

Les forêts méditerranéennes en 2030 face à la pollution atmosphérique

Introduction

Le bassin méditerranéen est constitué d'une impressionnante diversité de nations, de cultures et d'économies, avec des populations aux modes de vie très différents.

Dans les années à venir, sur ce bassin de surface relativement réduite et du fait de la variété des développements économiques des nations présentes et des pollutions qui y sont liées, les forêts vont se trouver confrontées à un cocktail de pollutions atmosphériques. On peut déjà avancer qu'au cours des premières décades du siècle prochain, ces pollutions seront semblables aux pollutions actuelles mais avec des répartitions, des niveaux et des impacts différents : des pollutions globales présentes sur l'ensemble du bassin comme le CO₂ et les UV-B, des pollutions régionales présentent sur plusieurs centaines de kilomètres (pollutions qui vont, elles aussi, toucher l'ensemble du bassin

étant donné sa taille) comme l'ozone, les retombées acides ou azotées, et des pollutions locales uniquement présentes sur plusieurs dizaines de kilomètres dont les plus représentatives sont le SO₂ et les NO_x, avec une pollution particulière par les embruns marins pollués par les détergents.

Les forêts méditerranéennes face aux pollutions globales

Pollution par le CO₂

La large utilisation du charbon et du fuel comme source d'énergie par tous les pays de la planète a entraîné une très nette augmentation des concentrations en CO₂ dans l'atmosphère terrestre (362 ppm actuellement au lieu de 280 ppm au début du siècle), et il est prévu comparativement à

aujourd’hui un doublement de celles-ci au cours du siècle prochain.

On sait déjà que l'effet directe de cette augmentation du CO₂ sera bénéfique pour toutes les forêts avec une augmentation de leur productivité nette (10 à 30 %) en raison de l'accroissement du rendement de la photosynthèse ; toutefois les différentes espèces ne répondront pas toutes de la même manière et l'on peut s'attendre à la longue à des modifications de la structure et de la biodiversité des écosystèmes forestiers. Ce phénomène, lié au CO₂, est par exemple déjà observable au niveau de peuplements naturels de pins maritimes au Maroc, où il a été constaté une nette augmentation de la surface des cernes annuels des arbres depuis le début du siècle. Cependant, il est redouté qu'au bout d'un certain nombre d'années, suite à cet effet positif de la

* INRA - Centre de Recherches
Forestières de Nancy
Laboratoire Pollution Atmosphérique
54280 CHAMPENOUX

fertilisation carbonée sur la production, des facteurs comme la disponibilité en eau ou en éléments minéraux des sols deviennent des facteurs limitants. Parallèlement, en entraînant une fermeture partielle des stomates et en limitant les échanges avec l'atmosphère il a été montré que cette élévation du CO₂ augmentera l'efficacité de l'utilisation de l'eau dans les arbres et de ce fait, leurs donnera une meilleure résistance à la sécheresse. De même, cette fermeture en réduisant la pénétration des gaz dans les feuilles, atténua les effets phytotoxiques des autres polluants présents dans l'atmosphère comme l'ozone. Enfin, on peut signaler qu'au niveau des arbres, outre le fait d'entraîner une demande réduite en eau, l'augmentation du CO₂ modifie la composition minérale de leurs tissus foliaires : baisse des teneurs en azote et augmentation des concentrations en phosphate, avec des conséquences pour les relations plantes/insectes.

Mais cette augmentation du CO₂ aura surtout des effets secondaires sur les forêts méditerranéennes au travers de l'augmentation de la température de l'atmosphère terrestre qui va en découler. Un accroissement de 1 à 2 degrés est prévu au cours du siècle prochain dans le cadre de l'effet de serre, et autour du bassin méditerranéen les premiers modèles mathématiques semblent indiquer que cet accroissement ne sera pas régulièrement réparti, avec de grandes incertitudes sur ses variations et sa saisonnalité. Les effets de cette élévation de température peuvent être bénéfiques pour les arbres si elle intervient durant la saison de végétation, mais on doit surtout craindre ses effets négatifs dans cette région au climat déjà chaud, comme par exemple, des problèmes de migrations pour les arbres en limite d'aire. Mais ce sont avant tout les conséquences climatiques de cette élévation de température que l'on redoute pour la santé des forêts méditerranéennes. Parmi ces conséquences climatiques néfastes, on peut citer :

