de facteurs d'entrée du modèle a été réduit, tout d'abord par un classement en ordre d'importance relative en fonction des facteurs de pondération du modèle RNA, puis par établissement d'une matrice de corrélation linéaire pour tous les paramètres d'entrée. Sept de ceux-ci (valeurs maximales journalières moyennes de la concentration d'ozone et de la température, valeur moyenne d' $\text{O}_3$  sur 7 h, valeurs moyennes diurnes de  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  et DPV) ont été exclus de l'analyse ultérieure parce que chacun d'eux représentait le facteur le moins bien classé d'une paire de facteurs corrélés (valeur  $r^2>0,9$ ). Avec un modèle RNA optimisé élaboré à partir des paramètres restants, on a obtenu un  $r^2$  de 0,66 pour les données d'apprentissage (75 % de la base de données) et 0,47 pour les données de contrôle non encore examinées (25 % de la base de données). L'application de la régression linéaire multiple a donné un modèle offrant une valeur supérieure de  $r^2$  pour les données d'apprentissage (0,75), mais dont l'application aux données non encore examinées a été peu satisfaisante ( $r^2=0,10$ ).

9. La structure du réseau de neurones a été optimisée de manière itérative par élimination du paramètre le plus faible, puis réexécution du processus d'apprentissage jusqu'à ce qu'il ne soit plus observé d'amélioration des résultats. Par cette approche, on a abouti à un modèle RNA utilisant l'AOT40,  $O_3$  24h,  $T_{diurne}$  et  $NO_{1700h}$ ; ce modèle donnait les meilleurs résultats ( $r^2=0,78$  et  $0,67$  respectivement pour les données d'apprentissage et les données de contrôle) et a été retenu pour études ultérieures. Chacun des paramètres d'entrée restants a été successivement ajouté au modèle jusqu'à ce que l'on obtienne la structure la plus efficace. Ce processus a été répété trois fois. En tout plus de 200 combinaisons différentes de paramètres d'entrée ont été essayées. Le modèle le plus performant avait pour paramètres d'entrée l'AOT40,  $O_3$  24h,  $NO_{1700h}$ ,  $T_{diurne}$  et  $T_{24h}$ , et offrait une valeur  $r^2$  de  $0,84$  pour les données d'apprentissage et  $0,71$  pour les données de contrôle. L'addition du DPV ou de l'intervalle de récolte réduisait les résultats à  $0,77$  et  $0,61$  respectivement pour les premières et à  $0,69$  et  $0,44$  respectivement pour les secondes. Tous les modèles RNA ont donné de meilleurs résultats pour les données d'apprentissage que les modèles obtenus par régression linéaire multiple ( $r^2=0,42-0,75$ ) et des résultats bien meilleurs pour les données de contrôle non encore examinées, pour lesquelles les valeurs  $r^2$  obtenues par régression linéaire multiple variaient entre  $0,07$  et  $0,20$ .

10. Le modèle RNA donnant les meilleurs résultats a été utilisé pour établir un modèle prédictif destiné à faire apparaître l'influence des paramètres d'entrée individuels sur la courbe de réponse de l'AOT40. Ainsi par exemple, le modèle prédisait que le trèfle deviendrait plus sensible à l'ozone à des valeurs plus élevées de  $T_{diurne}$  (fig. 3). En résumé, l'AOT40,  $O_3$  24h et  $NO_{1700h}$  étaient des paramètres d'entrée qui semblaient fournir au modèle des informations au modèle sur la dynamique de l'exposition d'ozone, alors que la température semblait avoir un effet modificateur sur la réponse à l'ozone. Par contre, le fait d'inclure le DPV, les paramètres relatifs au  $NO_x$  et l'intervalle de récolte dans le modèle RNA dégradait l'ajustement aux données dans une marge de 7 à 23 %.

11. À l'aide de méthodes élaborées au Centre de modélisation des données du PIC-Végétation (Roadknight et al., 1997) on a extrait des facteurs de pondération du réseau RNA une équation empirique en vue de relier les divers paramètres d'entrée du modèle au rapport de biomasse. Cette équation donnait de moins bons résultats que le modèle RNA, avec une valeur  $r^2$  pour la relation entre la réponse réelle et la réponse prédite de  $0,67$ , comparée à  $0,84$  pour le modèle RNA. Néanmoins, l'équation extraite rend le modèle utilisable par la communauté des spécialistes de la cartographie, car elle peut être introduite dans le Système d'information géographique (GIS) pour établir une carte des rapports de biomasse prédits. M. Posch (Centre de coordination pour les effets (CCE)) a démontré que cette opération était possible avec une équation extraite d'un modèle RNA antérieur comportant comme facteurs l'AOT40, DPV,  $T_{24h}$  et le nombre de jours de pluie (CEE/ONU, 1999). L'inclusion de l'équation du modèle décrit dans l'analyse la plus récente dans un système d'information géographique est actuellement étudiée.

