



430, rue de la Belle Eau
Z.I. des Landiers Nord
73000 CHAMBERY

Tél. : 04 79 69 05 43
Fax : 04 79 62 64 59

air-aps@atmo-rhonealpes.org

Informations Qualité de l'air
Tél. : 04 79 69 96 96
www.atmo-rhonealpes.org

L'ozone : un indicateur de la qualité de l'air dans les réserves naturelles de Haute-Savoie



Membre de



Février 2007

SOMMAIRE

Sommaire	2
Introduction	3
1. L'ozone, un indicateur majeur de la qualité de l'air	4
1.1. Ozone stratosphérique et ozone troposphérique	4
1.2. Un mode de formation complexe	4
1.2. Ozone des villes, ozone des champs	6
1.3. Variations sur le long terme	8
1.4. Les effets de l'ozone sur la santé et la végétation	9
1.5. La réglementation dans l'air ambiant	9
2. Les réserves naturelles de Haute-Savoie : un laboratoire grandeur nature	10
2.1. Pourquoi mesurer l'ozone dans un espace protégé ?	10
2.2. Protocoles de mesure	10
2.2.1. Les capteurs passifs	10
2.2.2. Les analyseurs en continu	11
2.2.3. Les sites investigués	11
3. Résultats	13
3.1. Répartition horizontale (capteurs passifs)	13
3.1.1. Investigations estivales	13
3.1.2. Suivi annuel	15
3.1.3. Les limites de la mesure par capteurs passifs...	16
3.2. Répartition verticale (analyseurs automatiques)	18
3.2.1. Réglementation et santé humaine	20
3.2.2. Réglementation et végétation	22
3.2.3. Un épisode exceptionnel en juillet 2004	23
3.3. Les montagnes de Haute-Savoie sont-elles représentatives de la "zone alpine" ?	25
Conclusions	28

INTRODUCTION

Dans sa mission de surveillance de la qualité de l'air des départements de l'Ain, de la Savoie et de la Haute-Savoie, Air-APS s'efforce d'investiguer tous les territoires sensibles. Jusqu'à présent, les zones urbaines ou densément peuplées avaient été privilégiées, considérant que l'enjeu de santé publique était prioritaire.

Mais si cette thématique est évidemment primordiale, elle ne doit pourtant pas occulter les autres impacts de la pollution atmosphérique, comme les incidences sur la végétation et, plus globalement, sur les écosystèmes. La zone de compétence d'Air-APS recèle de vastes portions d'espaces naturels, dont certains particulièrement remarquables, font l'objet de procédures de protection. Il en va ainsi des Réserves Naturelles de Haute-Savoie, dont la plupart concernent la zone alpine.

Or, lors d'investigations précédentes¹, Air-APS avait décelé la sensibilité de ce milieu à la pollution par l'ozone, un polluant complexe car largement présent dans les zones *a priori* préservées des rejets polluants.

C'est donc fort logiquement qu'un rapprochement s'est effectué entre ASTERS (conservatoire départemental des espaces naturels) l'organisme gestionnaire des réserves de Haute-Savoie, et Air-APS afin de mettre au point un protocole permettant de mieux appréhender deux questions apparues rapidement essentielles :

- quels sont les niveaux d'ozone dans les réserves naturelles ?
- comment sont-ils répartis spatialement et temporellement ?

Ce rapport rend compte d'une année d'investigations exploratoires, entre juillet 2004 et juin 2005, ayant pour vocation de déterminer les niveaux de pollution rencontrés. *In fine*, il s'agit ainsi de fournir à ASTERS les premiers éléments permettant de définir une stratégie de prise en compte de la composante atmosphérique dans une gestion à long terme de ses espaces protégés.

Remerciements :

Air-APS remercie les personnes et organismes ayant contribué au bon déroulement des mesures :

- ASTERS : Juliette Vodinh, Laurent Delomez, Daniel Gerfaud-Valentin, Julien Heuret, Patrick Perret (double merci !), Jacky Ravanel, Jean-José Richard-Pomet
- les gardiens de refuge de Moëde-Anterne (Lionel Didier) et de Sales (M.Mogenier),
- la Compagnie du Mont-Blanc (remontées mécaniques de Plan Praz et des Grands Montets)

¹ Lors des POI (Périodes d'Observations Intensives) du programme POVA, et de l'étude régionale "Ozone 2002"

1. L'OZONE, UN INDICATEUR MAJEUR DE LA QUALITE DE L'AIR

L'ozone, contrairement à beaucoup de polluants connus, n'est pas un composé émis directement par une source de pollution : on ne le retrouve donc pas à la sortie des pots d'échappement, d'une cheminée d'usine ou d'une habitation, ... Cette molécule (O₃), formée de trois atomes d'oxygène, est en fait chimiquement formée dans l'air à partir d'autres polluants appelés des "précurseurs", sous l'effet du rayonnement solaire. Parmi ces précurseurs, on retrouve essentiellement des oxydes d'azote (NO_x) et du CO (monoxyde de carbone) produits par le trafic routier, et des composés organiques volatils (COV) aux origines plus diverses : trafic routier, mais aussi certains procédés industriels, l'usage de solvants ainsi que des émissions naturelles (comme celles produites par les forêts de résineux par exemple).

C'est pourquoi l'ozone est classé dans la famille des "polluants secondaires", par opposition à ses précurseurs définis comme "polluants primaires". Par son mode de formation très dépendant du rayonnement solaire, on parlera également de l'ozone comme un très bon indicateur des mécanismes de la "pollution photochimique (ou photo-oxydante)".

C'est en Californie, à Los Angeles et dans les années quarante, que le "smog² photochimique" a été décrypté pour la première fois suite à une forte insolation en présence de rejets de polluants automobiles.

1.1. Ozone stratosphérique et ozone troposphérique

Dans le grand public, une confusion courante s'établit très souvent au sujet de l'ozone. En effet, "le trou dans la couche d'ozone" et ses conséquences présentées comme catastrophiques laissent penser que ce composé est "salutaire". A l'inverse, dans les grands centres urbains, l'ozone et ses pics quotidiens évoquent les méfaits de la pollution automobile.

Bien que dans les deux cas il s'agisse toujours de la même molécule, ces deux phénomènes n'ont rien de commun, puisque le premier est naturellement présent dans la stratosphère (partie de l'atmosphère comprise entre 15 et 40 km d'altitude), et le second est créé dans la troposphère (partie basse de l'atmosphère aux environs immédiats du sol et dans laquelle nous vivons) en grande partie sous l'influence des activités humaines.

Si dans le premier cas, l'ozone est effectivement "bénéfique" car il filtre le rayonnement solaire et empêche la majorité des rayons ultraviolets nocifs d'atteindre la surface du sol, on le considère en revanche comme un polluant plusieurs kilomètres plus bas, puisque sa présence à de fortes concentrations est néfaste à la santé humaine et à la végétation.

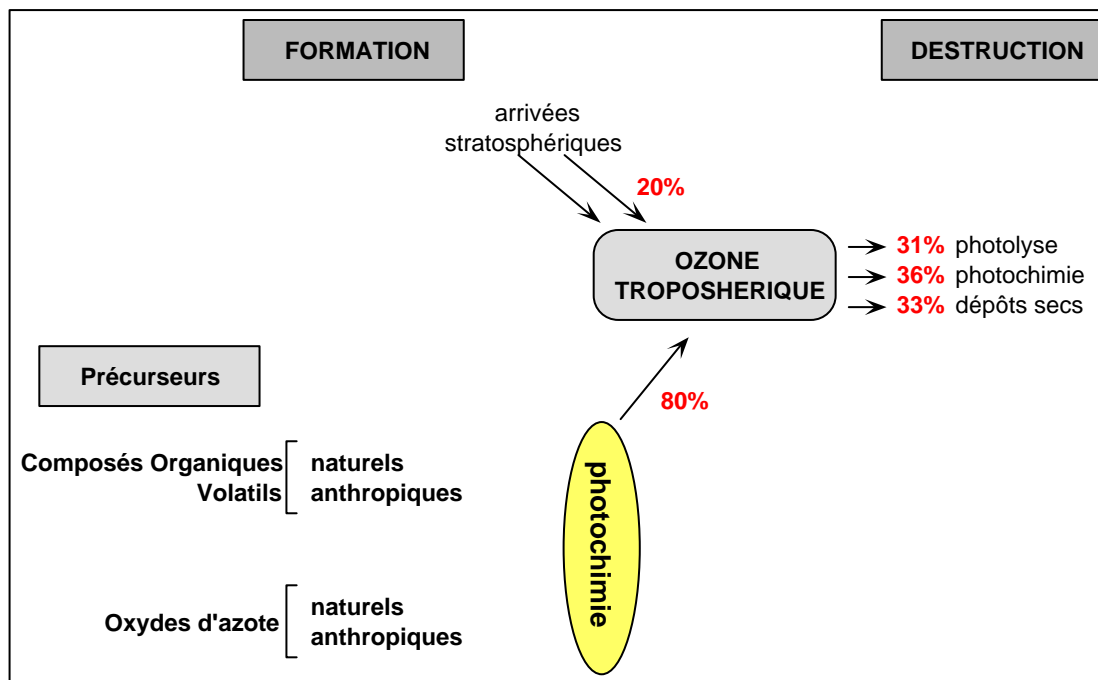
Malheureusement, les excès d'ozone constatés dans la troposphère ne peuvent en aucun cas combler le déficit observé dans la stratosphère : c'est au contraire l'ozone stratosphérique qui peut alimenter, à l'échelle planétaire, les basses couches de l'atmosphère par des phénomènes complexes appelées "intrusions", et liés au déplacement des courants violents balayant les hautes couches de la troposphère.

1.2. Un mode de formation complexe

La pollution photochimique désigne un ensemble de polluants formés chimiquement dans la troposphère, sous l'effet du rayonnement solaire. L'ozone est le polluant considéré comme le meilleur indicateur de ce type de pollution.

² Smog : anglicisme formé par la contraction de "smoke" (fumée) et "fog" (brouillard) qui désigne le nuage de pollution souvent visible dans les grandes métropoles urbaines.

De manière simplifiée, l'ozone résulte de la dégradation de certains COV et des oxydes d'azote, sous l'effet de l'irradiation solaire. Une vue d'ensemble, très schématique, de sa formation et de sa destruction apparaît sur la figure suivante³ :

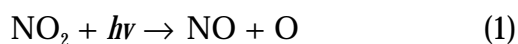


Les incursions irrégulières d'air stratosphérique ne participent que pour 1/5^{ème} à l'ozone troposphérique⁴. C'est donc essentiellement la formation par photochimie qui gouverne la présence d'ozone dans la basse atmosphère.

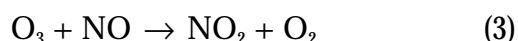
Dépendante de l'action du rayonnement solaire, la production d'ozone est logiquement stoppée durant la nuit et l'ozone présent est alors détruit par les oxydes d'azote, à savoir NO (puits⁵ permanent) et NO₂ (source d'ozone le jour grâce à la photolyse et puits la nuit).

Plus la puissance du rayonnement est élevée, plus la photolyse est efficace. De ce fait, dans nos zones tempérées, l'ozone est un polluant estival puisque l'énergie solaire reçue en hiver est insuffisante pour élever de manière significative les niveaux ambiants. Il affecte également de manière accrue les régions méridionales à fort ensoleillement, bien que théoriquement toutes les latitudes inférieures à 50° soient concernées entre avril et septembre. La présence de l'ozone connaît donc un double cycle à la fois saisonnier (en été) et quotidien (durant la journée).

De manière plus précise, l'ozone naît de l'union de l'oxygène moléculaire (O₂) et de l'oxygène atomique (O). Or, si les molécules de O₂ sont abondantes, l'atome d'oxygène est lui très peu présent. Il ne peut provenir que de la photolyse, en l'occurrence une photodissociation de NO₂ par le rayonnement ultraviolet⁶:



Mais le NO ainsi formé (1) réagit de nouveau avec l'ozone pour reformer très rapidement NO₂ et une molécule de dioxygène :



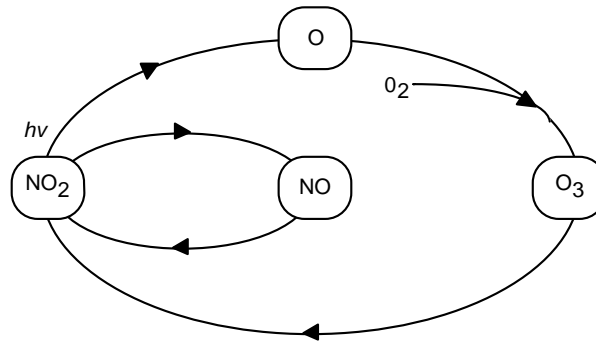
³ D'après Mouvier G., 1994, *La pollution atmosphérique*, Flammarion, Coll. Dominos

⁴ Cette proportion est valable pour une échelle globale et planétaire. Au niveau local, ce phénomène est largement négligeable.

