
**DIRECT AND INDIRECT EFFECTS OF TROPOSPHERIC OZONE
ON FOREST ECOSYSTEMS – RELEVANCE FOR GLOBAL CARBON STORAGE, FOREST
PRODUCTS AND CLIMATE CHANGE**

Rainer Matyssek¹ & Didier LeThiec²

Tropospheric ozone (O₃), as occurring at enhanced concentrations upon anthropogenic precursor formation, is a secondary air pollutant, which has gained awareness as an intrinsic component worldwide of climate change. Precursors from combustion processes (industries, transportation, large-scale forest burning during land-use change) intermingle with pathways to warming and exacerbating drought, as enhanced O₃ formation is directly climate-active. Increasing O₃ levels drive O₃/VOC interaction (as demonstrated in the preceding presentation), which may reinforce precursor release.

What do we know about the action of enhanced O₃ levels on forest trees and ecosystems ? Apparently, O₃ has not turned out as an immediate “tree killer” as assumed in the 1980/90s during discussions of “novel forest decline”. Rather, O₃ effects are more subtle, as already indicated by the plethora of chamber O₃ fumigation experiments during the 20th century. However, experimental settings were not ecologically relevant. Reliable evidence became available after performing free-air O₃ canopy fumigation experiments, such as in USA (AspenFACE), Germany (Kranzberg Forest) and Finland (Kuopio), for up to one decade each, or recently started in Japan (Sapporo, Tsukuba), Italy (Florence) or prepared in China (Beijing) on aggrading pioneer or climax tree species, or maturing forest trees in plantations or forests without chamber enclosure.

Findings coincide that enhanced O₃ globally lowers carbon sink strength of trees and storage capacities of the entire tree-soil system of forests, with manifold indirect effects such as by enhanced soil respiration, fine-root productivity, and changing mycorrhizae and microbial associations. Hence, aggrading and maturing trees under free-air conditions are O₃-sensitive as concluded from chamber studies, but differ by extents and mechanisms of O₃ sensitivity with indirect feedbacks to enforcing climate change. Noteworthy, enhanced chronic O₃ impact on stomatal regulation reduces transpiration, which is climate-effective as well at large scale, with risks for enhanced water run-off from ecosystems and erosion/flooding. Largely unknown are O₃ effects on forest products and socio-economic implications by O₃-affected forest services.

¹ Chair for Ecophysiology of Plants, TUM School of Life Sciences Weihenstephan, Technische Universität München, Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2, D-85354 Freising.
Email: matyssek@wzw.tum.de

² INRA National Institute for Agronomic Research, UMR Forest Ecology and Ecophysiology
rue d'Amance, F-54280 Champenoux
Email : didier.lethiec@inra.fr

The outlined O₃ effects at forest/plantation sites are of concern, as O₃ is distributed in the lower atmosphere at transcontinental and hemispheric scales. Additionally upcoming "hot spots" of O₃ formation are recognized in the tropics (central S-America and Africa, SE- and E-Asia), and also in Southern Europe (Mediterranean region). The current atmospheric C pool might be lower by up to 100 Gt in the absence of O₃ limitation on forest C storage since the beginning of the 20th century, although conclusions are based on non-validated modeling. How do such modeling-derived conclusions comply with observations of enhanced and accelerated biomass accumulation of forests, at least, across Central Europe ? Would removal of O₃ precursors from the atmosphere enhance biomass accumulation further ? Can explanatory models such as employed to crops resolve the observational conflict ?

Forest ecosystem-level response to O₃ still is vague, given that response is shaped by the plasticity of multi-factorial interactions at forest sites. In particular, biotic interactions are drivers of ecosystem response, however, hardly understood. Perspectives will be outlined in experimental field research towards mechanistic ecosystem-level understanding of O₃ impact, required to reconcile O₃ effects on climate and forest health.

Résumé

L'ozone troposphérique (O₃), qui se forme à des concentrations élevées à partir de précurseurs anthropiques, est un polluant atmosphérique secondaire qui est considéré maintenant dans le monde entier comme une composante intrinsèque du changement climatique. Les précurseurs issus des processus de combustion (industries, transport, brûlage des forêts à grande échelle lors du changement d'affectation des terres) sont impliqués dans le réchauffement climatique et l'accentuation des sécheresses; ce qui amène aussi à une formation accrue d'O₃ qui est, elle, directement climatique. L'augmentation des niveaux d'O₃ entraîne par ailleurs une interaction de l'O₃ avec les COVs (comme démontré dans la présentation précédente), qui pourrait renforcer la libération des précurseurs.

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 "design" 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 poussant dans ces conditions 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 avec des risques accrus d'inondation. 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 inférieur de 100 Gt en l'absence de l'impact de O₃ sur le stockage carboné forestier depuis le début du 20^{ème} siècle, bien que les conclusions soient basées sur une modélisation non validée. 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.