### III. INCORPORATION DES FACTEURS MODIFICATEURS À LA FONCTION DOSE-RÉPONSE POUR LE BLÉ

12. J. Fuhrer (Station de recherche fédérale pour l'agroécologie à l'agriculture (IEL), Suisse) et M. Posch (CCE) ont effectué des études sur la manière dont les facteurs énumérés au paragraphe 1 pourraient être utilisés pour calculer les niveaux critiques par site pour le blé par introduction de fonctions de pondération pour chaque facteur d'intérêt. À partir de ces fonctions, on peut déduire des facteurs d'échelle permettant d'ajuster les valeurs de dépassement de l'AOT40. Pendant l'année, un premier essai a été fait pour utiliser ces "niveaux critiques de degré II" en tenant compte de l'influence de la saison de croissance ainsi que du déficit en humidité du sol (DPV) et de la vitesse du vent sur les niveaux critiques d'ozone pour les cultures à l'échelle européenne.

13. La phénologie a été reconnue comme facteur important du degré II pour le niveau critique à long terme de l'ozone. On l'a prise en compte en centrant la saison de croissance fixée à 90 jours (trois mois) autour du jour de floraison (anthèse). Ce jour est pris comme étant le jour julien où la somme des températures effectives (en degrés-jours de croissance, c'est-à-dire la somme des températures journalières moyennes supérieures à 0 °C) atteint une valeur de 1 150 degrés-jours. Pour cette détermination on a utilisé les données de température au niveau du sol sur 6 h par maille du quadrillage (fournies par l'EMEP-MSW) pour estimer le jour de floraison du blé. Les mailles du quadrillage pour lesquelles des données de température modélisées n'étaient pas disponibles, c'est-à-dire pour lesquelles la saison de croissance commençait avant avril, ont été omises. La carte résultante présentait le gradient nord-sud prévu pour l'ajustement phénologique, auquel s'ajoutait l'influence des zones côtières et zones montagneuses. L'application de l'ajustement phénologique a en conséquence entraîné une modification des dépassements de l'AOT40, principalement dans les régions septentrionales et méridionales.

14. Outre le rôle du facteur date de l'exposition, les effets de l'exposition à l'ozone sur les plantes dépendent de facteurs environnementaux, particulièrement des facteurs qui influent sur la sensibilité des plantes par le biais de la conductivité stomatale. Le déficit en humidité du sol est l'un de ces facteurs. Un facteur modificateur (fDHS) - des données publiées - a été utilisé, et les valeurs critiques de l'AOT40 (calculées pour des sols bien irrigués) ont été remplacées par les valeurs  $AOT40/fDHS$ . Il en est résulté une réduction des dépassements de l'AOT40 dans les endroits où le sol était sec.

15. Les travaux futurs seront consacrés à l'élaboration et à l'utilisation de facteurs d'échelle additionnels pour des cultures particulières. L'objectif est de définir une méthodologie applicable à ces facteurs et d'établir une liste des espèces cultivées importantes contenant des références aux informations disponibles pouvant être utilisées pour le calcul des facteurs de correction.

### IV. PROGRÈS DE L'ÉLABORATION DE MODÈLES DE FLUX POUR LES CULTURES

16. L. Emberson et H. Cambridge (Stockholm Environmental Institute at York, Royaume-Uni) et M. Ashmore (Université de Bradford, Royaume-Uni) ont élaboré

une méthodologie qui permet de calculer l'absorption d'ozone à partir d'une hauteur de référence dans l'atmosphère jusqu'à la cavité substomatale d'une feuille physiologiquement active. Le calcul par cette méthode des doses d'ozone absorbées est possible pour un certain nombre d'espèces européennes importantes, y compris neuf espèces d'arbres forestiers, huit cultures agricoles et un type de végétation semi-naturelle. L'application de cette approche pour l'année 1994 a fait apparaître des variations spatiales et temporelles des doses d'ozone dans toute l'Europe. Des comparaisons avec des cartes d'exposition équivalente à l'ozone (définie au moyen de l'indice AOT40) ont fait apparaître des répartitions spatiales et temporelles très différentes en ce qui concerne les zones dont le calcul indiquait qu'elles présentaient le risque le plus élevé de dommage par l'ozone. Quatre mailles du quadrillage EMEP caractérisées par des régimes d'exposition à l'ozone très différents ont été retenues pour étude ultérieure en vue de mettre en évidence cet effet (tableau 2). Les valeurs modélisées de flux cumulatif pour le blé pour les mailles du quadrillage couvrant le Royaume-Uni et l'Europe centrale étaient très semblables, alors que les valeurs de l'AOT40 pour le Royaume-Uni étaient approximativement de moitié inférieures à celles de l'Europe centrale. Après adoption d'un seuil de flux de  $1,5 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , le flux cumulatif pour le Royaume-Uni est apparu plus élevé que pour l'Europe centrale.