⁵ De manière générique, un polluant est formé par une "source" et détruit par un "puits"

⁶ Longueurs d'ondes inférieures à 400nm

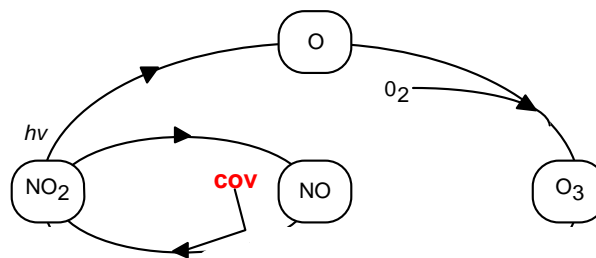
Dans ces conditions et en l'absence d'autres composés, il s'établit alors un état photostationnaire entre O_3 , NO et NO_2 , où l'ozone produit par NO_2 , sa source, est immédiatement détruit par NO, son puits, comme le suggère la figure ci-dessous :



Mais cette série de réactions, nommée cycle de Chapman, constitue un équilibre qui n'est que théorique, car l'atmosphère comporte toujours d'autres éléments susceptibles de rentrer dans le cycle et de perturber l'équilibre, surtout dans les zones urbaines polluées : par exemple en oxydant NO en NO_2 sans consommer d'ozone (réaction 3), ce qui entraîne alors son augmentation.

C'est précisément le rôle que jouent les radicaux⁷ hydroperoxyde (HO_2) et alkylperoxy (RO_2), deux puissants oxydants de NO. Ces radicaux proviennent de la dégradation dans l'air des COV et du monoxyde de carbone, sous l'effet d'un autre radical, le radical hydroxyde (OH), lui-même formé à partir de l'ozone et de la vapeur d'eau sous le rayonnement ultraviolet.

L'action du radical OH déclenche une chaîne complexe de réactions qui conduit à la production de plusieurs molécules d'ozone à partir d'une seule de COV ou de CO. L'intervention des COV a donc court-circuité l'oxydation NO- NO_2 , tel que le présente la figure suivante :



Finalement, de cet ensemble de réactions et de combinaisons, il apparaît que les niveaux de NO_x influencent surtout la quantité d'ozone formé, alors que les COV agissent davantage sur la vitesse des réactions.

1.2. Ozone des villes, ozone des champs

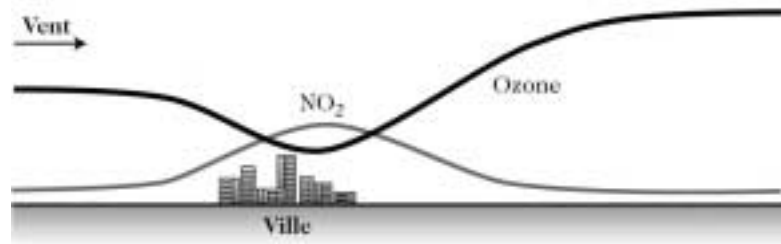
On comprend bien, ainsi, qu'en fonction de la nature des précurseurs et de leurs concentrations relatives dans l'atmosphère, la production ou la destruction d'ozone sera favorisée. Assez classiquement, il découle de cette partition une différenciation de régions plus ou moins propices à la pollution par l'ozone :

- **Les zones urbaines centrales et les bordures d'axes routiers** sont caractérisées la plupart du temps par une rapide destruction d'ozone par les oxydes d'azote, en particulier le NO présent

⁷ Les radicaux libres sont des espèces chimiques dont les électrons périphériques ne sont pas appariés : ils recherchent alors des liaisons, et sont donc très réactifs. Ils jouent un rôle fondamental dans la chimie atmosphérique.

en forte quantité, car régulièrement apporté par des sources d'émissions proches. Dans ces secteurs, les niveaux d'ozone sont donc généralement plus faibles.

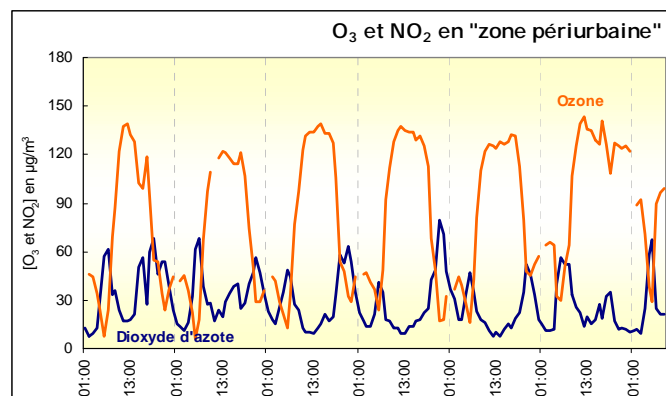
- **Les zones périurbaines** sont sous l'influence de l'apport urbain de précurseurs : il s'y produit des processus de formation et de destruction de l'ozone dont le bilan est en faveur d'un accroissement des niveaux d'ozone par rapport aux zones urbaines centrales. C'est là que sont enregistrés les "pics d'ozone" les plus élevés, à quelques ou plusieurs kilomètres des centres-villes.
- **Les zones "d'altitude"**, ou plus très éloignées des secteurs urbains et périurbains, sont influencées par la dispersion à grande échelle (au niveau continental) des différents précurseurs produits aux échelles urbaine et régionale. Ce sont ces zones qui sont les plus représentatives d'une pollution de fond à l'échelle planétaire, avec des niveaux d'ozone non négligeables.



C'est pourquoi les centres-villes et bordures de grands axes routiers, forts émetteurs de NO_x , sont finalement peu atteints par la présence d'ozone. Par contre, en périphérie des zones urbaines, les quantités de NO_x (produites *in situ* ou aéroportées par le vent) sont suffisantes pour provoquer la formation d'ozone, mais trop peu importantes pour en limiter l'augmentation. A l'échelle d'une agglomération, on peut même retrouver la même configuration dans les espaces verts intra-urbains : "pauvres" en NO_x , ils connaissent des conditions similaires aux zones périurbaines, et enregistrent alors de fortes concentrations d'ozone.

Dans les secteurs les plus affectés, qui sont donc les périphéries d'agglomération et les zones rurales, les mécanismes de formation-destruction de l'ozone ne sont pas identiques et la présence de ce polluant varie en quantité et en durée.

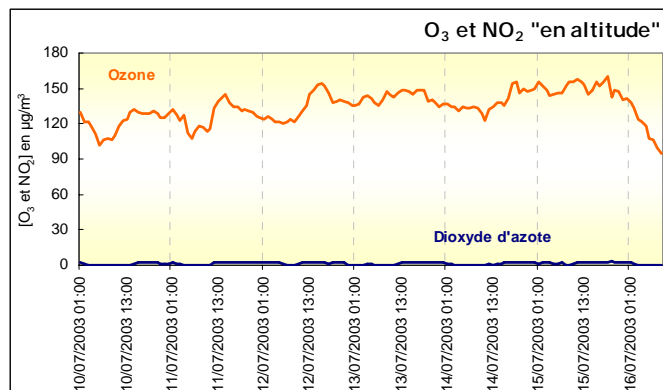
Dans les territoires situés à proximité des agglomérations, les précurseurs sont, nous l'avons vu, présents en quantité importante : la journée, ils contribuent à la formation de l'ozone, puis la nuit à sa destruction. Comme nous le montre le graphe ci-dessous, sous l'effet de ce double mécanisme, l'ozone évolue donc selon un cycle journalier très marqué, avec un pic pouvant être très élevé en milieu d'après-midi, puis des valeurs minimales en cours de nuit, le tout en anticorrélation avec le NO_2 .



Au contraire, dans les secteurs "d'altitude", les taux de polluants primaires restent faibles tout au long de la journée mais également en cours de nuit. Le jour, ils contribuent légèrement à augmenter

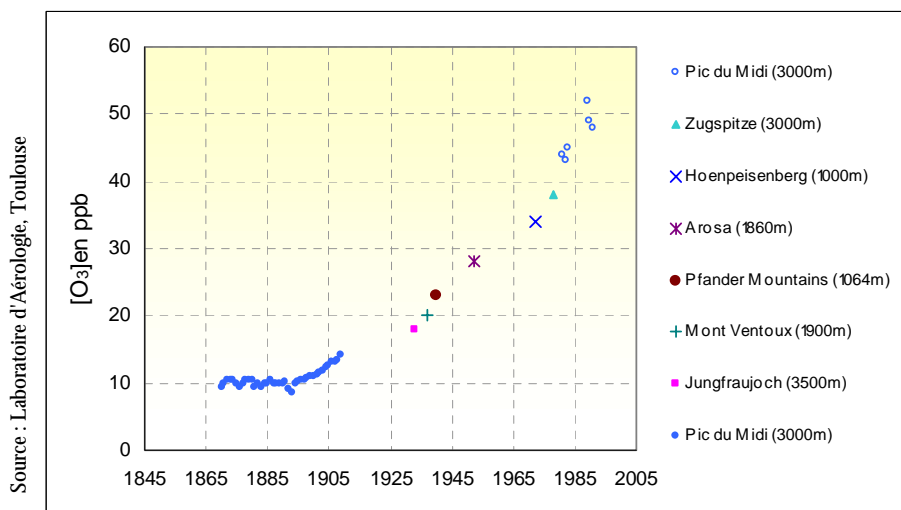
localement les niveaux d'ozone bien que ceux-ci soient très essentiellement gouvernés par les niveaux de fond, présents dans toutes les régions distantes des centres urbains.

La nuit, et c'est là le phénomène majeur propre à ces territoires, les concentrations d'oxyde d'azote sont trop faibles pour détruire l'ozone : leurs sources d'émissions sont trop éloignées, et finalement, le paradoxe consiste à avoir un air qui, appauvri en polluants primaires, induit du coup un air chargé en polluants secondaires, car non détruits. On obtient donc, tel que l'illustre le graphe ci-dessous, des teneurs d'ozone quasi-stationnaires, avec simplement des fluctuations liées à la météorologie (ensoleillement ou pluie).



1.3. Variations sur le long terme

Les zones soustraites de l'influence directe des agglomérations urbaines sont donc de très bons indicateurs des évolutions à long terme de la "contamination" globale de l'atmosphère. Différents travaux scientifiques, synthétisés par la figure ci-dessous, se sont justement attachés à évaluer cette pollution à grande échelle, en instrumentant différents sites européens, tous situés en altitude, dans des zones de montagne éloignées des grandes mégapoles.



Depuis le siècle dernier, on peut constater une élévation nette des niveaux "de fond" en Europe de l'Ouest, à un rythme d'environ +2,4%/an. Ce rythme semble correspondre à celui de l'augmentation des rejets d'oxydes d'azote, les principaux précurseurs de l'ozone.

Cette hausse, à la fois régulière et continue, équivaut à une multiplication par 4 des concentrations d'ozone au cours des 100 dernières années. Elle traduit ainsi très bien les influences des activités humaines sur l'équilibre atmosphérique global, y compris dans les zones a priori non affectées car non pourvues en sources d'émissions polluantes.

1.4. Les effets de l'ozone sur la santé et la végétation

Certains effets aigus de l'ozone sur la santé humaine sont relativement bien connus, notamment ses effets irritants sur les yeux et les voies aériennes supérieures (qui absorbent 40 à 50% de l'ozone inhalé), provoquant toux, inconfort thoracique, et des perturbations de la fonction respiratoire chez les jeunes enfants et les asthmatiques. L'inspiration profonde tend à en exacerber les effets, ce qui inclut les sportifs parmi les populations à risque, et qui, plus globalement, rend l'exercice physique peu compatible avec la présence d'ozone.

Par contre, des interrogations subsistent quant aux effets cellulaires et biochimiques liés aux expositions chroniques à long terme : rien ne permet encore de conclure à l'heure actuelle à sa cancérogénicité pourtant envisageable.

Les végétaux semblent particulièrement sensibles aux concentrations d'ozone. Il a été démontré que l'influence des concentrations d'ozone varie selon les espèces. Certains végétaux très sensibles, comme les plants de tabac, sont même utilisés comme indicateurs de la pollution photochimique. De façon générale, l'ozone agit défavorablement sur le développement des végétaux en altérant le mécanisme photosynthétique et en provoquant des nécroses foliaires. En effet, la plante utilise une partie de son énergie à "désintoxiquer" l'ozone de façon à ce que les lésions qu'il engendre soient "réparées". Il se produit alors une perte de la capacité de la plante à se développer, et de fait, une baisse de rendement sur les espèces cultivées. Ces constats ont été dressés sur des plantes "de plaine", mais il va de soi que les plantes d'altitude sont d'autant plus sensibles en raison des contraintes fortes qu'exerce le milieu montagnard (froid, neige, vent,...).

Par ailleurs, l'ozone accentue le pouvoir acidifiant des oxydes d'azote et du dioxyde de soufre en accélérant leur oxydation en sulfates et nitrates. Signalons enfin que l'ozone accélère la dégradation des matériaux tels que le caoutchouc (craquelures) et les peintures.

1.5. La réglementation dans l'air ambiant

En France, la réglementation applicable en environnement s'appuie aujourd'hui très largement sur les directives européennes. Celles-ci sont conçues sur la base de travaux d'experts issus de la communauté scientifique, et notamment de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) pour la santé humaine.

Dans les faits, sur le territoire national, une directive européenne ne s'applique qu'après sa transcription dans la loi française par décret. En l'occurrence, pour l'ozone, c'est le décret 2003-1085 du 12 novembre 2003 qui fixe la réglementation à respecter : elle apparaît dans le tableau ci-dessous.

