



## L'ozone en tant que Contamination moléculaire aéroportée (AMC) dans la fabrication de semi-conducteurs

Nouveaux matériaux filtrants  
avec une performance d'élimination stable à long terme

---

Rapport technique 2403001



L'ozone ( $O_3$ ) est un agent oxydant puissant qui se forme quotidiennement dans les couches proches de la surface de l'atmosphère sous l'influence de la lumière UV du rayonnement solaire dans un cycle  $NO_x$  / COV en présence d'oxygène atmosphérique abondant ( $O_2$ ). [Fishman & Crutzen, 1978 ; Finlayson-Pitts & Pitts, 2000 ; Seinfeld & Pandis, 2016].

Dans un environnement où  $NO_x$  (oxydes d'azote,  $NO + NO_2$ ) et des hydrocarbures oxydables sont présents, le taux d'accumulation est contrôlé de manière significative par l'intensité du rayonnement et les concentrations relatives de  $NO_x$  et de COV. La vitesse d'accumulation est bien étudiée et les contributions à celle-ci sont bien décrites par des équations de réaction et des modèles de calcul. [Crutzen, 1971, Finlayson-Pitts & Pitts, 2000].

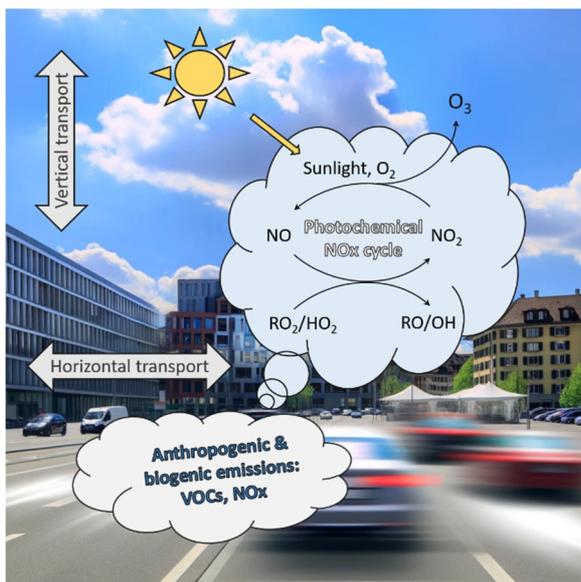


Schéma : Génération d'ozone dans la basse atmosphère (troposphère) ; cycle  $NO$  /  $VOC$  /  $O_3$

En cas de diminution ou d'absence de rayonnement UV (coucher du soleil), le taux de formation tombe en dessous de

le taux de perte d'ozone. La concentration d'ozone dans la basse atmosphère diminue à nouveau. Cela est dû à des réactions de perte dans le cycle  $NO_x$ , en particulier la réaction de perte rapide de l'ozone avec le monoxyde d'azote ( $NO + O_3 = NO_2 + O_2$ ), ainsi qu'à d'autres réactions dans lesquelles la molécule d'ozone réactive et instable agit en tant qu'agent oxydant et est consommée. Le contact des masses d'air contenant de l'ozone avec le sol ou d'autres surfaces où la perte a lieu revêt une importance particulière. [e.g. Jacob, 2000].

En raison de la combinaison des processus de formation et d'appauvrissement susmentionnés, il n'est pas surprenant que les concentrations d'ozone dans l'air ambiant présentent généralement une forte différence entre le jour et la nuit, avec des valeurs maximales allant jusqu'à 100 - 150 ppbv, en début d'après-midi et en même temps des valeurs potentiellement faibles de 10 - 15 ppbv, avant le lever du soleil dans la matinée. [Monks et al., 2015].

Des exemples de concentrations d'ozone typiques en Suisse pendant les mois d'été sont illustrés par des mesures de l'air extérieur dans les stations NABEL (figure 1) et à proximité du laboratoire d'artemis control AG dans l'agglomération de Zurich, en Suisse. Les mesures parallèles de l'ozone, du NO et du  $NO_2$  ( $NO_x$ ) montrent l'interaction entre les concentrations d'ozone, l'entrée matinale du NO dans le cycle et la distribution du NO et du  $NO_2$  au cours de la journée. (figure 2). La figure 3 présente des valeurs de mesures d'ozone antérieures provenant de l'alimentation en air frais d'un prototype d'installation de production de matériaux nanoélectroniques doté d'une filtration partielle de l'air frais.