- une augmentation des sécheresses atmosphériques et une augmentation de l'ETP, avec pour conséquences pour les arbres des dessèchements, des pertes de croissance, un développe-

ment des attaques de ravageurs et de pathogènes, une augmentation des grands incendies. Ce sont les forêts d'altitudes qui auront le plus à souffrir de ces stress ;

- une augmentation probable de la pluviosité dont les effets bénéfiques pour les forêts seront vraisemblablement fortement contrebalancés, d'après les modèles mathématiques, par une grande irrégularité des précipitations annuelles ;

- une augmentation de la fréquence des vents, qui vont accroître les risques de chablis, mais surtout qui vont entraîner des pertes d'eau supplémentaires par les arbres suite au frottement et à l'usure de leurs surfaces foliaires ;

- une augmentation du niveau de la mer par dilatation thermique, qui aura des effets surtout sensibles pour les forêts du littoral, avec des problèmes d'érosion des côtes et de pénétration de l'eau de mer dans les nappes souterraines.

Ce serait l'apparition de sécheresses prolongées et l'augmentation des grands incendies qui auraient les conséquences les plus graves pour les forêts méditerranéennes.

Pollution par les UV-B

La forte utilisation jusqu'à une date récente des CFC a entraîné une diminution de la couche d'ozone stratosphérique protégeant la planète, avec corrélativement une augmentation du flux d'UV-B atteignant le sol. Si l'utilisation des CFC est maintenant interdite, ses effets néfastes vont encore se faire sentir au cours du siècle prochain, suite à leurs grandes durées de vie qui sont de l'ordre d'une centaine d'années. Si ces effets des CFC sur l'ozone stratosphérique sont particulièrement marqués au niveau de l'Antarctique (trou d'ozone), on sait qu'ils existent également dans tout l'hémisphère Nord.

Avec de grandes incertitudes, il est prévu une diminution de la couche d'ozone de 10 % au-dessus des régions méditerranéennes avec une augmentation de l'ordre de 15 % du flux d'UV-B.

Il faut signaler que dans ces régions, les arbres d'altitude de par leur situation reçoivent déjà dans des conditions naturelles des flux plus importants d'UV-B comparativement aux arbres de plaine, ceci étant dû à une atténuation plus faible du rayonnement solaire par l'atmosphère.

Vis-à-vis de cette augmentation des UV-B les premières recherches *in situ* semblent indiquer que les arbres des régions méditerranéennes sont bien adaptés pour limiter, voir annuler, les effets négatifs de ce stress oxydatif. En effet leurs feuilles possèdent déjà de fortes concentrations de flavonoïdes et de composés phénoliques induites par les stress naturels estivaux qu'elles subissent comme la chaleur, la sécheresse ou le fort ensoleillement.

Il est de même apparu que cet accroissement des UV-B pouvait avoir un effet bénéfique sur ces arbres, car en entraînant une fermeture partielle des stomates ils réduisent les effets négatifs des sécheresses estivales sur leur croissance et leur biomasse. Cependant ces effets positifs des UV-B n'ont été mis en évidence que sur quelques espèces d'arbres, des pins en particulier, et il est encore prématuré de le généraliser pour l'ensemble des espèces de la forêt méditerranéenne.

Les forêts méditerranéennes face aux pollutions régionales

Pollution par les dépôts azotés

Il faut d'abord signaler qu'il existe déjà en région méditerranéenne des dépôts naturels d'azote (NO₃⁻, NH₄⁺) au niveau des forêts car, d'une part la mer n'est jamais très loin, et d'autre part elles sont fortement influencées par les poussières sahariennes. Mais les dépôts d'azote les plus importants sur ces forêts sont maintenant des



Photo 1 : Les forêts littorales méditerranéennes sont fortement exposées à la pollution par les embruns marins chargés d'hydrocarbures et de détergents.
Vue du Bec de l'Aigle depuis l'île Verte (Bouches-du-Rhône) 1995

Photo D. Afxantidis

dépôts anthropiques, essentiellement à partir, d'une part des NOx liés à l'augmentation des transports et du tourisme en particulier, et d'autre part du NH₃ provenant des lisiers d'élevages intensifs d'animaux comme les porcs ou les poules.

L'augmentation constante de ces apports azotés que l'on constate actuellement, principalement sous la forme de dépôts secs dans ces régions, ont de fortes chances de perturber à la longue le fonctionnement des écosystèmes forestiers méditerranéens, car ceux-ci sont généralement situés sur des sols pauvres en azote et adaptés à ces conditions.