Norme	Cible	Valeur à respecter (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Base temporelle pour le calcul
Objectif de qualité	Santé humaine	110	Moyenne sur 8h
Niveau d'information	Santé humaine	180	Moyenne horaire
Niveau d'alerte	Santé humaine	240	Moyenne sur 3h
Objectif de qualité	Végétation	200	Moyenne horaire
Objectif de qualité	Végétation	65	Moyenne journalière

Mais ce décret n'a pas repris l'intégralité des termes fixés par la directive communautaire 2002/3/CE du 12 février 2002 qui envisageait les futures échéances d'évolution de cette réglementation. Voici les autres éléments qu'elle contient, et qui, pour l'heure, n'ont pas encore été officialisés en droit français mais qui devraient l'être dans les années à venir :

Norme	Cible	Valeur à respecter (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Base temporelle pour le calcul	Applicable en
Objectif de qualité	Santé humaine	120	Moyenne sur 8h	2010
Objectif de qualité	Végétation	18 000	AOT40 ⁸	2010
Objectif à long terme	Végétation	6 000	AOT40 ¹	2020

⁸ AOT40 (Average Over Threshold 40) signifie la somme des différences entre les concentrations horaires supérieures à $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ (40ppb) et $80\mu\text{g}/\text{m}^3$, durant une période donnée en utilisant seulement les valeurs sur 1 heure mesurées quotidiennement entre 8h00 et 20h00.

2. LES RESERVES NATURELLES DE HAUTE-SAVOIE : UN LABORATOIRE GRANDEUR NATURE

2.1. Pourquoi mesurer l'ozone dans un espace protégé ?

Il peut apparaître surprenant de s'attacher à mesurer les teneurs d'ozone dans un espace *a priori* préservé des influences des activités humaines. Mais nous venons de voir que l'ozone était un polluant particulier, au mode de formation complexe et à la répartition géographique atypique.

Par ailleurs, l'écosystème alpin est connu pour être fragile et sensible : les contraintes écologiques (durée d'ensoleillement, température de l'air, hygrométrie, rayonnement solaire,...) pèsent sur le milieu, et faune et flore doivent s'adapter. La pollution atmosphérique est donc susceptible de jouer un rôle perturbateur important et de déstabiliser ainsi un équilibre précaire.

Air-APS, lors d'investigations précédentes, avait pu noter des concentrations d'ozone remarquables dans des espaces analogues à ceux des réserves naturelles gérées par ASTERS. La cartographie conduite à l'échelle de la région Rhône-Alpes avait montré les plus fortes teneurs moyennes durant l'été 2002 dans l'ensemble des zones naturelles, et particulièrement dans les zones d'altitude.

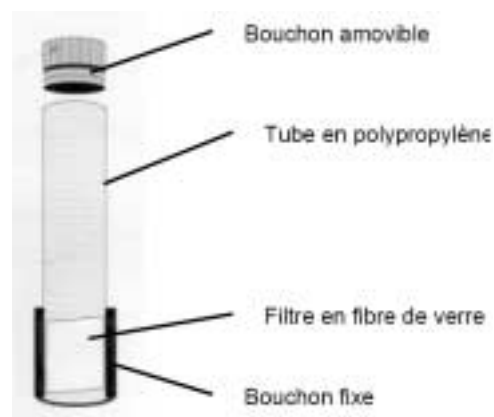
D'autre part, les mesures pratiquées lors des périodes d'observations intensives (POI) du programme POVA sur des sites comme le Col des Montets (1400m) ou le Plan de l'Aiguille (2300m) avaient toutes témoigné de niveaux d'ozone important, et ce, en hiver comme en été.

2.2. Protocoles de mesure

Pour répondre aux objectifs initiaux de cette étude, la méthodologie a dû s'adapter aux contraintes inhérentes à la mesure en milieu naturel, à savoir la difficulté d'un raccordement électrique habituellement nécessaire au fonctionnement d'analyseurs de la qualité de l'air. Deux approches ont donc coexisté.

2.2.1. Les capteurs passifs

La méthode des "capteurs passifs" offre une alternative intéressante pour la mesure en site "naturel". Bien qu'il ne permette pas de restituer heure après heure les variations des polluants, ce dispositif fournit malgré tout, et à faible coût, des valeurs de pollution "accumulée" pendant le temps d'exposition du capteur. De plus, il permet d'obtenir une bonne estimation des concentrations d'ozone, dans la mesure où elles évoluent peu au cours d'une journée. Ici, des "tubes à diffusion passive" ont été acquis auprès de la société suisse "PASSAM AG" qui assure à la fois la fabrication et l'analyse après exposition.



Ces capteurs passifs se présentent tout simplement sous la forme de "tubes" en polypropylène, contenant à leur base un filtre en fibre de verre imbibé d'un réactif : le (1,2)-di-4-pyridiléthylène (DPE). Lorsque que l'on ôte le bouchon amovible (le rouge sur la photo), les molécules d'ozone qui entrent dans le tube vont s'y diffuser et aller "s'accumuler" sur le filtre.

Le réactif contenu dans les tubes étant sensible à la lumière et à l'humidité, il est nécessaire de placer les tubes dans des boîtes qui les protègent de la pluie et de la lumière tout en conservant une bonne aération. Avant et après l'exposition, les tubes sont à conserver au réfrigérateur pour éviter l'évaporation, dans un premier temps, du réactif puis ensuite de l'ozone qui s'est accumulée durant la période d'exposition. Dans cette étude, il a été décidé de placer 3 tubes par boîte, afin d'éviter les risques de valeurs aberrantes : c'est la moyenne des 3 tubes qui fournit la concentration d'ozone sur chaque site.



Ce type de protocole a été utilisé sur quatre sites de mesures, localisés en des lieux dépourvus d'alimentation électrique. Les capteurs passifs ont été implantés pour une durée d'une semaine, et ce, durant 8 semaines consécutives du 28 juin au 23 août 2004. Le personnel d'ASTERS s'est chargé de la pose-dépose des capteurs lors de chaque période, et les gardiens de refuge (Sales, Moëde) ont également été sollicités.

Sur un des quatre sites, Plan Praz, l'opération s'est poursuivie jusqu'au 23 mai 2005, soient 46 semaines de mesure : les prélèvements ont été assurés par Patrick Perret, garde ASTERS en été et pisteur-secouriste à la Compagnie du Mont-Blanc en hiver.

2.2.2. Les analyseurs en continu



Ils constituent la méthode la plus efficace, la plus fiable et la plus évoluée pour mesurer les concentrations de l'ozone dans l'air ambiant. Mais leur mise en œuvre est également la plus contraignante en sites naturels : ces appareils coûteux, "volumineux" et fragiles requièrent une alimentation électrique et une climatisation nécessaire à assurer leur fonctionnement dans une plage de températures optimales, l'ensemble du dispositif devant être abrité dans une "cabine mobile" (cf photo).

En contrepartie de ces inconvénients, ce système de mesure délivre une donnée tous les quarts d'heure et permet alors de suivre les évolutions temporelles des polluants.

Lors de cette investigation dans les Réserves de Haute-Savoie, Air-APS a développé sur le terrain 2 analyseurs en continu, sur deux sites étagés en altitude, en complément de celui déjà disponible en fond de vallée dans la station fixe de surveillance de Chamonix.

La présence de téléphériques dans la vallée de Chamonix a permis l'acheminement de ce matériel et son raccordement électrique aux installations existantes. L'investigation a débuté le 1^{er} juillet 2004 et a perduré jusqu'au 5 septembre 2004.

2.2.3. Les sites investigués

Compte-tenu des atouts et inconvénients décrits ci-dessus pour chaque type de protocole, l'ensemble des moyens a été développé pour offrir une bonne vision des variations attendues de l'ozone dans les réserves naturelles de Haute-Savoie.



Les capteurs passifs ont été utilisés pour déterminer les variations spatiales "horizontales" de l'ozone, et ils ont été répartis sur les 4 sites suivants :

Sales : 1880m, dans la réserve de Sixt-Passy, commune de Sixt-Fer-à-Cheval

Moëde-Anterne : 2000m, dans la réserve de Passy, commune de Passy

Plan Praz : 2050m, en bordure de la réserve des Aiguilles Rouges, commune de Chamonix

Col des Montets : 1500m, dans la réserve des Aiguilles Rouges, commune de Chamonix

Les analyseurs en continu ont été installés en tenant compte avant tout du critère altitudinal, pour offrir la possibilité d'évaluer les variations de l'ozone selon un "transect" vertical, partant du fond de vallée et allant jusqu'à un point haut (en tenant compte des critères déjà évoqués plus haut, à savoir le recours obligatoire à une alimentation électrique) :

Chamonix : 1040m, au centre-ville de la commune de Chamonix

Lognan : 1980m, gare intermédiaire du téléphérique des Grands Montets, commune de Chamonix

Grands Montets : 3290m, gare supérieure du téléphérique des Grands Montets, commune de Chamonix

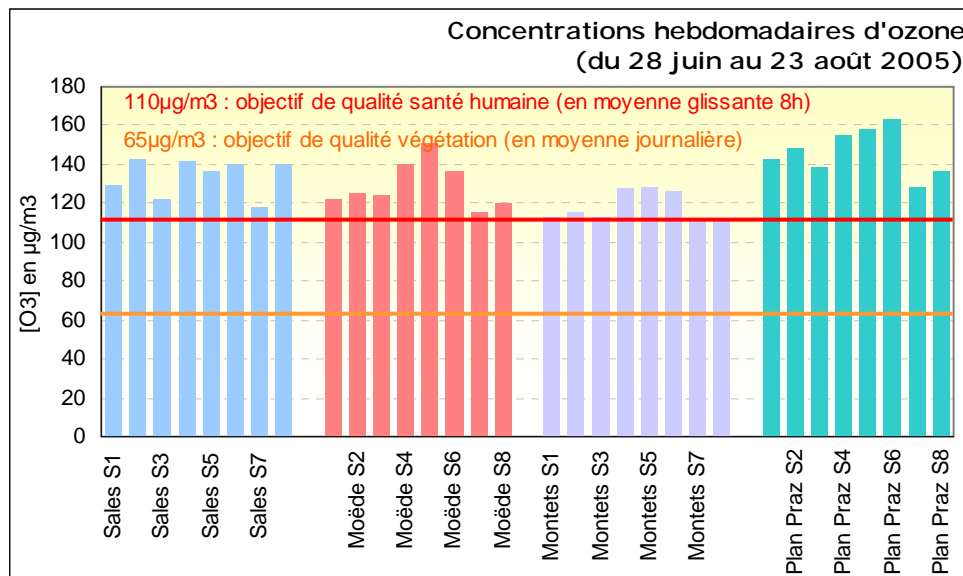


3. RESULTATS

3.1. Répartition horizontale (capteurs passifs)

3.1.1. Investigations estivales

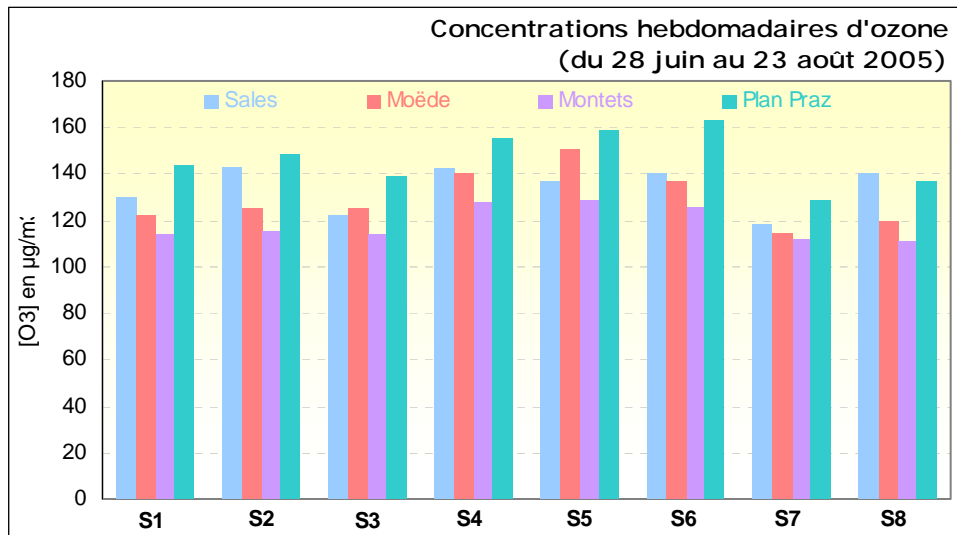
La première phase de l'étude a permis de collecter 8 semaines de mesure d'ozone sur 4 sites différents. Les résultats apparaissent sur le graphe suivant, où chaque "barre" de l'histogramme correspond à la concentration d'ozone obtenue après une semaine d'exposition des capteurs passifs :



Avant d'examiner plus en détail la variabilité intra et inter-sites, le constat le plus évident réside dans le non respect de la réglementation, bien que celle-ci s'applique normalement à un pas de temps plus court... En effet, les seuils de protection de la santé humaine et de la végétation correspondent respectivement à une valeur moyenne sur 8 heures ($110\mu\text{g}/\text{m}^3$) et à une moyenne sur 24 heures ($65\mu\text{g}/\text{m}^3$). Or, ici, on voit que sur un pas de temps beaucoup plus long (7 jours), ces deux références réglementaires sont allègrement dépassées, sur tous les sites et sur l'intégralité de la campagne de mesure...