17. Les travaux sur cette approche du flux sont utiles pour l'établissement des valeurs du degré II. Cependant, la réponse des plantes à l'ozone ne dépend pas seulement de l'absorption d'ozone mais aussi de la capacité de la plante à neutraliser les effets toxiques de cette dose d'ozone une fois absorbée. La détermination de réponse spécifique par espèce en fonction du flux représente une méthode permettant de traduire une dose d'ozone donnée en dommage causé. Pour cette détermination toutefois, il sera nécessaire de poursuivre les recherches en vue de déterminer la meilleure méthode de quantification du flux d'ozone.

18. Les concepts utilisés pour modéliser l'absorption stomatale d'ozone peuvent aussi être appliqués à l'amélioration des méthodes de modélisation du dépôt d'ozone, car ils permettent de prendre en compte les facteurs saisonniers, d'utilisation des sols et climatiques dont on sait qu'ils influent sur le dépôt d'ozone sur les surfaces à couvert végétal. On devrait ainsi parvenir à prédire avec plus de précision la perte d'ozone à partir de l'atmosphère, et ainsi à estimer avec plus de précision les concentrations ambiantes d'ozone. Toutefois, les calculs de dépôt sur les surfaces à couvert végétal doivent inclure la perte d'ozone sur les surfaces extérieures ainsi que l'absorption d'ozone par les stomates. On a donc développé le modèle afin d'inclure le dépôt sur les surfaces végétales internes et externes, ainsi que sur les surfaces non couvertes de végétaux (eau, par exemple). On a ainsi pu calculer le dépôt d'ozone pour l'Europe entière. Ce modèle inclut les paramètres pour 21 types de couvert et calcule les moyennes pondérées par surface du dépôt d'ozone dans chaque maille du quadrillage EMEP.

19. La méthode appliquée pour calculer l'absorption d'ozone utilise les valeurs de concentration d'ozone modélisées de l'EMEP. Il faut donc prendre des précautions pour garantir la conformité entre les calculs du dépôt d'ozone sur la surface totale et les estimations de l'absorption d'ozone par les espèces individuelles pour utilisation dans les évaluations de risques.

## V. NIVEAUX CRITIQUES POUR LA VÉGÉTATION NATURELLE

20. La difficulté qu'il y a à prévoir la sensibilité à l'ozone des espèces et communautés de végétation naturelle est généralement admise (Ashmore et Davison, 1996, par exemple). Sur la base des données limitées d'exposition-réponse disponibles, des évaluations des lésions visibles (Bungener et al., article dans la presse) et du taux relatif de croissance (Reiling et Davison, 1992) ont révélé des sensibilités plus ou moins grandes à l'ozone à des valeurs de l'AOT40 semblables aux niveaux critiques fixés pour les cultures agricoles. Pour fixer un niveau critique s'appliquant spécifiquement à la végétation naturelle, il est important d'identifier les taxa les plus sensibles; la difficulté cependant réside dans le choix du critère exprimant le mieux la sensibilité. Ainsi, par exemple, les caractéristiques de croissance, la production de graines, les différences de conductivité stomatale et les caractères physiques de la feuille sont des facteurs qui peuvent tous être à l'origine de variations de la résistance à l'ozone (Davison et Barnes, 1998).

21. Le Centre de modélisation des données du PIC-Végétation a mené des études en collaboration avec L. Emberson et M. Ashmore pour déterminer s'il est possible d'établir des modèles généralisés de la réponse de différentes espèces de végétation naturelle à l'ozone au moyen des modèles RNA. Trois approches ont été suivies pour l'élaboration de ces modèles : l'une fondée sur les caractéristiques écologiques et les stratégies de croissance des espèces, utilisant les classifications d'Ellenberg (1988) et de Grime et al. (1988) (modèles 1 et 2 respectivement), et une autre fondée sur l'identification physiologique au moyen de la relation entre le DPV, la conductivité des feuilles et la réponse de l'espèce en matière de lésions causées par l'ozone (modèle 3). Des données provenant d'expériences sur l'exposition à l'ozone visant à étudier la réponse en biomasse à l'ozone de 42 espèces d'herbacées (source : M. Ashmore et S. Power, Royaume-Uni) ont été utilisées pour l'élaboration des modèles 1 et 2, et des données provenant de l'exposition à l'ozone en enceinte ouverte pour neuf espèces d'herbacées en Suisse ont été utilisées pour l'élaboration du modèle 3 (source : J. Fuhrer, Suisse).