En effet, si dans un premier temps ces forts dépôts azotés vont avoir des effets positifs et augmenter la croissance des arbres (fertilisation azotée), par contre ils risquent dans un deuxième temps d'entraîner une saturation en azote des écosystèmes forestiers avec des conséquences désastreuses : acidification des sols et des eaux, déséquilibres minéraux au niveau des arbres, sensibilité accrue de ceux-ci aux stress biotiques et abiotiques, etc... Il est aussi à craindre l'augmentation des risques de grands incendies, liés à cet accroissement de la biomasse forestière.

On ignore pour ces régions méditerranéennes au bout de combien de temps, et avec quelle intensité, des symptômes observables découlant de ce phénomène de saturation vont pouvoir être constatés. Cependant, on estime généralement que cette période sera relativement courte comparativement aux cycles des écosystèmes forestiers touchés.

Pollution par les dépôts acides

Les dépôts acides proviennent de l'oxydation et de la transformation dans l'atmosphère de polluants primaires comme le SO₂ ou les NOx et sont constitués de dépôts secs (gaz, aérosols) et de dépôts humides (pluie, neige, brouillard). Ces dépôts agissent principalement au niveau des sols, et sur les substrats géologiques très pauvres ils vont entraîner, en déplaçant les cations basiques, un lessivage des ions qui va se répercuter sur les arbres en induisant des carences et des jaunissements foliaires, et être à l'origine de certains déprérissements forestiers. Ces dépôts acides de par leur mode de formation et de transport agissent à l'échelle régionale sur plusieurs centaines de kilomètres, et les forêts méditerranéennes comme toutes les forêts d'Europe, sont maintenant touchées par ce phénomène.

Cependant, en région méditerranéenne on peut considérer que cette pollution atmosphérique continuera à avoir au début du siècle prochain, comme actuellement, un faible impact sur les forêts. En effet plusieurs raisons expliquent les faibles nuisances de ce stress acide dans cette région :

- l'oxydation du SO₂ et des NOx en acides est réduite en atmosphère sèche ;
- les apports d'origine maritime et les poussières sahariennes neutralisent partiellement l'acidité des pluies et en enrichissant en cations basiques les sols, neutralisent l'acidité potentielle de ceux-ci ;
- les sols dérivés de roche mère calcaire sont fréquents.

Pollution par l'ozone

L'ozone est un polluant atmosphérique secondaire essentiellement d'origine automobile, formé à partir des hydrocarbures et des oxydes d'azote des gaz d'échappement, sous les effets du rayonnement solaire et de la chaleur. C'est un des polluants atmosphériques les plus phytotoxiques. Les régions méditerranéennes, d'un côté de par leurs conditions climatiques favorables (chaleur et fort ensoleillement), et de l'autre côté de par la rapide augmentation de leurs populations concentrées dans de grandes agglomérations, le fort développement de leurs activités industrielles, des transports routiers mais aussi du tourisme, sont des régions où l'ozone est devenu maintenant et sera encore pendant de nombreuses années le polluant le plus répandu.

A partir des années 90, il est devenu évident que dans ces régions l'ozone était le principal facteur affectant la vitalité des arbres, et c'est dans les forêts méditerranéennes que l'on a pu observer sur les aiguilles de certains résineux, et pour la première fois en Europe, des symptômes (dégradation des cires, marbrures chlorotiques) caractéristiques de l'impact de l'ozone. En particulier les espèces du genre *Pinus*, bien représenté sur le pourtour du bassin méditerranéen semblent être des espèces sensibles à ce polluant. On estime qu'actuellement dans ces régions, les pertes de production pour les arbres sont de l'ordre de 10 ± 5 % en moyenne.

En région méditerranéenne, suite à un développement économique qui transforme de plus en plus les côtes en une zone industrielle et urbaine continue, et à un important tourisme esti-

vale également confiné à une bande côtière relativement étroite, les grandes sources de pollution à l'origine de l'ozone sont pratiquement toutes situées sur le pourtour du bassin ; mais du fait du mode de formation et de transport de ce polluant secondaire, ce sont les zones rurales, les forêts éloignées et particulièrement les forêts d'altitudes qui vont être avant tout touchées, comme on peut déjà le constater dans plusieurs pays.

Ce problème ne peut aller qu'en s'aggravant au cours du siècle prochain, car on constate actuellement une augmentation continue des concentrations d'ozone dans la troposphère libre de l'Europe de l'ordre de 1,6 % par an et rien n'indique que ce phénomène va s'arrêter. Les concentrations ambiantes dans les régions méditerranéennes se situent déjà dans le domaine des valeurs nocives pour certaines espèces forestières sensibles, et l'élévation inéluctable des concentrations d'ozone ne pourra que conduire à des effets d'ampleurs notables, surtout si l'élévation de la température prévue parallèlement dans le cadre des changements climatiques globaux vient renforcer cette tendance.