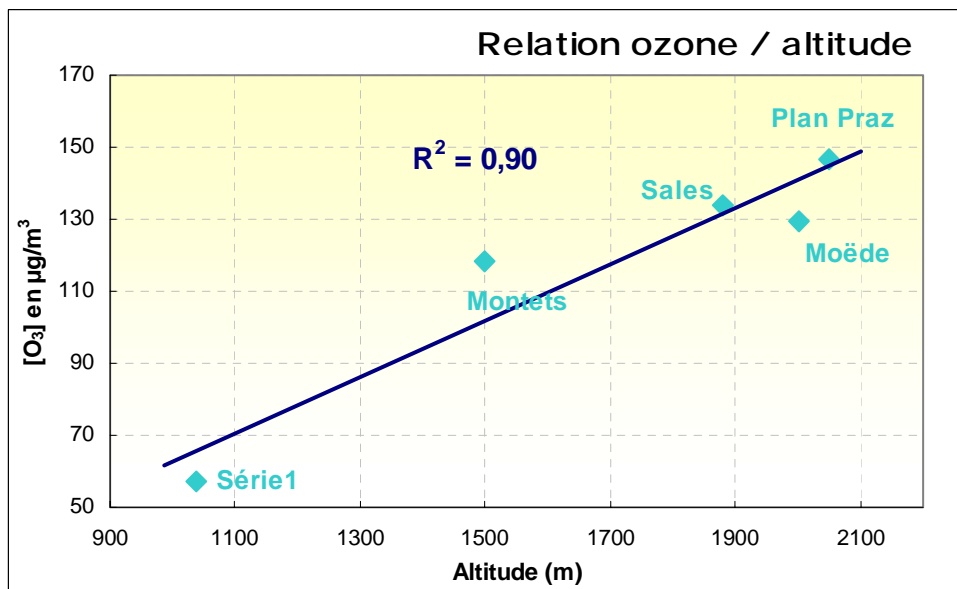
NB : sans vouloir atténuer la portée d'un tel constat, il importe malgré tout de signaler dès à présent que ces affirmations doivent être interprétées avec nuance à ce stade du rapport : en effet, la mesure par capteurs passifs comporte quelques écueils sur lesquels nous reviendrons ultérieurement en détail.

Sur un même site, d'une semaine à l'autre, les fluctuations des concentrations sont attribuables aux variations des conditions météo : c'est généralement la pluie, qui, par son pouvoir de "lessivage" de l'atmosphère, permet d'abaisser sensiblement les niveaux d'ozone, avant que le retour du beau temps ne permette la reconstitution d'une accumulation progressive.



Quant à la différence des taux d'ozone constatée entre les différents points de prélèvement, une hiérarchie s'impose semaine après semaine : Plan Praz, le site dont l'altitude est la plus élevée, a toujours enregistré les concentrations les plus fortes. Ensuite, c'est le site du vallon de Sales qui a témoigné des niveaux les plus importants, même si en semaine 3 et 5, le site de Moède-Anterne "lui a ravi" cette seconde place. Enfin, le site de plus basse altitude, celui du col des Montets, a toujours connu les concentrations les plus "faibles" bien que, rappelons-le, celles-ci aient dépassé à chaque fois les valeurs réglementaires.

L'étagement altitudinal semble donc être le critère numéro 1 pour expliquer la variabilité de l'ozone, le graphe ci-dessous le montrant de manière assez nette :



Bien que le nombre de sites soient trop peu élevés pour affirmer une causalité directe, la liaison statistique entre concentration d'ozone et altitude est toutefois importante comme en témoigne ce coefficient de détermination de 0,9.

Deux phénomènes peuvent *a priori* expliquer cette augmentation constatable avec l'altitude :

- l'éloignement croissant avec les secteurs de basse altitude où sont généralement produits les polluants primaires est souvent un gage de la faible présence de ces derniers. De fait, plus on monte en altitude plus leurs concentrations en polluants primaires diminuent et deviennent ainsi de moins en moins efficaces pour initier la destruction nocturne de l'ozone.

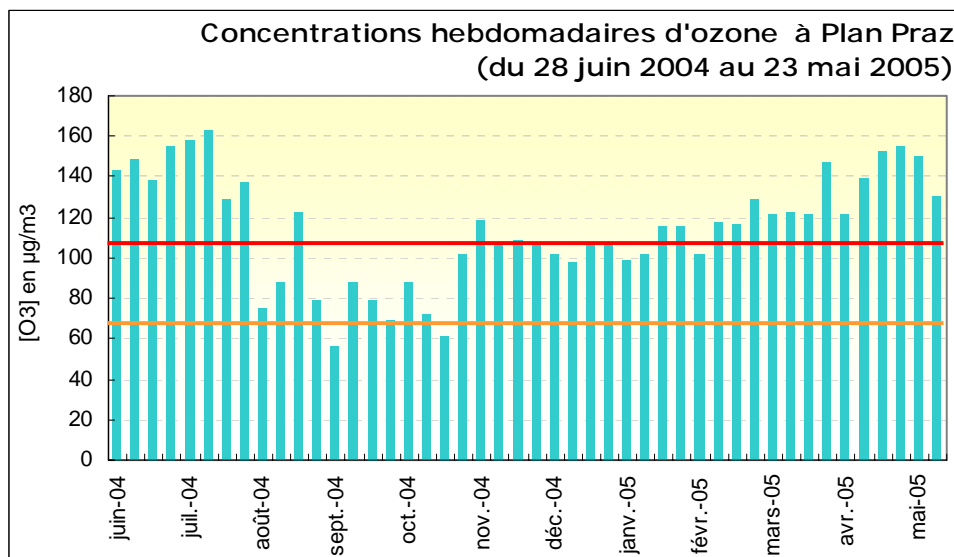
- l'augmentation de l'altitude signifie aussi un ensoleillement plus important, et notamment une présence plus marquée des rayons UV. Ceux-ci sont alors plus opérants pour favoriser, par photochimie, la part d'ozone qui pourrait être formée localement en cours de journée (en plus des apports longue distance).

Toutefois, il faut bien se garder de penser que l'ozone augmente de manière continue avec l'altitude : la suite du rapport nous montrera qu'un effet de seuil, quoique difficile à localiser, se manifeste au-delà de 2000m.

3.1.2. Suivi annuel

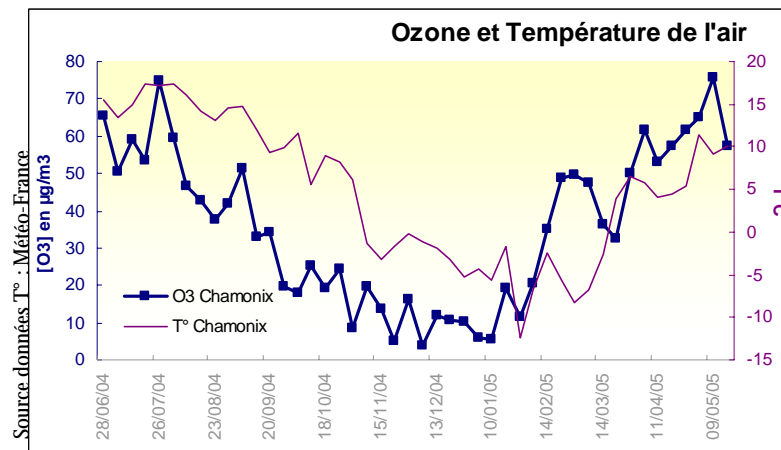
Au-delà de la campagne estivale 2004, le site de Plan Praz a continué d'être instrumenté : les prélèvements se sont poursuivis sur le même rythme hebdomadaire, jusqu'au printemps 2005, constituant ainsi une très longue série de mesure.

Le graphe ci-dessous montre les résultats acquis, et l'on constate combien, en altitude, les niveaux peuvent restées élevés, même en hiver.

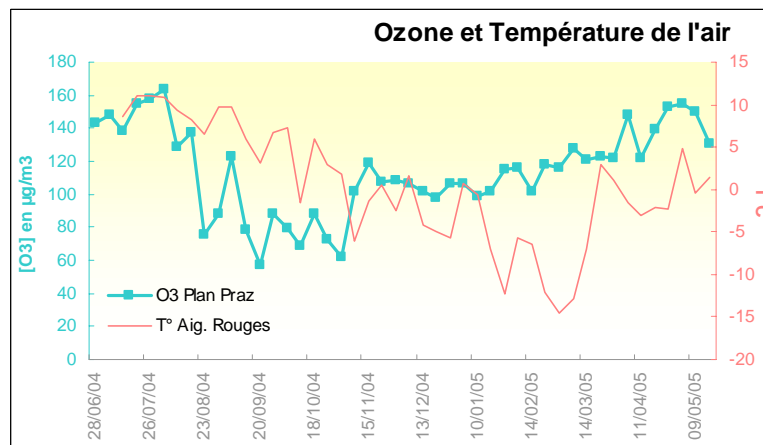


Seules 2 semaines, en début d'automne, ont enregistré des niveaux inférieurs au seuil de protection de la végétation, et l'on a retrouvé des niveaux supérieurs au seuil de protection de la santé humaine dès le mois de février... Quand on connaît le mode de formation de l'ozone, les taux rencontrés à Plan Praz révèlent que son origine ne peut pas être locale : les conditions hivernales d'ensoleillement et de température à 2000m ne correspondent absolument pas aux "critères" estivaux de formation de l'ozone. Cela montre bien qu'en altitude, l'ozone est, certes, présent mais non pas formé localement : l'ozone de Plan Praz est donc bien réel, mais il est très majoritairement "apporté" et non pas "produit" *in situ*.

Cela se constate également en confrontant les variations de l'ozone aux variations de la température : ci-dessous, à Chamonix, les concentrations d'ozone (récoltées par analyseur automatique dans la station de surveillance permanente du centre-ville) sont nettement dépendantes de la température de l'air qui gouverne, tout au long de l'année, la formation de l'ozone en fond de vallée.



Par contre, si l'on confronte les teneurs en ozone de Plan Praz aux températures récoltées tout près de là sur la station Météo-France des Aiguilles Rouges (Alt. 2300m, lacs des Cheserys), on constate une indépendance entre ces deux variables :



A l'automne, les concentrations d'ozone semblent entamer une diminution en même temps que les températures. Mais assez rapidement, dès le début de l'hiver, au moment où les grandes périodes de froid s'installent, on voit dans le même temps que l'ozone retrouve des niveaux de concentration au-delà de $100\mu\text{g}/\text{m}^3$: celles-ci vont ensuite demeurer très stables et se "désolidariser" complètement du paramètre "température", alors que celui-ci est traditionnellement connu pour les influencer grandement.

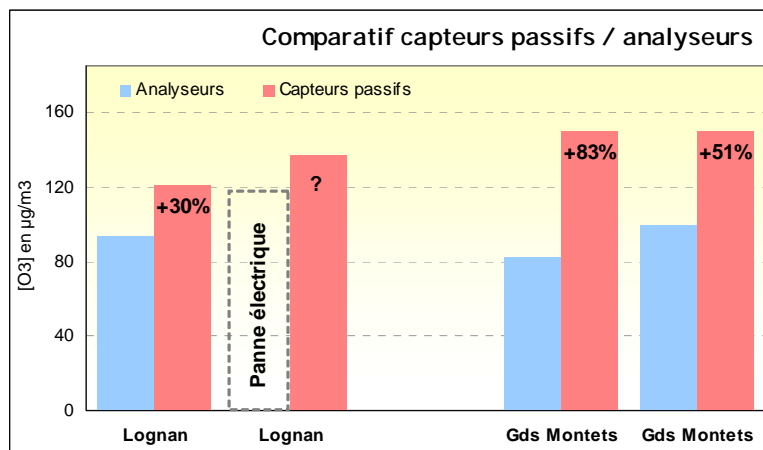
3.1.3. Les limites de la mesure par capteurs passifs...

Les enseignements apportés lors de ces investigations par capteurs passifs paraissent très riches et particulièrement "spectaculaires" : ils semblent attester d'un dépassement quasi-permanent des niveaux réglementaires en ozone et montreraient en cela l'altération que subiraient à la fois la végétation et la santé humaine.

Mais pour autant, cette méthode de mesure par capteurs passifs n'est pas aussi robuste qu'une mesure homologuée par analyseur en continu. Malgré toutes les garanties offertes par la société PASSAM AG qui les fabrique et les analyse (Passam AG est accréditée ISO 17025), malgré de nombreux organismes français et européens ayant opté pour ce protocole, il nous est apparu opportun de procéder à une phase de test pour évaluer la fiabilité des mesures obtenues par capteurs passifs en milieu naturel. En effet, leur usage est habituellement réservé aux environnements "pollués" que constituent les aires urbaines et périurbaines où ils se sont montrés jusqu'alors plutôt très performants.