22. Le modèle 1, utilisant comme paramètres d'entrée toutes les valeurs d'Ellenberg, a donné un  $r^2$  de 0,75 pour les données d'apprentissage et 0,34 pour les données de contrôle. On a obtenu les meilleurs résultats en omettant le facteur besoin d'azote de l'espèce, ce qui donnait un  $r^2$  de 0,92 pour les données d'apprentissage et 0,67 pour les données de contrôle. Les autres combinaisons de paramètres d'entrée ont donné des résultats inférieurs. L'analyse des facteurs de pondération a révélé que les paramètres d'entrée pouvaient être classés dans l'ordre suivant : AOT40 > conditions optimales d'éclairement = conditions optimales d'irrigation = réaction = continentalité > conditions optimales de température = distinction herbe/plante herbacée. La place élevée de l'AOT40 dans ce classement pourrait simplement refléter une différence dans les conditions d'essai, les espèces ayant été testées par lots successifs, avec des valeurs AOT40 variant légèrement. Quant aux autres paramètres d'entrée ils étaient tous d'importance semblable pour la détermination de la sensibilité et cela pourrait expliquer pourquoi il a été impossible d'améliorer le modèle en déduisant certains paramètres.

23. On a appliqué les mêmes méthodes pour élaborer le modèle 2 en utilisant la classification de Grime de la stratégie de croissance (*competitive* (C), *stress tolerator* (S) ou *ruderal* (R)), l'AOT40, la tolérance au pH, et la distinction herbe/plante herbacée comme paramètres d'entrée. Les résultats indiquaient des performances inférieures à celles obtenues avec les classifications d'Ellenberg ( $r^2 = 0,47$  pour les données d'apprentissage et 0,21 pour les données de contrôle). D'autres études seront nécessaires pour confirmer ces constatations préliminaires et aider à comprendre les processus qui déterminent la réponse à l'ozone.

24. D'autres travaux de recherche indépendants sur la modélisation ont été menés en collaboration avec J. Fuhrer (Suisse). Neuf espèces ont été exposées à l'ozone dans des enceintes ouvertes (modèle 3). La conductivité stomatale était contrôlée après cinq jours d'exposition pour une gamme de valeurs de le DPV. Les paramètres d'entrée du modèle RNA étaient : la conductivité stomatale à 1kPa de DPV (GS1), le taux de croissance, relatif pour l'espèce (R%), la dose d'ozone (AOT40) et les conditions climatiques de rayonnement à l'échelle de la planète (GR) ainsi que le DPV au cours des cinq jours précédant la lésion et à partir du début de l'essai. Ces paramètres d'entrée ont été utilisés pour prédire la sensibilité de la plante par prédiction de la réponse stomatale au DPV après exposition à l'ozone.

25. Le modèle RNA optimisé a donné une valeur  $r^2$  de 0,70 pour les données de contrôle. Les paramètres d'entrée de ce modèle se classaient dans l'ordre suivant : GS1 > DPV (5 jours) > R% > GR à partir du début > AOT40 totale > DPV à partir du début > lumière (5 jours) > AOT40 (5 jours). Pour tester l'importance du taux de croissance relatif on a éliminé GS1, la seule autre variable relative à la plante. Dans ce cas, la valeur  $r^2$  est tombée à 0,50. Enfin lorsque l'on a utilisé seulement les variables environnementales au cours des cinq jours précédant l'apparition des lésions, la valeur  $r^2$  est tombée encore plus bas (0,28). Le résultat de l'utilisation de cette approche de modélisation par RNA a donc confirmé l'importance du taux de croissance relatif et de la conductivité stomatale d'une espèce pour la détermination de la sensibilité à l'ozone.

26. L'étude pilote a indiqué qu'il est faisable de transférer une méthode mise au point pour identifier les effets des facteurs de degré II sur le trèfle pour les appliquer à des ensembles de données en vue d'étudier la réponse de la végétation naturelle à l'ozone. Les modèles 1 et 3 ont permis d'obtenir des résultats plus proches des données réelles. Celles-ci étaient basées soit sur des distributions observées sur le terrain en relation avec les variables climatiques et édaphiques ou sur les paramètres mesurés se rapportant au climat et à la plante, plutôt que sur les stratégies de croissance des plantes, comprenant plusieurs attributs différents des plantes, qui avaient été utilisées dans le modèle 2. Celui-ci, ayant donné de moins bons résultats, était établi sur la base de la classification de Grime. Ces travaux seront poursuivis par élargissement des ensembles de données utilisés dans la modélisation, afin de pouvoir élaborer des modèles plus généraux pour une gamme plus large d'espèces. Les résultats de la modélisation seront aussi comparés avec les résultats de l'analyse statistique au moyen de techniques telles que l'analyse d'agrégats.