Les forêts méditerranéennes face aux pollutions locales

Pollution par le SO₂ et les NOx

Ces pollutions qui agissent sur quelques dizaines de kilomètres sont principalement issues des zones industrielles (SO₂ provenant de l'utilisation du charbon et du fuel) ou des zones urbaines (NOx provenant des transports routiers). Avec la croissance et le développement économique de nombreux pays du pourtour méditerranéen qui s'accompagnent du renforcement des populations urbaines et la formation de grandes métropoles industrielles, les effets de ces pollutions locales sur les forêts proches risquent d'être un des problèmes les plus pré-

occupant au cours du siècle prochain. La phytotoxicité du SO₂ vis-à-vis des forêts est beaucoup plus à craindre que celle des NOx et ceci d'autant plus que la sécheresse du climat ne favorise pas leur oxydation.

Bien que l'on ait constaté que les essences forestières méditerranéennes de par leur tolérance à la sécheresse montrent une relative résistance à la pollution par le SO₂ il est pratiquement sûr que de plus en plus de massifs forestiers « péri-urbains » méditerranéens vont être touchés en partie ou en totalité par cette pollution, et montrer des signes de déprérissement voir des mortalités d'arbres lorsque se rajoutent des stress biotiques ou abiotiques.

Pollution par les embruns marins pollués

Dans les régions méditerranéennes le milieu marin de nombreuses zones côtières est pollué par des hydrocarbures (issus du trafic maritime) et surtout par des détergents (rejets des eaux usées d'origines industrielles ou ménagères peu ou pas traitées).

Sous les effets du vent les embruns formés se chargent de ces substances phytotoxiques et se déposent par la suite sur les arbres du littoral. L'arrivée de ces substances sur les feuilles, en favorisant en particulier la pénétration du sel, entraînent des déprérissements d'arbres voir même des mortalités. Ces effets des embruns marins pollués par des tensio-actifs sur les forêts, s'observent sur beaucoup d'endroits de la façade maritime méditerranéenne ; mais à quelques exceptions près, ces déprérissements restent légers et généralement confinés aux premières rangées d'arbres. Cependant, rien n'indique que les effets de cette pollution marine et par la suite atmosphérique vont diminuer au cours du siècle prochain car les progrès issus de la mise en service de systèmes d'épuration plus efficaces vis-à-vis des détergents dans les grandes agglomérations portuaires risquent d'être complètement annulés par l'explosion de leurs populations.

Conclusion

Le bassin méditerranéen est une des zones au monde qui subit la plus forte pression humaine, avec une population totale des nations qui le constitue de l'ordre de 380 millions de personnes et un tourisme qui, avec 158 millions d'individus, représente 1/4 du tourisme mondial.

Du fait de cette pression humaine sur une surface relativement réduite, tous les écosystèmes du bassin méditerranéen et en particulier les écosystèmes forestiers sont soumis à une forte pression anthropique dont la pollution atmosphérique ne constitue qu'un volet. Pendant la première moitié du XXI^{ème} siècle vis-à-vis de la pollution atmosphérique, les arbres vont se trouver globalement confrontés d'un côté aux effets positifs de l'augmentation des concentrations en CO₂ et des dépôts azotés, et de l'autre côté aux effets négatifs de l'augmentation des concentrations d'ozone. Il est vraisemblable que durant cette période et malgré l'apparition de plus en plus fréquente de symptômes caractéristiques de l'ozone sur les arbres, les effets positifs du CO₂ et de l'azote sur la productivité et la santé des forêts masqueront les effets négatifs de l'ozone.

Toutefois, il demeure une inconnue avec l'effet supplémentaire de la température dont l'augmentation concomitante est aussi prévue. En particulier ce scénario a de fortes chances d'être complètement bouleversé si des sécheresses prolongées apparaissent car, à ce moment, les effets positifs du CO₂ sur les arbres risquent d'être tout à fait insuffisants pour faire face à cette situation.

Mais parallèlement il ne faut pas oublier qu'à proximité de nombreuses zones urbaines ou industrielles les forêts vont être de plus en plus affectées par des pollutions locales aiguës et variées (SO₂, embruns marins pollués, pics d'ozone également) avec toutes les conséquences dramatiques que cela peut avoir sur leur vitalité.

J.-P.G.