Un doute subsistait, en effet, quant à leur capacité de résister aux conditions climatiques spécifiques aux zones montagneuses (vent, froid, neige,...) sans que la mesure de l'ozone en soit altérée. Profitant de la

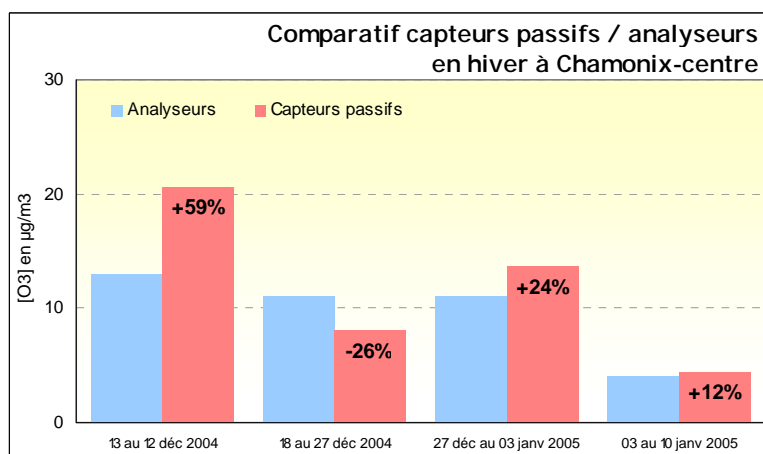
présence exceptionnelle d'analyseurs en continu sur le secteur de Lognan et des Grands Montets, des capteurs passifs ont été mis en doublon durant 2 x 1 semaine au mois d'août 2004 afin de comparer les mesures obtenues avec les deux protocoles :



Même si la seconde semaine de comparaison sur le site de Lognan nous prive des valeurs de l'analyseur en raison d'une panne électrique, force est de constater la très nette surestimation de la mesure par capteurs passifs, puisque les analyseurs, régulièrement vérifiés et étalonnés, offrent une mesure de référence incontestable.

Les écarts sont malheureusement très importants (au moins 30%) et en plus, non répétables : +83% la 1^{ère} semaine puis +51% la 2^{ème} semaine aux Grands Montets. Du coup, et même si 2 semaines d'intercomparaison auraient été de toutes façons insuffisantes, le calcul puis l'intégration d'un facteur correctif ne sont pas du tout envisageables pour recalibrer les données produites par les capteurs passifs.

L'hypothèse du froid comme facteur explicatif a été envisagée : il peut potentiellement perturber la mesure en altérant les fonctions absorbantes du réactif contenu dans le tube. C'est pourquoi une autre série d'intercomparaison a été mise en œuvre durant 4 x 1 semaine, entre décembre et janvier, à une période où les températures restent négatives durant plusieurs jours consécutifs. Cette fois, l'expérience s'est déroulée sur la station fixe de Chamonix-centre (1040m) :



Encore une fois, la variabilité et la non-répétabilité des écarts restent problématiques : de +59% à -26%, les différences sont trop importantes pour que l'on puisse les traduire en facteur correctif. Pourtant, on peut constater, certes malgré de fortes différences, que l'ordre de grandeur est bien retranscrit : en hiver, au centre de Chamonix, les teneurs en ozone sont faibles et même si elles ne sont pas toujours proches des valeurs fournies par l'analyseur, les concentrations apportées par les capteurs passifs sont elles aussi très faibles. Cette méthode n'est donc pas totalement défailante et permet d'apprécier l'ordre de grandeur des concentrations d'ozone.

C'est plus probablement la présence de polluants "perturbateurs" qui peut expliquer les différences constatées. En fait, un analyseur ne mesure "que" l'ozone alors qu'un capteur passif peut également intégrer comme étant de l'ozone toute une série d'autres polluants oxydants, présents chacun à l'état de trace, mais qui peuvent affecter la mesure globale. L'ozone est ainsi l'indicateur de ce type de pollution formée par processus photochimiques, il en constitue les 9/10^{èmes}, mais on retrouve également des peroxyacélnitrates (dont le PAN), des aldéhydes, des acides organiques, l'acide nitrique (HNO₃), tous formés par la réaction des NO_x et des COV sous l'effet du rayonnement ultraviolet.

La société PASSAM AG, avec qui nous avons eu de nombreux échanges suite à cet exercice d'intercomparaison, considère cette éventualité de sensibilité croisée avec les oxydants comme la seule explication aux disfonctionnements constatés.

Mais alors, cela signifie-t-il que nous devons reconsidérer l'ensemble des prélèvements effectués entre 2004 et 2005 par capteurs passifs dans les réserves naturelles de Haute-Savoie ? Non, mais ils doivent être interprétés avec prudence et nuance :

- les concentrations obtenues, notamment en période estivale, sont visiblement surévaluées. Dès lors, bien qu'elles dépassent nettement les valeurs réglementaires, il devient difficile de leur accorder tout le crédit nécessaire pour conclure définitivement sur un non-respect de la réglementation. Cependant, la seconde partie des mesures, par analyseurs, va nous montrer que ce point reste critique.
- si en valeur absolue les concentrations semblent à considérer avec précaution, en revanche, leurs variations dans le temps et entre sites de mesures apportent de sérieux enseignements, totalement valides. L'augmentation avec l'altitude, la présence hivernale de niveaux importants constituent des apports irréfutables et intéressants.

Au final, il convient de s'accorder pour dire que si l'expérience devait être reconduite pour mesurer l'ozone en milieu naturel, la méthode des capteurs passifs, malgré ses avantages indéniables de simplicité et de faible coût, manque de robustesse (nous en reparlerons en conclusion, mais la technologie des micro-capteurs sera vraisemblablement l'outil de l'avenir dans ce domaine).

En attendant, les méthodes "classiques", mais plus lourdes, par analyseurs en continu, demeurent le moyen le plus fiable et le plus riche pour investiguer la pollution de l'air.

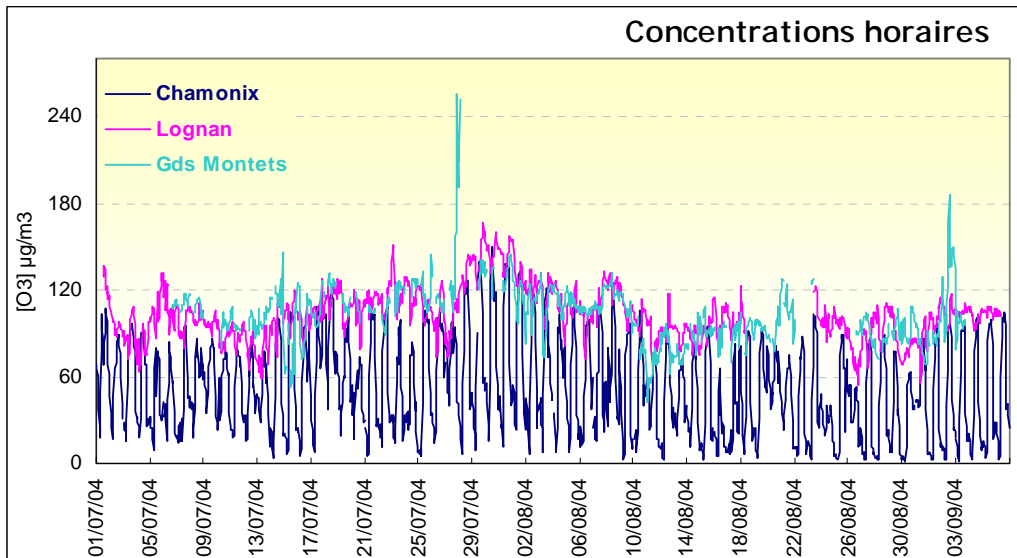
3.2. Répartition verticale (analyseurs automatiques)

ATTENTION

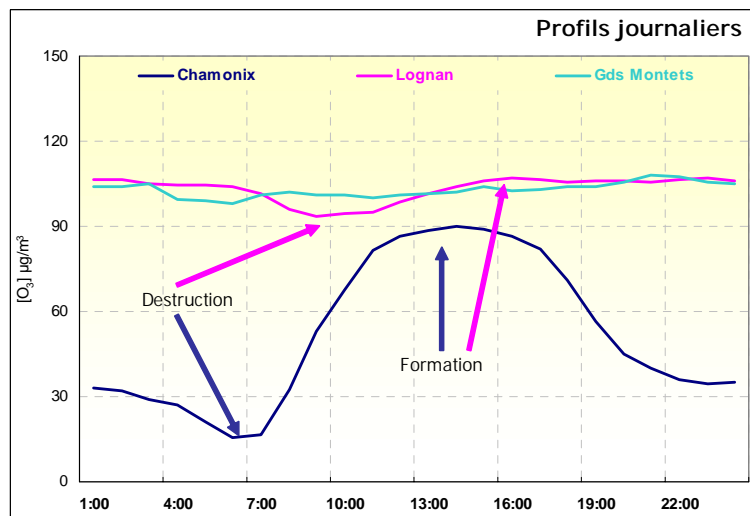
Comme l'exige la Directive 2002/3/CE du parlement européen et du conseil du 12 février 2002 relative à l'ozone dans l'air ambiant, les résultats sont exprimés en µg/m³ avec l'expression du volume ramenée aux conditions de température et de pression suivante 20°C et 101325 Pa.

Toutefois, pour des mesures en altitude, ces valeurs de référence sont très éloignées des valeurs moyennes rencontrées au cours d'une année et ne sont donc pas représentatives des sites. De ce fait, les résultats présentés dans ce rapport surestiment les valeurs observées aux températures et pressions qui règnent en altitude. Une demande de dérogation est en cours pour prendre en compte dans la réglementation la spécificité de nos zones d'altitude.

Deux analyseurs automatiques ont donc été installés en juillet et août 2004 aux abords des téléphériques de Lognan (1980m) et des Grands Montets (3290m) : les gares d'arrivées de ces installations ont permis de fournir l'alimentation électrique indispensable au fonctionnement de ces appareils (même si en raison de la foudre, de nombreuses coupures ont perturbées le recueil des données). En fond de vallée, l'analyseur de la station du centre-ville de Chamonix (1040masl) a complété ce dispositif permettant de reconstituer la distribution verticale de l'ozone dans une zone de montagne.



On constate avant tout le net décalage entre les allures différentes des 3 courbes : celle de Chamonix oscille quotidiennement avec une forte amplitude de 0 à 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ environ, alors que celles de Lognan et des Grands Montets sont beaucoup moins fluctuantes et restent quasi stables aux environs des 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, bien que l'on voit très nettement deux "accidents" dans cette régularité aux Grands Montets, en milieu puis en fin de période. Avant de revenir sur ce point particulier, l'examen des profils moyens journaliers se révèle très parlant :



A Chamonix, on retrouve très clairement un profil de site urbain, avec une production d'ozone le jour, et une destruction la nuit, ce qui induit une valeur maximale en milieu d'après-midi aux alentours de 14h00UTC⁹, soient 16h00 locales, et des minima en fin de nuit, avant le lever du soleil.

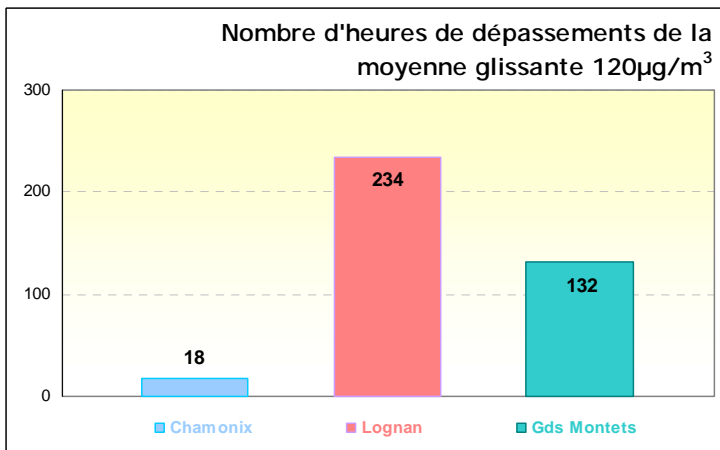
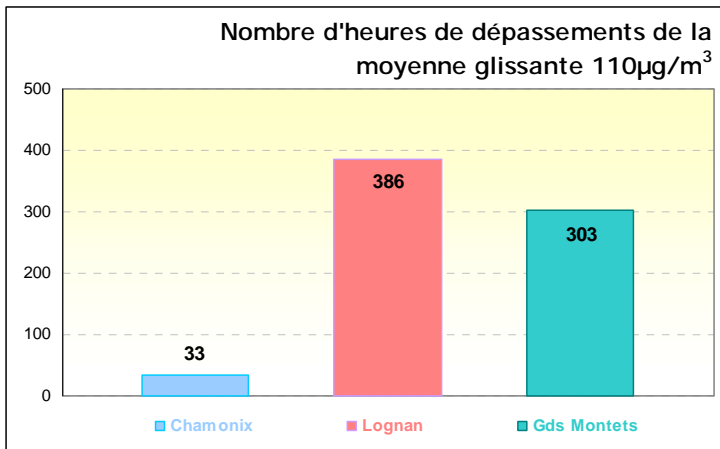
En altitude, la rythmicité quotidienne est bien différente et correspond à des cycles typiques des sites éloignés des émissions polluantes : les niveaux sont stables de jour comme de nuit et restent ainsi en permanence supérieurs à ceux mesurés en fond de vallée (même lors de leur maximum). Les concentrations sont quasi équivalentes à 1980 et 3290m : la seule différence peut éventuellement résider dans un "pseudo-minimum" en fin de matinée, assorti d'un "pseudo-maximum" en fin d'après-midi à Lognan. Ce site d'altitude moyenne matérialiserait en cela les influences marginales d'émissions de précurseurs locaux qui seraient actifs :

- dans le courant de la matinée pour engager les prémisses d'une destruction de l'ozone (alors que le soleil n'a pas encore atteint ce versant exposé au Nord)
- en fin d'après-midi pour initier une légère formation au moment où l'ensoleillement est maximal.