## VI. CONTRIBUTIONS À L'ATELIER SUR LES NIVEAUX CRITIQUES À GERZENSEE

27. Les travaux décrits ci-dessus ont été présentés à l'Atelier de Gerzensee sous la forme de documents de discussion en plénière et d'affiches, et ont servi de base à une grande partie des discussions sur les niveaux critiques pour les cultures et pour la végétation naturelle. Plus de 25 experts participant aux activités du PIC-Végétation ont assisté à l'atelier et y ont contribué activement en présentant sept exposés oraux, ce qui inclut un exposé du centre de coordination invité à l'Atelier et 11 affiches.

28. Au cours de l'Atelier, le Groupe de travail traitant des cultures a décidé de développer les méthodes décrites à la section III comme solution provisoire pour l'élaboration d'un niveau critique de degré II en attendant que les modèles de flux présentés à la section IV soient pleinement définis du point de vue de leurs paramètres et validés (voir EB.AIR/WG.1/1999/12). L'analyse de la base de données PIC-Végétation, y compris l'élaboration d'un modèle d'effet de flux pour le trèfle se poursuivra; elle fait partie intégrante des travaux en vue d'incorporer une définition du degré II dans le Manuel de cartographie. Pour la végétation semi-naturelle, le Groupe de travail n'a pas jugé opportun d'appliquer de facteurs correctifs à l'indice d'exposition AOT40, compte tenu de la complexité des interactions entre l'ozone et les paramètres environnementaux dans les communautés végétales. On a constaté la difficulté de combiner les données de différents essais d'exposition et décidé d'appliquer des méthodes telles que celles décrites à la section V pour identifier les taxons les plus sensibles et donc les communautés végétales à risque par rapport à l'ozone.

## VII. TRAVAUX ULTÉRIEURS

29. Au cours des années à venir, les participants au réseau PIC-Végétation continueront de contribuer aux travaux de mise au point des niveaux critiques de degré II en menant les activités énumérées ci-après :

a) expériences sur du trèfle semé en pot et dans le sol pour étudier les différences spatiales en ce qui concerne la réponse de l'ozone, et utilisation de ces données pour élaborer un modèle de l'effet des paramètres de degré II sur la réponse en biomasse à l'ozone;

b) mesures de la conductivité stomatale, comme instrument pour l'élaboration d'un modèle des effets de flux;

c) poursuite des travaux sur l'incorporation des facteurs modificateurs à la fonction de réponse à l'AOT40 pour le blé, et compilation d'une base de données pour les sources d'information sur les facteurs modificateurs pour d'autres cultures commercialement importantes dans la région de la CEE/ONU;

d) poursuite de la définition des paramètres et de la validation du modèle des effets du flux d'ozone pour le blé, et efforts pour établir un lien entre la dose absorbée et la réponse des plantes pour d'autres espèces européennes importantes;

e) études pour déterminer sous quelle forme il faudrait quantifier la dose d'ozone absorbée pour obtenir la meilleure relation avec la réponse par espèce (dose cumulative d'ozone pendant toute la saison de croissance, dose cumulative au-dessus d'un certain seuil pendant toute la saison de croissance, dose cumulative d'ozone phénologiquement pondérée);

f) mise au point de méthodes de calcul des dépôts d'ozone compatibles avec celles appliquées pour l'estimation de la dose d'ozone absorbée en vue de l'évaluation du risque lié à l'ozone;

g) exécution d'enquêtes sur l'utilisation de l'irrigation dans les champs exploités commercialement situés à proximité des sites d'essai du PIC-Végétation;

h) poursuite des travaux de mise au point de méthodes pour identifier les espèces de végétation naturelle sensibles à l'ozone et types fonctionnels, mise en commun et analyse des données existantes;

i) exécution d'études pilotes en vue d'établir un système de surveillance pour la végétation naturelle semblable à celui utilisé pour l'essai sur les clones de trèfle et applicable en divers lieux en Europe;

j) élaboration de méthodes pour faciliter la cartographie des espèces, populations et communautés végétales sensibles à l'ozone en Europe;

k) exécution d'études financées nationalement sur les facteurs associés à la sensibilité à l'ozone dans les espèces de végétation naturelle, tels que les paramètres liés à l'eau et aux nutriments, et collecte des données dans une base de données centrale.

