
L'OZONE ANTHROPOGENIQUE, UN RISQUE GLOBAL POUR LE CLIMAT ET L'ALIMENTATION DE L'HUMANITE

Synthèse de la séance organisée par R. **MATYSSEK**¹

par Daniel **TESSIER**²

L'ozone troposphérique, des basses couches de l'atmosphère, est un gaz qui est naturellement présent à de très faibles concentrations (< 10 ppbv ou parties par milliard en volume) et qui a augmenté de façon importante depuis l'ère industrielle. Comme c'est un gaz très réactif, il varie rapidement dans le temps et dans l'espace, à la différence du CO₂ qui est réparti de façon assez uniforme sur la planète. On peut néanmoins établir des valeurs moyennes sur de longues durées dans des sites à l'écart des grandes sources. Ces moyennes ont fortement augmenté (de l'ordre de 40 ppbv actuellement), posant des problèmes de santé aux populations fragiles (enfants, asthmatiques) et causant des réductions de production aux cultures et aux forêts.

A l'origine de cette augmentation on trouve les précurseurs de l'ozone: oxydes d'azote NO_x produits par les moteurs à combustion interne, feux, méthane CH₄ produit par les ruminants et les milieux humides (dont les rizières), et composés organiques volatils non méthaniques (NMVOC) émis par les activités humaines et aussi de façon naturelle par diverses espèces de plantes dont les chênes et les peupliers). On estime que les pertes de récolte dues à l'ozone seraient de l'ordre de 15 % pour la communauté européenne, représentant une perte économique de 3 milliards d'euros. On a peu de données sur les effets de l'ozone sur les plantes sauvages et les forêts, mais l'ozone paraît de nature à diminuer le rôle de puits de carbone des forêts.

La végétation est la principale source de composés organiques volatils (COV) biogéniques. Or ces sources sont supérieures à celles des COV anthropiques d'un ordre de grandeur. En raison de leur grande réactivité, les COV jouent un rôle important dans la détermination des processus atmosphériques tels que l'aérosol organique secondaire. En présence d'oxydes d'azote anthropiques (NO_x), ils augmentent la formation d'ozone et modifient les concentrations de radicaux hydroxyles, l'oxydant atmosphérique principal. Ainsi, en modifiant la capacité oxydante de la troposphère ils influencent la composition locale et régionale de l'air en modifiant la durée de vie chimique des gaz réactifs avec des impacts importants sur la végétation et le climat. Les émissions biogènes provenant de la végétation sont spécifiques à l'espèce. L'isoprène et les monoterpènes sont principalement émis de manière «constitutive»

¹ Membre correspondant de l'Académie d'Agriculture de France.

² Membre de l'Académie d'Agriculture de France.

en fonction de la lumière, de la température et de la saisonnalité. Les sesquiterpénoïdes, les benzénoïdes et les produits de lipoxygénase volatiles (dits «volatils de feuilles vertes») sont typiquement induits et émis à partir de feuillages verts après exposition à l'ozone ou aux herbivores. Cependant, malgré le potentiel des terpénoïdes et des benzoïdes pour influencer la formation d'ozone les flux de VOC biogéniques induits par le stress sont rarement considérés dans le contexte de la chimie atmosphérique. En particulier, l'effet net de facteurs de stress multiples coïncident fréquemment dans la nature, sur le stress induit. Dans les zones urbaines et suburbaines anthropogéniquement polluées, la végétation peut souffrir deux fois - du dépôt d'ozone et des produits de décomposition de COV produits lors des processus de formation d'ozone.