⁹ UTC : Unité de Temps Coordonnée, qui correspond en France à l'heure solaire, c'est-à-dire l'heure légale -2heures en été et -1heure en hiver

3.2.1. Réglementation et santé humaine

La réglementation applicable a été présentée dans le paragraphe 1.5. Les graphes ci-dessous vont nous permettre de constater combien la situation en altitude est problématique vis-à-vis du respect des différentes normes (à lire sous l'éclairage de l'encart ATTENTION de la page 18) :



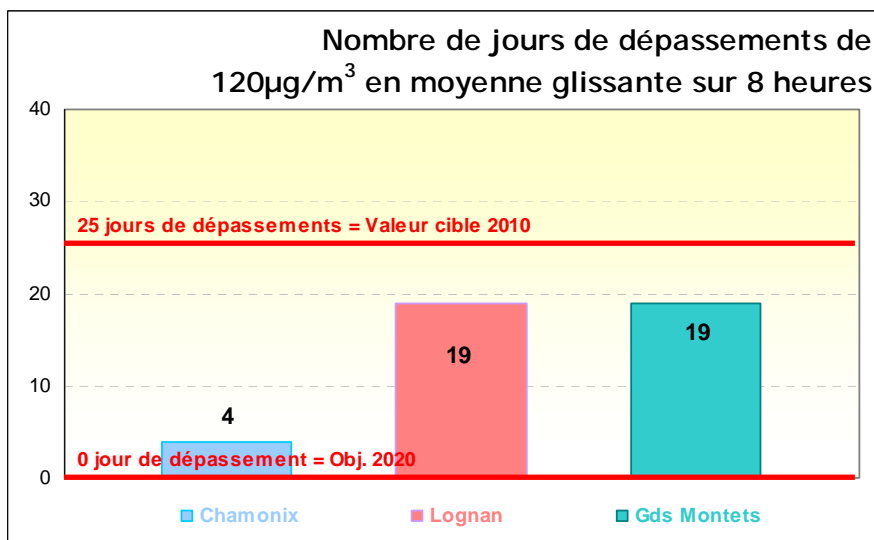
Concernant la santé humaine tout d'abord, le nombre d'heures où la moyenne sur 8 heures¹⁰ a dépassé 110 et même 120µg/m³ est très important.

En tout juste 2 mois d'investigations, ce sont plus de 300 heures qui ont dépassé l'actuel objectif de qualité (110µg/m³) sur les 2 sites d'altitude, ce qui correspond environ à 10 fois la proportion observée en fond vallée.

Notons pour être précis que le nombre d'heures plus faible aux Grands Montets par rapport à Lognan n'est pas lié à un quelconque phénomène physico-chimique, mais à de fréquentes coupures électriques aux Grands Montets ayant occasionné un taux de fonctionnement d'à peine 60%.

Toutefois, traduit en nombre de jours où un dépassement de l'objectif de qualité 120µg/m³ a été constaté, on voit, comme nous le montre le graphe ci-dessous, que ce nombre s'élève à 19 entre juillet et août 2004. La norme prévue à l'horizon 2010

ne tolérera ce dépassement que 25 jours dans l'année, et cette tolérance s'abaissera à 0 jours en 2020...



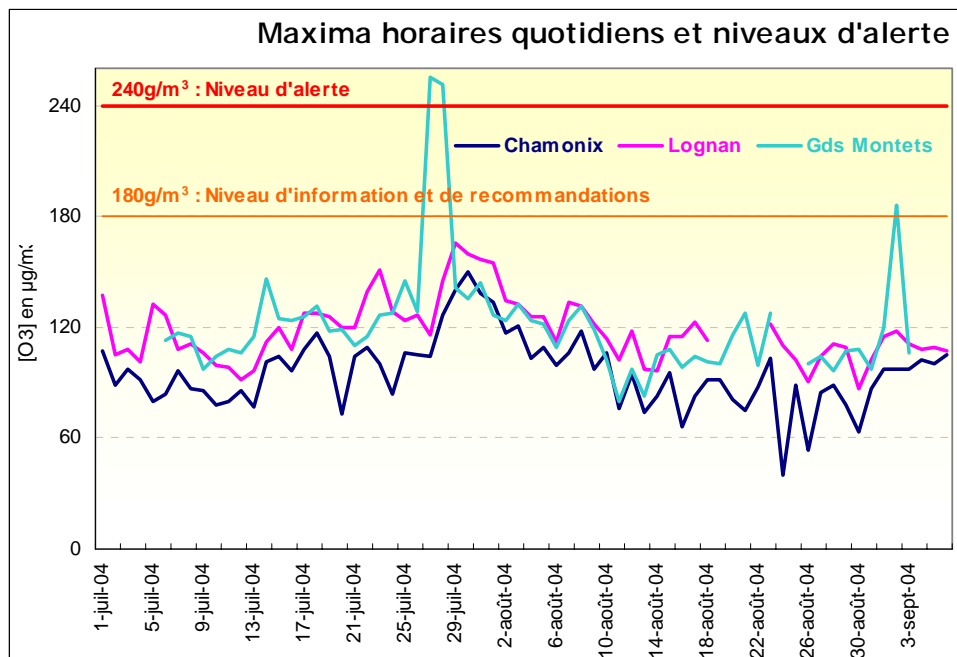
Et comme les mesures par capteurs passifs nous ont montré, malgré leurs déficiences, que les fortes teneurs en ozone pouvaient régner y compris en dehors de la période estivale, il y a tout lieu de penser qu'il est absolument impossible de parvenir à respecter cette réglementation.

A Chamonix-centre, cette future norme ne serait pas respectée non plus, mais dans des proportions nettement moindre, en raison de la

destruction nocturne de l'ozone qui ramène quotidiennement les concentrations à des niveaux acceptables pour la santé humaine.

¹⁰ La réglementation parle de valeurs calculées à partir d'une "moyenne glissante sur 8 heures". Autrement dit, chaque heure, on calcule la moyenne relevée durant les 8 heures précédentes : on obtient donc 24 moyennes glissantes par jour. On peut alors ensuite en déduire un nombre d'heures ou de jours durant lesquels le seuil de 110 ou 120µg/m³ en moyenne sur 8 heures a été dépassé.

En plus des objectifs de qualité, le graphe suivant nous apprend également que la situation peut-être critique en ce qui concerne les mesures d'urgence :



Habituellement réservés aux grandes agglomérations et à leurs périphéries, les pics d'ozone, peuvent visiblement atteindre également les zones d'altitude. Sur les 2 mois de mesures, aux Grands Montets, on a connu 3 jours avec dépassement du niveau d'informations et de recommandations sanitaires, dont 2 ayant même atteint le niveau d'alerte...

Il faut rappeler ici que le niveau d'information et de recommandations sanitaires correspond à un taux de pollution pour lequel des effets immédiats sur la santé des personnes fragiles (insuffisants respiratoires, jeunes enfants, personnes âgées,...) sont probables, et que ce risque se généralise à l'ensemble de la population lorsque le niveau d'alerte est atteint : c'est d'ailleurs pour cela que des mesures sont prises là où réside la population. Et pour gérer au mieux ces épisodes lorsqu'ils surviennent, un arrêté préfectoral définit les dispositions immédiates à mettre en œuvre dans l'heure suivant leur constat :

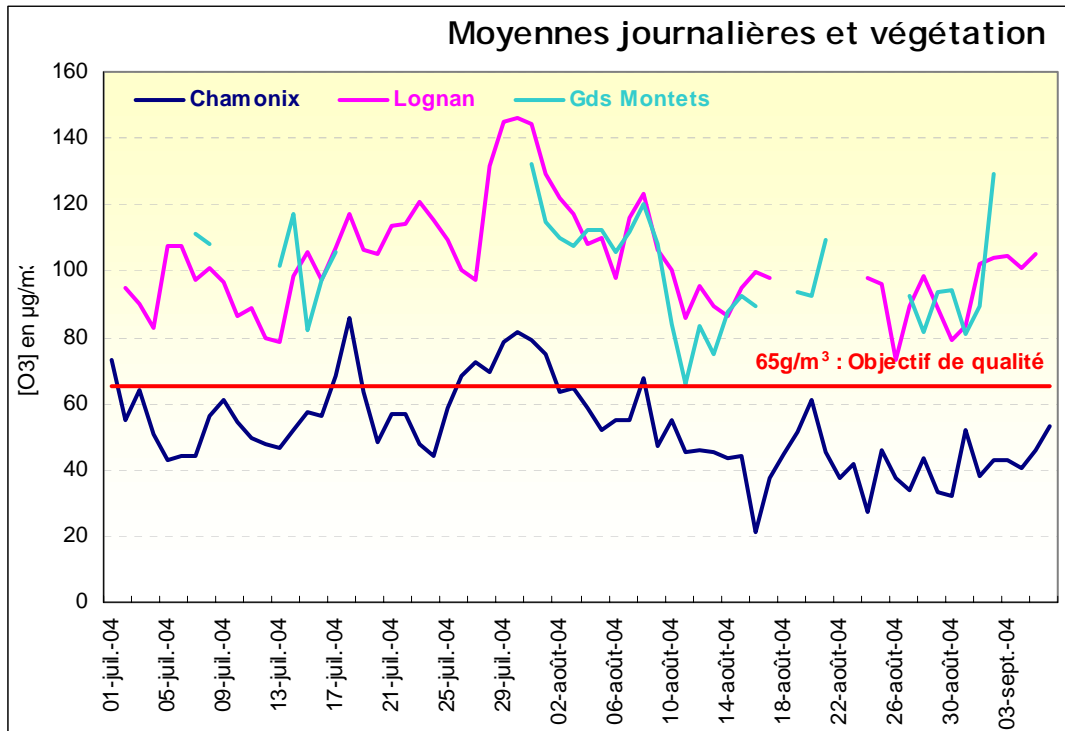
- information de la population et diffusion d'un message de recommandations sanitaires et comportementales (s'abstenir de pratiquer des activités physiques intenses, adopter une conduite automobile souple, diminuer sa vitesse, utiliser des moyens de transports "doux", ...)
- puis, lorsque le niveau d'alerte est atteint, la recommandation devient obligation et le préfet impose alors la diminution de vitesse de 20km/h, voire des restrictions de circulation telle que la circulation alternée si la situation continue de se détériorer

Autrement dit, si les concentrations d'ozone enregistrées au sommet de l'aiguille des Grands Montets les 27 et 28 juillet avaient été mesurées sur une station de surveillance d'une grande ville, elles auraient nécessité la mise en application d'une procédure d'urgence, afin de préserver la santé de la population.

Il est intéressant de noter que ces pics ayant totalisé 9h00 au-dessus du seuil de $180\mu\text{g}/\text{m}^3$ n'ont été relevés qu'à 3290m et non pas à Lognan, à 1980m, et encore moins à Chamonix à 1040m : ce point fera l'objet d'un prochain paragraphe sur lequel nous reviendrons ultérieurement, puisqu'il nécessite quelques éclaircissements complémentaires.

3.2.2. Réglementation et végétation

La réglementation se rapportant à la protection de la végétation et les écosystèmes est également loin d'être respectée.

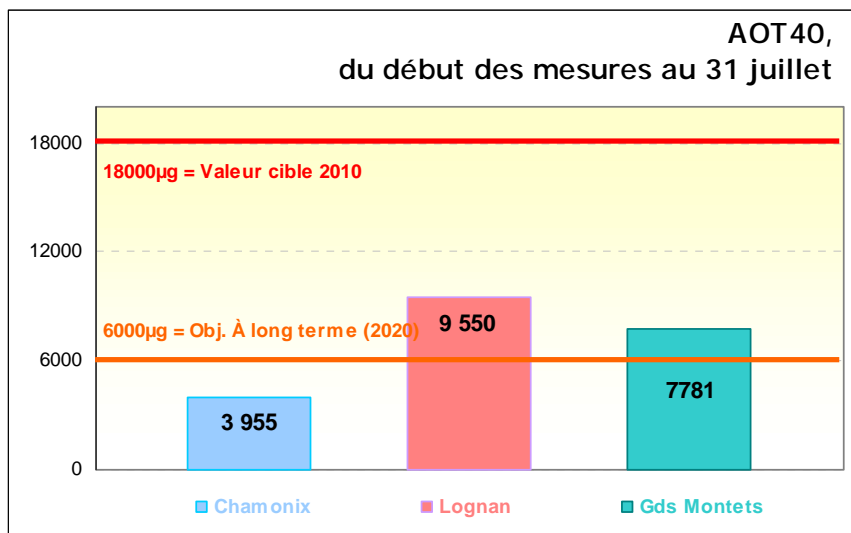


Même si les données des Grands Montets, à cause des coupures d'alimentation, ne permettent pas un calcul régulier de la moyenne journalière (celle-ci est calculée si au moins 18 des 24 heures de la journée sont mesurées), le constat est clair : l'objectif de qualité de 65µg/m³ en moyenne journalière n'a pas été respecté un seul jour en altitude durant toute la durée des investigations. En fond de vallée, la situation est moins alarmante, mais cette valeur réglementaire a été dépassée tout de même pendant 12 jours...