#### VIII. CONCLUSION

30. Les essais du réseau PIC-Végétation ont montré que le niveau critique actuellement fixé à 3 000 ppb.h est régulièrement dépassé sur des périodes de 28 jours non coïncidentes au cours des mois d'été sur plusieurs sites européens. Toutefois, ces dépassements ne sont pas toujours associés à une réduction sensible du rapport de biomasse entre le clone NC-S et le clone NC-R, ce qui donne à penser que d'autres facteurs (de degré II) pourraient influencer sur la réponse à l'ozone. Les études statistiques initiales indiquent que la proximité de sources locales de  $\text{NO}_x$  et l'intervalle de récoltes sont des facteurs modificateurs importants. Les tentatives entreprises pour établir des modèles globaux par régression linéaire multiple n'ont pas abouti, ces modèles donnant des résultats médiocres sur des données non encore examinées. L'utilisation d'un modèle RNA non linéaire a donné de meilleurs résultats, avec une valeur  $r^2$  de 0,84 pour les données d'apprentissage et 0,71 pour les données de contrôle. Les paramètres d'entrée de ce modèle étaient l'AOT40,  $\text{O}_3$  24h,  $\text{NO}_1$  700h,  $T_{\text{diurne}}$  et  $T_{24h}$ . L'analyse a montré qu'apparemment l'AOT40,  $\text{O}_3$  24h et  $\text{NO}_1$  700h fournissaient au modèle des informations sur la dynamique de l'exposition à l'ozone, alors que l'élévation de la température semblait accroître l'amplitude de la réponse à l'ozone. Le modèle fonctionnait moins bien lorsque le DPV, d'autres paramètres relatifs aux  $\text{NO}_x$  et l'intervalle de récoltes étaient inclus.

31. Les travaux de recherche sur les méthodes visant à incorporer des fonctions d'échelle dans le modèle de réponse à l'AOT40 pour le blé se sont poursuivis au cours de l'année. La prise en compte du paramètre FDHS a réduit l'ampleur des dépassements dans les zones à sol sec pendant la période de croissance du blé. L'incorporation d'un facteur phénologique par centrage de la période de trois mois sur la date d'anthèse (estimée par calcul du produit température par temps) a elle aussi eu pour effet de modifier l'amplitude des dépassements dans les régions septentrionales et méridionales.

32. Les travaux de modélisation des flux de degré II ont montré que l'utilisation d'une approche fondée sur le flux (plutôt qu'une approche fondée sur l'exposition par l'AOT40) donne un classement différent en ce qui concerne les zones les plus à risque en Europe vis-à-vis de la pollution par l'ozone. De manière générale, il apparaît que les zones ayant les plus fortes expositions à l'ozone ne sont pas toujours celles qui reçoivent les plus fortes doses d'ozone absorbées. Certes, la capacité à faire des estimations de l'ozone absorbé est utile car elle aide à l'établissement des valeurs de degré II pour l'ozone. Cependant, la relation entre la dose absorbée et les dommages causés doit encore être déterminée avant que l'on puisse procéder à des estimations fiables des dommages réels. L'application des principes de base utilisés pour la modélisation de l'absorption d'ozone au processus d'estimation du dépôt d'ozone devrait permettre de calculer de manière plus fiable les concentrations ambiantes d'ozone au moyen du modèle de prédiction photochimique de l'EMEP.

33. Une étude pilote a démontré qu'il est possible d'identifier les facteurs associés à la sensibilité à l'ozone de la végétation naturelle au moyen des modèles RNA. Sur la base d'un ensemble limité de données, les deux modèles fondés sur les besoins de croissance (classification d'Ellenberg) et sur les paramètres des plantes ont donné de meilleurs résultats que ceux fondés sur la stratégie écologique (classification de Grime). Les études sur cette approche seront poursuivies par la mise en commun et l'analyse de données provenant d'autres programmes de recherche financés nationalement.

34. Les participants au réseau PIC-Végétation ont joué un rôle actif dans les travaux du récent atelier sur les niveaux critiques pour l'ozone - Degré II (avril 1999), en présentant de nombreux documents de discussion en plénière et affiches. Les recommandations concernant les travaux ultérieurs sur les niveaux critiques pour les cultures et la végétation naturelle s'appuyaient sur les travaux commentés dans le présent rapport.

#### IX. RÉFÉRENCES

Ashmore M. R. and Davidson A. W. (1996), Towards a critical level of ozone for natural vegetation. In: Kärenlampi L. & Skärby L. (eds.). Critical Levels for ozone in Europe: Testing and finalizing the concepts. A UN/ECE/Workshop Report. University of Kuopio, Finland, 58-71.

Ball G. R., Benton J., Palmer-Brown D., Fuhrer J., Skärby L., Gimeno B. S., Mills G. (1998). Identifying factors which modify the effects of ambient ozone on white clover (*Trifolium repens*) in Europe. *Environmental Pollution* 103:7-16.

Bungener P., Ball G., Nussbaum S., Geissmann M., Grub A., and Fuhrer J. (1999). Leaf injury characteristics of grassland species exposed to ozone in relation to soil moisture condition and vapour pressure deficit. *New Phytologist*, in press.

Davidson A. W. and Barnes J. D. (1998). Effects of ozone on wild plants. *New Phytologist* 139:135-151.

Ellenburg H. (1988). *Vegetation Ecology of Central Europe*. 4<sup>th</sup> Ed. Cambridge University Press, Cambridge.

Grime J. P., Hodgson J. G. and Hunt R. (1988). *Comparative Plant Ecology*. Unwin Hyman, London.