Que savons-nous de l'action des niveaux accrus d'O₃ sur les arbres et les écosystèmes forestiers? Apparemment, l'O₃ n'a pas été un «tueur d'arbres» comme cela l'a été supposé dans les années 1980/90 à l'époque du «dépérissement des forêts». Les effets de l'O₃ sont plus subtils, comme indiqué par la pléthore d'expériences de fumigation d'O₃ en chambres à ciel ouvert au cours du 20^{ème} siècle. Mais, les dispositifs expérimentaux n'étaient pas pertinents d'un point de vue écologique. Plus tard, des données fiables ont été obtenues avec des expériences de fumigation à l'air libre, comme aux États-Unis (AspenFACE), en Allemagne (Forêt de Kranzberg) et en Finlande (Kuopio), et ceci pendant une décennie, ou plus récemment au Japon (Sapporo, Tsukuba), en Italie (Florence) ou actuellement en préparation en Chine (Pékin). Ces expérimentations ont été menées sur des essences pionnières ou de climax, dans des plantations ou des forêts, sans système de chambre à ciel ouvert. Les résultats indiquent que l'augmentation d'O₃ réduit globalement la capacité de puits de carbone des arbres et les capacités de stockage de l'ensemble du système forestier (sol + arbre), avec de nombreux effets indirects sur l'augmentation de la respiration des sols, la productivité des racines fines et la modification des associations mycorhiziennes et microbiennes. Ainsi, les arbres juvéniles et matures sont sensibles à l'O₃, comme cela avait été conclu lors des études en chambre à ciel ouvert, mais les résultats diffèrent par les mécanismes de sensibilité et montrent des rétroactions indirectes qui pourraient accentuer le changement climatique. Il est à noter que l'augmentation chronique de l'O₃ impacte la régulation stomatique et ainsi réduit la transpiration foliaire, ce qui pourrait avoir des conséquences sur le cycle de l'eau à grande échelle. Les effets de l'O₃ sur la production forestière et son impact sur les services écosystémiques rendus par les forêts sont largement inconnus. Les effets de l'O₃ décrits sur de nombreux sites forestiers ou de plantations sont préoccupants, car l'O₃ est distribué dans la basse atmosphère aux échelles transcontinentale et hémisphérique. En outre, les «points chauds» à venir de la formation d'O₃ sont dans les régions tropicales (Amérique du Sud et Afrique centrale, Sud-Est et Est de l'Asie) et également dans le sud de l'Europe (région méditerranéenne). Le pool actuel de carbone atmosphérique pourrait être supérieur de 100 Gt en l'absence de l'impact de O₃ sur le stockage carboné forestier depuis le début du 20^{ème} siècle. De quelles manières ces conclusions dérivées de la modélisation sont-elles conformes avec les observations sur l'accumulation accrue et accélérée de la biomasse forestière, tout du moins en Europe centrale? Est-ce que l'élimination des précurseurs de l'O₃ augmenterait-elle

davantage l'accumulation de biomasse? Est-ce que les modèles explicatifs tels que ceux utilisés en agriculture peuvent-ils résoudre cette contradiction?

La réponse des écosystèmes forestiers à l'O₃ est encore vague, étant donné que cette réponse est dépendante de la plasticité des interactions multi-factorielles. En particulier, les interactions biotiques qui sont les moteurs de la réponse des écosystèmes, sont à peine comprises. Des perspectives seront exposées à partir de recherches expérimentales sur le terrain à travers la compréhension mécaniste de l'impact de l'O₃ sur l'écosystème, qui est nécessaire pour aborder les effets de l'O₃ sur le climat et la santé des forêts.

Pour la production agricole et la sécurité alimentaire l'ozone troposphérique représente une menace sérieuse par ses impacts négatifs sur les rendements des principales cultures et sur la qualité des produits. L'ozone agit principalement à l'intérieur des tissus foliaires, vers lesquels il diffuse depuis l'air extérieur à travers les stomates. Les principaux impacts écophysologiques induits par l'ozone sur les plantes sont le stress oxydant, la diminution de la photosynthèse et la réduction de la croissance. L'accumulation de biomasse est réduite, et sa répartition entre les organes peut être modifiée. Même de courts épisodes de pollution à l'ozone peuvent avoir des impacts significatifs en provoquant d'importants dégâts foliaires sur les légumes-feuilles (salade, oignons, épinards), ce qui abaisse fortement leur valeur marchande. Il existe cependant une très large variabilité intra- et inter-spécifique de la sensibilité des cultures à l'ozone. Des cultures comme le blé, le riz ou le soja font partie des espèces très sensibles à ce polluant, alors que l'orge, la pomme de terre ou le maïs sont moins sensibles. Pour estimer les pertes de rendements globales ou régionales dues à l'ozone, on dispose aujourd'hui de relations dose-réponse établies empiriquement pour la plupart des espèces cultivées à partir de données expérimentales. A l'aide de ces outils, on a pu estimer par exemple que le coût des pertes de rendements en grain du blé au cours de l'année 2000 était de l'ordre de 3 milliards d'euros. Malgré les politiques de réduction de la pollution de l'air par l'ozone mises en place actuellement en Europe, on estime que ces coûts économiques seront encore de l'ordre de 2 milliards d'euros pour le blé en 2020.