L'application de la future directive européenne propose une autre façon d'évaluer les impacts sur la végétation et les écosystèmes : l'AOT40¹¹ est calculé pendant la période végétative du 1^{er} mai au 31 juillet, phase durant laquelle la végétation en pleine croissance est très exposée. Cette valeur d'AOT40, assez complexe à élaborer, peut se traduire plus simplement comme correspondant à une charge d'ozone admissible ; en l'occurrence, la future réglementation prévoit que la végétation ne soit pas exposée à plus de 18000µg/m³ en 2010, et 6000µg/m³ en 2020.

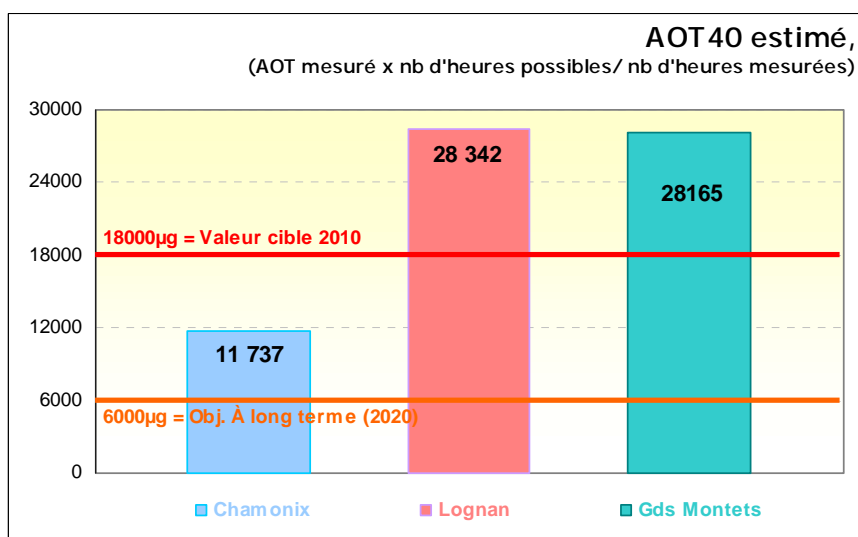
NB : avant d'examiner les résultats, rappelons une nouvelle fois que ces normes ont été élaborées pour des écosystèmes de plaine et non de montagne, et qu'elles sont probablement mal adaptées au cas qui nous intéresse. Une plante qui pousse en altitude se développe plus tardivement (en raison de l'hiver plus long) et elle n'a donc que quelques semaines pour atteindre sa pleine maturité. Cela induit inévitablement une croissance accélérée qui peut avoir comme incidence une plus grande sensibilité vis-à-vis des agents extérieurs.

¹¹ AOT40 (Average Over Threshold 40), signifie la somme des différences entre les concentrations horaires supérieures à 80µg.m⁻³ (40ppb) et 80µg.m⁻³, durant une période donnée en utilisant seulement les valeurs sur 1 heure mesurées quotidiennement entre 8h00 et 20h00.



Alors que les mesures en altitude n'ont démarré que le 2 juillet, on voit que l'objectif 2020 est nettement dépassé alors même qu'il n'intègre pas les mois de mai et juin dans le calcul...

Si, par extrapolation, on rapporte les résultats obtenus sur ce mois de juillet à ce qu'ils auraient pu être depuis début mai, on obtient le graphe ci-dessous :



Cette fois, le constat est évident : les valeurs cibles à respecter en 2010 et 2020 sont très nettement outrepassées. Et pourtant, la 1^{ère} quinzaine de juillet a été caractérisée par du mauvais temps, qui on le sait, n'est pas favorable à la formation d'ozone et contribue même très largement à sa diminution par lessivage de l'atmosphère.

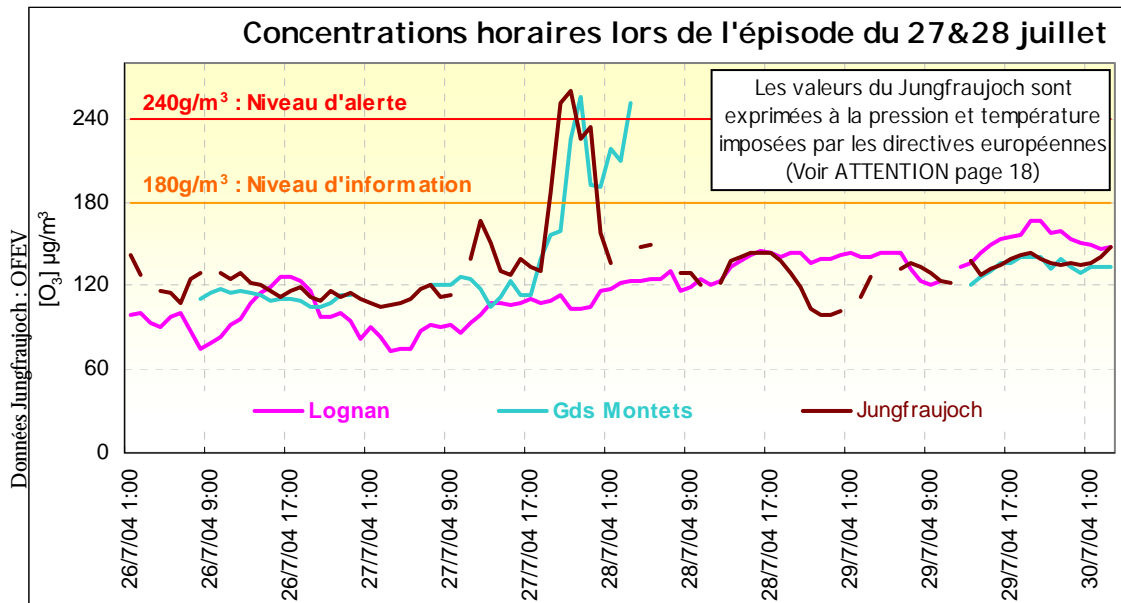
On peut donc considérer, sans prendre de risque, que l'AOT40 à Lognan et aux Grands Montets, est largement dépassé chaque année, et traduit en cela une atteinte constante et régulière à la bonne santé des écosystèmes d'altitude.

3.2.3. Un épisode exceptionnel en juillet 2004

Nous l'avons dit plus haut, le phénomène ayant entraîné 2 jours de dépassement du niveau d'alerte aux Grands Montets en raison de valeurs supérieures à $240\mu\text{g}/\text{m}^3$ (en moyenne horaire) est tout à fait particulier. Pour le comprendre, nous avons dû rechercher des données d'ozone récoltées ailleurs en altitude :



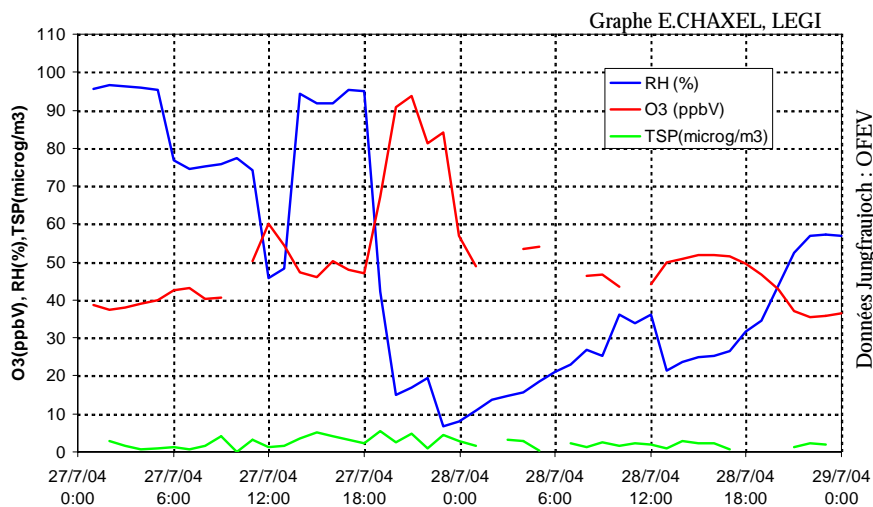
c'est en Suisse, à 3580m dans le Haut-Valais, que nous les avons trouvées, sur le site du Jungfraujoeh, une station du Réseau national d'observation des polluants atmosphériques (NABEL) géré par le Laboratoire fédéral d'essais des matériaux et institut de recherche (EMPA) sur mandat de l'Office Fédéral de l'Environnement (OFEV).



Dans la nuit du 27 au 28 juillet 2004, de fortes valeurs de concentration en ozone ont été enregistrées aux Grands Montets. Le 27 dans la journée, les concentrations présentaient un niveau "habituel", constant autour de $110\mu\text{g}/\text{m}^3$, mais à partir de 17h00, la concentration d'ozone a commencé à augmenter pour atteindre la valeur de $255\mu\text{g}/\text{m}^3$ à 22h00. Malheureusement, une coupure d'électricité intervenue à 3h00 le 28 juillet nous a privé de la poursuite de l'observation (le retour à la normale n'est intervenu que dans la journée du 29).

Dans le même temps, l'analyseur de Lognan situé 1300m en contrebas ne montre aucune anomalie, mais ce n'est pas du tout le cas des mesures d'ozone réalisées en Suisse, au Jungfraujoch, qui présentent un comportement tout à fait similaire à celui des Grands Montets. Le pic enregistré possède la même durée que le pic des Grands Montets, soit environ 5 h, et une amplitude identique. Cette observation prouve que les deux stations ont été touchées par un même événement.

La figure ci-dessous¹² présente les mesures d'ozone et d'humidité réalisées au Jungfraujoch les 27 et 28 juillet 2004. On remarque clairement que l'augmentation de l'ozone est associée à une baisse franche et brutale de l'humidité relative (RH en bleu) qui atteint des taux inférieurs à 10% lors du pic d'ozone. Cette observation, très symptomatique, indique que l'ozone mesuré au Jungfraujoch a une origine stratosphérique.



¹² Eric CHAXEL, doctorant au Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels (INPG/CNRS/UJF Grenoble), est l'auteur de ce graphique. Il a contribué largement à l'interprétation de cet épisode de pollution. Une partie des applications de son travail de recherche sont consultables sur <http://www.legi.hmg.inpg.fr/%7EAlpes/Internet/realtime/index.html>.

La simultanéité du phénomène observé aux Grands Montets confirme bien que nous avons eu affaire alors à une descente d'ozone de la haute-atmosphère (la stratosphère, où se trouve "le bon ozone", se situe entre 15 et 50km d'altitude) : ce phénomène, rarement observé de la sorte, est attribuable à la violence des vents de haute-altitude, les courants jets, qui peuvent parfois aller "lécher" la couche d'ozone stratosphérique et ramener ainsi dans leur redescende en "basse altitude" une quantité importante de cette molécule, qui devient alors un polluant quand on la respire...

Le pic observé dans la nuit du 27 au 28 juillet 2004 est la plus forte valeur mesurée depuis le début des investigations au Jungfraujoch en 1995 : cette intrusion stratosphérique est donc d'une amplitude exceptionnelle.

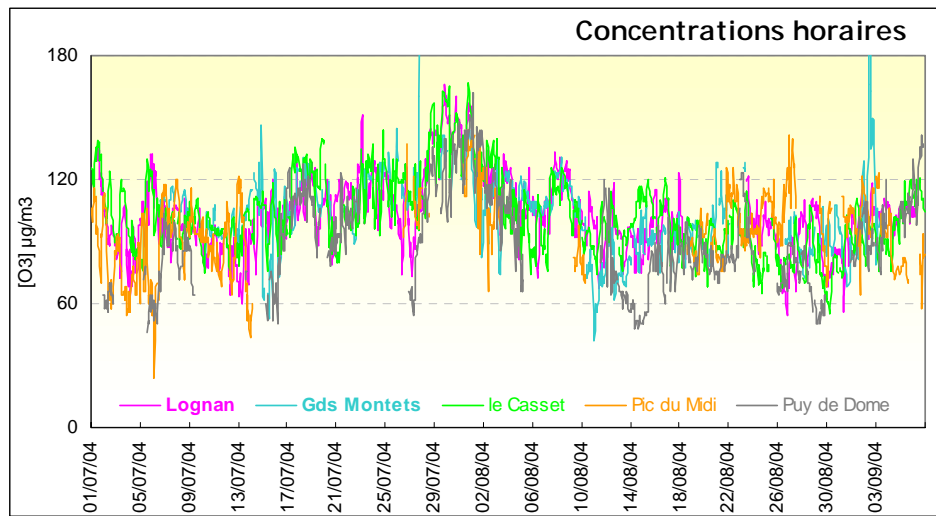
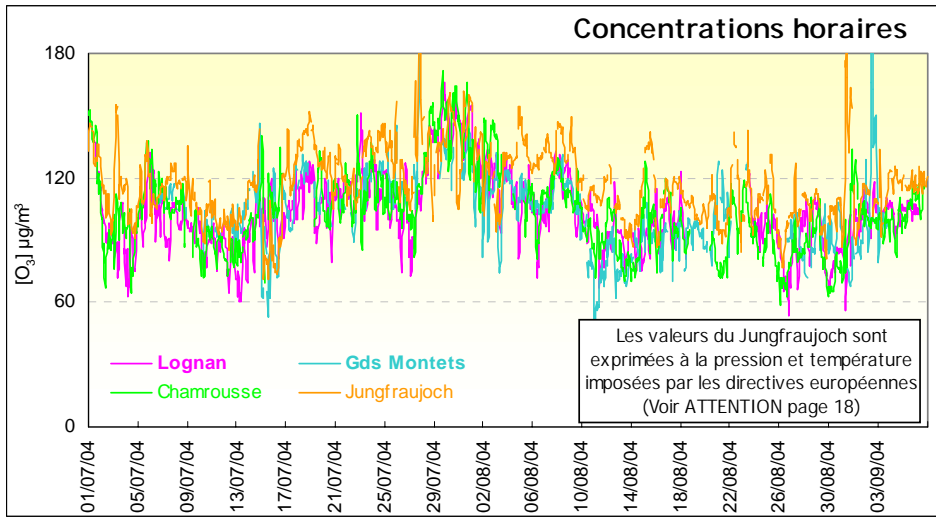
Des sondages d'ozone et d'humidité réalisés dans des avions de ligne (programme MOZAIC, <http://aeropc35.aero.obs-mip.fr:8080/magnoliaPublic/features.html>) décollant de Munich et Frankfort le 28 juillet au matin montrent qu'une couche d'ozone stratosphérique était présente le 28 juillet 2004 vers 5h00 TU entre 3000m et 4000m. Des mesures LIDAR ("LIght Detection And Ranging", système type Laser permettant de pratiquer des mesures à distance) réalisées à l'Observatoire de Haute-Provence (OHP) montrent la même couche (mesures non disponibles). Cette intrusion a donc une étendue géographique importante suivant l'horizontale, mais semble n'avoir affecté que les zones au-dessus de 3000m d'altitude puisque la station allemande du Zugspitze située à 2960 m n'a mesuré aucun pic d'ozone, de même que notre analyseur de Lognan.