Heagle A. S., Miller J. E., Sherrill D. E. (1994). A white clover system to estimate effects of tropospheric ozone on plants. *Journal of environmental quality* 23:613-621.

Reiling K. and Davidson A. W. (1992). The response of native, herbaceous species to ozone: growth and fluorescence screening. *New Phytologist* 120:29-37.

Roadknight C. M., Ball G. R., Palmer-Brown D. and Mills G. E. (1997). Modelling complex environmental data. *IEEE Transactions on Artificial Neural Networks*, 8, 856-862.

UBA, 1996. *Manual on Methodologies and Criteria for Mapping Critical Levels/Loads and Geographical Areas Where They Are Exceeded*, Texte 71/96. Umweltbundesamt, Berlin, Germany, 144+1xxiv pp.

UN/ECE (1998). *Experimental Protocol for the ICP-Crops*. Institute of Terrestrial Ecology-Bangor Research Unit, UK.

UN/ECE (1999). *Annual Status Report for the ICP-Vegetation*, September 1998 - August 1999. Institute of Terrestrial Ecology-Bangor Research Unit, UK.

Note : Les références, tableaux et figures sont reproduits tels qu'ils ont été reçus.

Tableau 1. Tableau récapitulatif des données du réseau PIC-Végétation utilisées pour cette étude. Les chiffres correspondent à la moyenne et à l'étendue (entre parenthèses) des valeurs sur 28 jours pour l'AOT40 et la moyenne diurne pour NO, NO<sub>2</sub>, la température et le déficit de pression de vapeur

Pays-site	Années	Nombre	AOT40	NO diurne	NO <sub>2</sub> diurne	T diurne	DPV diurne
A-S	1998	3	2 287 (223-3 326)	1,4 (0,7-2,1)	2,9 (2,1-3,9)	20,5 (17,1-25,7)	1,13 (0,73-1,79)
B-T	1996-1998	9	713 (9-2 130)	2,5 (0,7-4,7)	8,0 (6,7-10,6)	18,6 (16,4-22,5)	0,70 (0,41-0,99)
FIN-J	1996-1997	3	636 (238-1 248)	0,8 (0,2-1,2)	0,8 (0,2-1,5)	18,9 (16,5-20,6)	0,78 (0,62-0,92)
D-B	1997	3	1 570 (505-3 521)	1,9 (1,2-2,5)	2,7 (1,3-4,2)	20,3 (17,4-23,7)	0,88 (0,63-1,30)
D-C	1997	2	974 (3-1 945)	10,0 (8,7-11,2)	14,7 (12,6-16,8)	20,0 (17,6-22,3)	0,88 (0,64-1,13)
D-D	1997-1998	6	2 654 (178-3 523)	0,5 (0,4-0,6)	4,0 (3,0-5,6)	16,3 (13,6-21,8)	0,79 (0,46-1,14)
D-E	1997	2	378 (141-615)	9,9 (9,9-9,9)	14,5 (14,1-14,9)	18,8 (17,3-20,3)	0,71 (0,56-0,85)
D-G	1998	3	2 925 (1 166-4 044)	4,7 (3,7-5,4)	7,1 (6,1-8,6)	19,0 (17,9-20,2)	0,84 (0,66-1,00)
D-T	1997-1998	6	432 (0-1 369)	37,7 (27,3-49,8)	25,5 (23,5-26,9)	19,7 (15,2-21,6)	1,04 (0,64-1,44)
I-IS	1997-1998	4	10 042 (7 384-11 976)	3,2 (1,3-5,8)	6,0 (0,7-12,4)	25,6 (24,2-26,8)	1,49 (1,16-1,72)
I-M	1996	2	2 714 (269-5 160)	22,8 (5,7-39,9)	25,7 (11,0-0,4)	21,9 (19,1-24,6)	1,22 (0,95-1,49)
SI-Z	1997	1	3 214	0,84	3,9	16,9	0,79
ES-N	1998	4	1 663 (430-2 501)	4,2 (1,96-9,62)	9,7 (7,6-11,7)	23,6 (18,0-26,8)	1,34 (0,53-2,02)
CH-C	1996-1998	5	6 488 (3 588-9 047)	0,4 (0,1-1,05)	4,0 (0,7-9,3)	23,4 (21,2-25,8)	1,19 (1,08-1,33)

Légende : A-S : Autriche-Seibersdorf; B-T : Belgique-Tervuren; FIN-J : Finlande-Joikenen;  
D-B : Allemagne-Brunswick; D-C : Allemagne-Cologne; D-D : Allemagne-Deuselbach;  
D-E : Allemagne-Essen; D-G : Allemagne-Giesson; D-T : Allemagne-Trèves; I-IS : Italie-Isola Serafini;  
I-M : Italie-Milan; SI-Z : Slovénie-Zavodnija; ES-N : Espagne-Navarre; CH-C : Suisse-Cadenazzo.