3.3. Les montagnes de Haute-Savoie sont-elles représentatives de la "zone alpine" ?

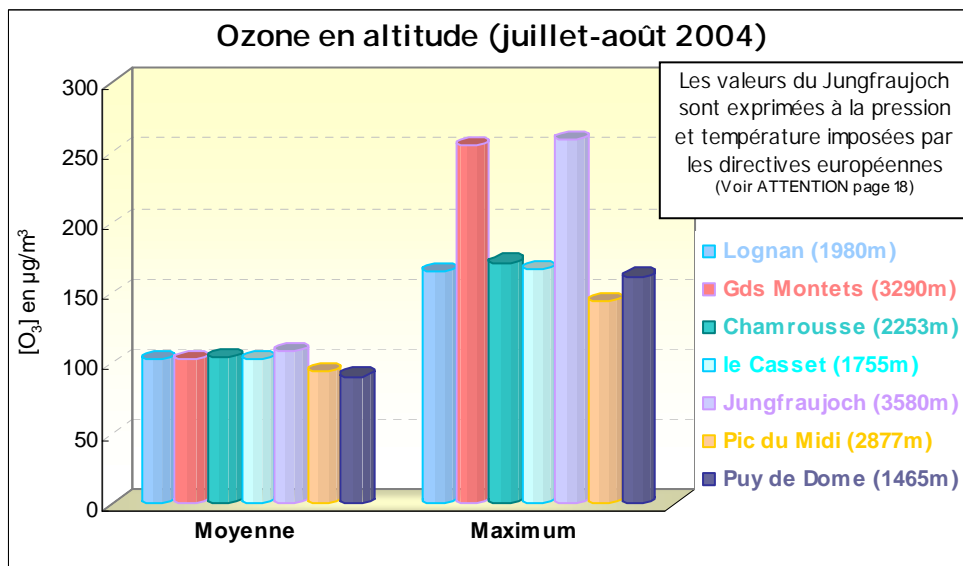
A travers cette étude, ASTERS, gestionnaire des réserves naturelles de Haute-Savoie, souhaitait, entre autres, savoir s'il était possible de mettre en œuvre une méthodologie de suivi de la pollution en ozone sur son territoire. Comme nous l'avons vu, le protocole le moins coûteux et le plus simple (les capteurs passifs) ne donne pas entière satisfaction. Parallèlement, la mesure "classique" par analyseur qui est, elle, très fiable, est relativement onéreuse en investissement et en fonctionnement et requiert un savoir-faire particulier. Nous avons donc cherché à collecter d'autres mesures d'ozone pratiqués de manière analogue dans les zones de montagne pour savoir si, compte-tenu des connaissances sur la présence d'ozone en altitude, une station de mesure située ailleurs ne pouvait pas, finalement, renseigner de manière utile sur la qualité de l'air dans les montagnes de Haute-Savoie...

En plus des mesures du Jungfraujoch délivrées par l'OFEV, des données nous ont été transmises par nos collègues d'ASCOPARG (ASsociation pour le COntôle et la Préservation de l'Air dans la Région Grenobloise), qui au même moment avait installé un analyseur à Chamrousse (2253m, dans le massif de Belledonne). ASCOPARG nous a également transmis les données récoltées au Casset (1755m, commune de Monetier-les-Bains, dans le massif des Ecrins), une station faisant partie du réseau national MERA (MEsure des Retombées Atmosphériques) composé lui-même de 10 stations implantées en "zones rurales". Nous avons également récupéré des données auprès du réseau PAES (Pollution Atmosphérique à l'Echelle Synoptique) en cours de constitution (<http://paes.aero.obs-mip.fr/paes.html>), qui pratique des mesures au sommet du Puy de Dôme (1465m, dans le Massif Central) et du Pic du Midi (2877m, dans les Pyrénées).

Les 2 premiers graphes ci-dessous permettent de comparer globalement les teneurs en ozone enregistrées sur chacun de ces sites d'altitude :

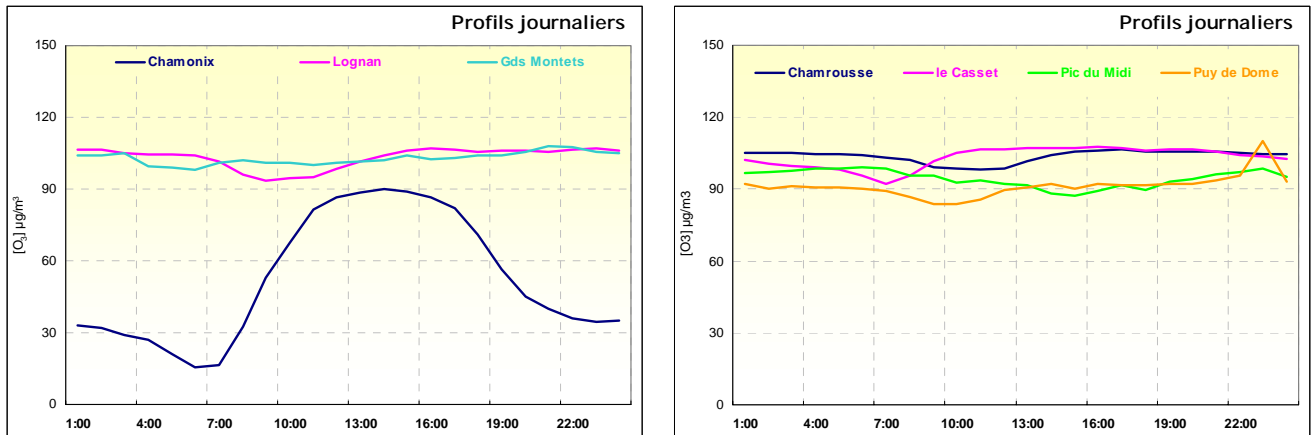


Il est assez frappant de constater la très bonne corrélation et simultanéité des évolutions d'ozone durant ces mois de juillet et d'août 2004 : dans les Alpes françaises du nord et du sud, comme dans les Alpes suisses, ainsi que dans les Pyrénées et le Massif Central, les variations sont toutes similaires, et seules les "niveaux de base" indiquent une différence. Le graphe suivant, montrant de manière très élémentaire les valeurs moyennes et maximales enregistrées durant cet été 2004, est d'ailleurs très explicite :



Hormis l'épisode exceptionnel du 27-28 juillet qui n'a été constaté qu'au-dessus de 3000m, aux Grands Montets et au Jungfrauoch, on remarque la quasi parfaite égalité entre Jungfrauoch, Lognan, les Grands Montets, Chamrousse et le Casset : les valeurs moyennes et les maxi sont très proches. Un autre groupe est donc constitué par le Pic du Midi et le Puy de Dôme, dont les valeurs moyennes tombent en-dessous de $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ (94 et $91\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Ces différences se retrouvent sur l'examen des profils journaliers : hormis Chamonix-centre qui reste un site "urbain", on voit combien tous ces sites d'altitudes échappent au rythme quotidien de formation-destruction de l'ozone et sont au contraire révélateur de la pollution de l'atmosphère libre :



Une similitude intéressante entre le Casset et Lognan, outre les niveaux, réside dans le fléchissement des niveaux d'ozone en début de matinée avant de remonter vers la valeur maximale dans le milieu de journée : il semblerait que nous ayons là la double manifestation d'influences locales de polluants primaires qui détruisent puis activent la formation de l'ozone.

In fine, à la vue de ces différentes figures, on a la vision d'une très bonne homogénéité des concentrations d'ozone observées en altitude. Les quelques différences constatées peuvent être attribuables au plus ou moins grand éloignement par rapport aux sources de polluants primaires : ainsi, même si le Casset est en bordure du Parc National des Ecrins, il reste probablement influencé par le trafic routier Briançon – Col du Lautaret, alors qu'à l'inverse, à 3580m, au milieu des plus grands glaciers d'Europe, le Jungfrauoch est très préservé de ce genre de perturbations.

Cette comparaison permet aussi de vérifier que les teneurs en ozone n'augmentent pas avec l'altitude. Il n'y a pas de gradation ou de gradient altitudinal : une fois que l'on est dans l'atmosphère libre, les teneurs sont équivalentes, et c'est simplement l'enrichissement par des apports locaux d'ozone, même minimes, qui vont créer de légères différences entre certains sites.

On pourrait donc conclure qu'une seule station située au-dessus de 2000m serait suffisante pour renseigner sur la présence d'ozone dans les massifs montagneux français, voire européens. Cependant, l'évènement exceptionnel du 27-28 juillet nous apprend qu'en haute-montagne (au-delà de 3000m), des phénomènes particuliers se déroulent et qu'il serait intéressant de pouvoir les identifier, même si, à de telles altitudes, en terme de surveillance écologique des milieux, il n'y a plus vraiment d'enjeu. C'est alors le suivi des évolutions globales qui peut être fait de manière complémentaire.

CONCLUSIONS

Cette campagne d'investigations de la qualité de l'air en altitude s'est avérée très enrichissante. Elle a montré que la présence d'ozone atteignait des niveaux mettant en danger à la fois les écosystèmes et la santé humaine : les normes actuelles et futures sont nettement dépassées ou ont toutes les chances de l'être. L'ozone en montagne est présente sur de très longues zones et sur de longues périodes. Les valeurs réglementaires ne sont pas dépassées qu'en plein été, comme c'est le cas proche des grandes agglomérations, mais pratiquement toute l'année.

En dépit de quelques inconvénients, les capteurs passifs ont permis de montrer que la "contamination" globale des zones naturelles de montagne situées en atmosphère libre était influencée de façon marginale par des émissions locales de polluants précurseurs : ceux-là peuvent alors induire un enrichissement ou bien un appauvrissement en ozone.

Cette étude permet également de caractériser une augmentation des concentrations moyennes d'ozone en fonction de l'altitude de l'ordre de $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ par 200m mais révèle un effet de seuil. Au-delà de 2000m d'altitude, mais plus généralement au-dessus de la couche d'inversion dans ce qui constitue l'atmosphère libre, les concentrations d'ozone sont stables quelque soit l'altitude.

La mesure par analyseur a permis de considérer très précisément les teneurs d'ozone rencontrées en Haute-Savoie par rapport à la réglementation en vigueur ou à venir. Pratiquée en d'autres lieux aux caractéristiques identiques, elle a permis de déceler un phénomène rare d'intrusion stratosphérique, mais également de vérifier la très large contamination en ozone de l'atmosphère libre de l'Europe occidentale. Sur ce point, on a pu voir la similitude des mesures récoltées en différents points de la chaîne alpine ou d'autres massifs français, et démontrer la pertinence d'une station de haute-altitude (au-delà de 3000m) plus à même de détecter des phénomènes de grandes ampleur, en complément du suivi de la zone alpine.

Mais la mesure de la qualité de l'air en milieux naturels, *a fortiori* en altitude, reste contraignante et délicate. C'est pourquoi, depuis l'été 2006, Air-APS s'est lancé dans une phase de test de micro-capteurs, des appareils conçus sur la base des technologies appliquées aux matériaux semi-conducteurs. De coût abordable, ils permettent une dissémination spatiale des sites de mesure, à l'identique des capteurs passifs, tout en permettant de récolter une mesure régulière, tout comme un analyseur.

Une solution alternative, qui, si elle s'avérait performante, offrirait à un gestionnaire d'espaces protégés les moyens financiers et techniques de surveiller un élément primordial de l'écosystème : l'atmosphère.





L'AIR DE L'AIN ET DES PAYS DE SAVOIE
430 rue de la Belle Eau, Z.I. des Landiers Nord, 73000 CHAMBERY
Téléphone : 04-79-69-05-43 Télécopie : 04-79-62-64-59
Email : air-aps@atmo-rhonealpes.org
www.atmo-rhonealpes.org