Tableau 2 . Valeurs calculées (blé, 1994) du flux d'ozone total ( $\text{CFO}_3$  et  $\text{CFO}_3 > 1,5 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , en  $\text{mmol m}^{-2}$ )  
et AOT40 en ppb.h

	$\text{CFO}_3$	$\text{CFO}_3$ ( $> 1,5 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )	AOT40
Suède	7,35	3,33	4 714
Royaume-Uni	6,54	3,23	4 407
Europe centrale	6,43	2,44	8 730
Espagne	6,65	4,48	2 283

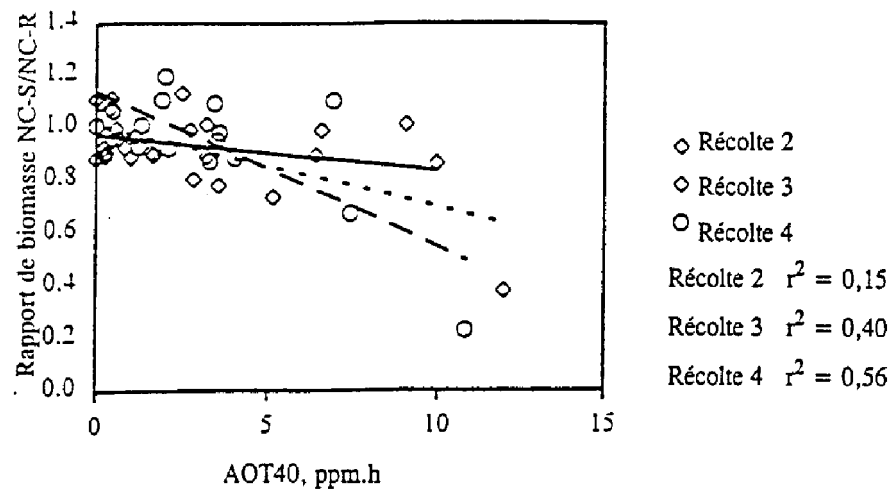


Figure 1. Relation entre le rapport de biomasse des clones NC-S et NC-R de trèfle blanc et l'AOT40 accumulée sur les 28 jours précédant les récoltes (récoltes 2 : \_\_\_\_; 3 : ...; et 4 : ---). Lorsque toutes les données étaient combinées, la valeur de  $r^2$  pour la régression linéaire était de 0,298

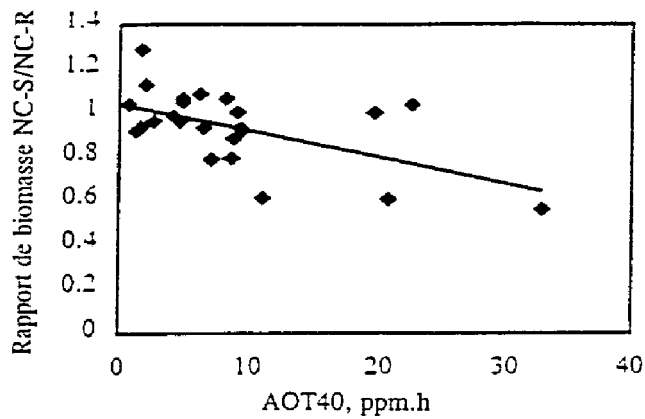


Figure 2. Relation entre le rapport de biomasse des clones de trèfle blanc et l'AOT40 accumulée sur trois mois. La valeur  $r^2$  pour la régression linéaire était de 0,325

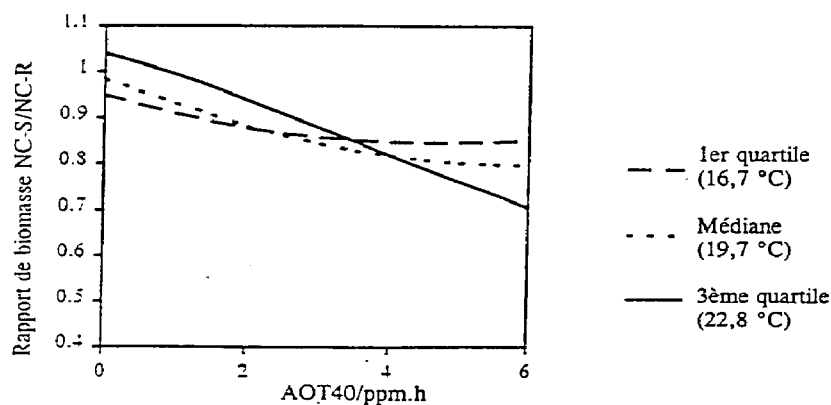


Figure 3. Effet prédit de la température (moyenne diurne) sur la relation entre le rapport de biomasse des clones de trèfle blanc (NC-S/NC-R) et l'exposition à l'ozone sur 28 jours