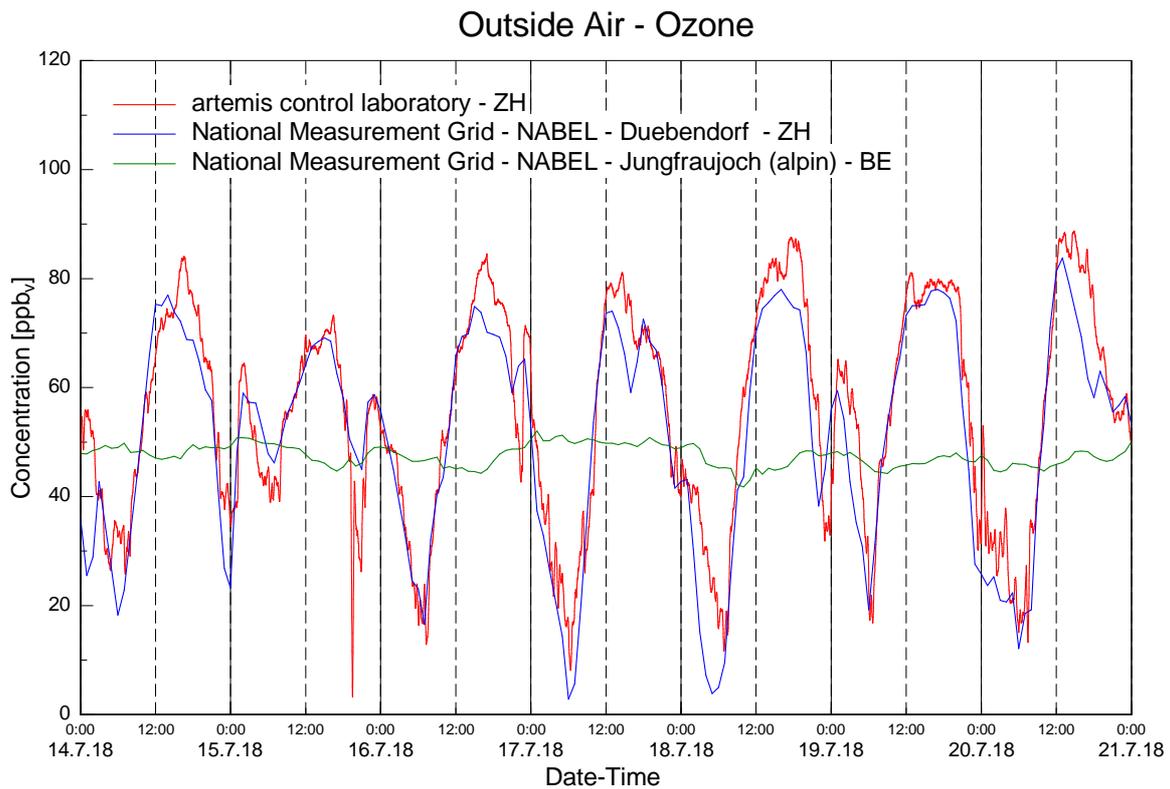


Figure 1 : Ozone dans l'air extérieur - valeurs de concentration typiques et variations journalières durant les mois d'été en Europe - exemples des stations de mesure NABEL en Suisse et du laboratoire d'artemis control AG, ZH, Suisse

On peut subjectivement supposer que les valeurs de l'ozone troposphérique et les pics de concentration journaliers sont les plus élevés sous les tropiques en raison du grand nombre de "journées ensoleillées". C'est exact dans la mesure où les fluctuations saisonnières du rayonnement solaire et de l'intensité des UV sont plus faibles sous les tropiques qu'aux latitudes plus élevées de l'hémisphère nord ou de l'hémisphère sud [Cooper et al.] Cependant, à la fin du printemps et au début de l'été - c'est-à-dire autour du solstice - la longueur du jour et la durée de l'irradiation lumineuse dans l'hémisphère respectif sont généralement beaucoup plus longues qu'au même moment sous les tropiques. Si, en plus de cette longue période d'irradiation, un rayonnement élevé sous un ciel clair rencontre un mélange  $\text{NO}_x/\text{VOC}$  favorable, les pics

de concentration d'ozone dans les hautes latitudes dépassent rapidement les pics quotidiens moyens typiques des tropiques. [Monks, 2000].

En outre, des conditions micrométéorologiques favorables, telles que de faibles mouvements d'air pendant la nuit ou de faibles apports de  $\text{NO}$ , peuvent signifier que l'ozone formé pendant la journée n'est pas décomposé pendant la nuit et qu'il reste une "base" de 30 à 40 ppbv, sur laquelle la formation d'ozone continue de se développer le jour suivant (voir également la figure 3). Un mécanisme similaire a conduit à une augmentation nette significative de la production d'ozone troposphérique pendant le confinement COVID-19 dans l'est de la Chine, par exemple. [Chen et al, 2021].

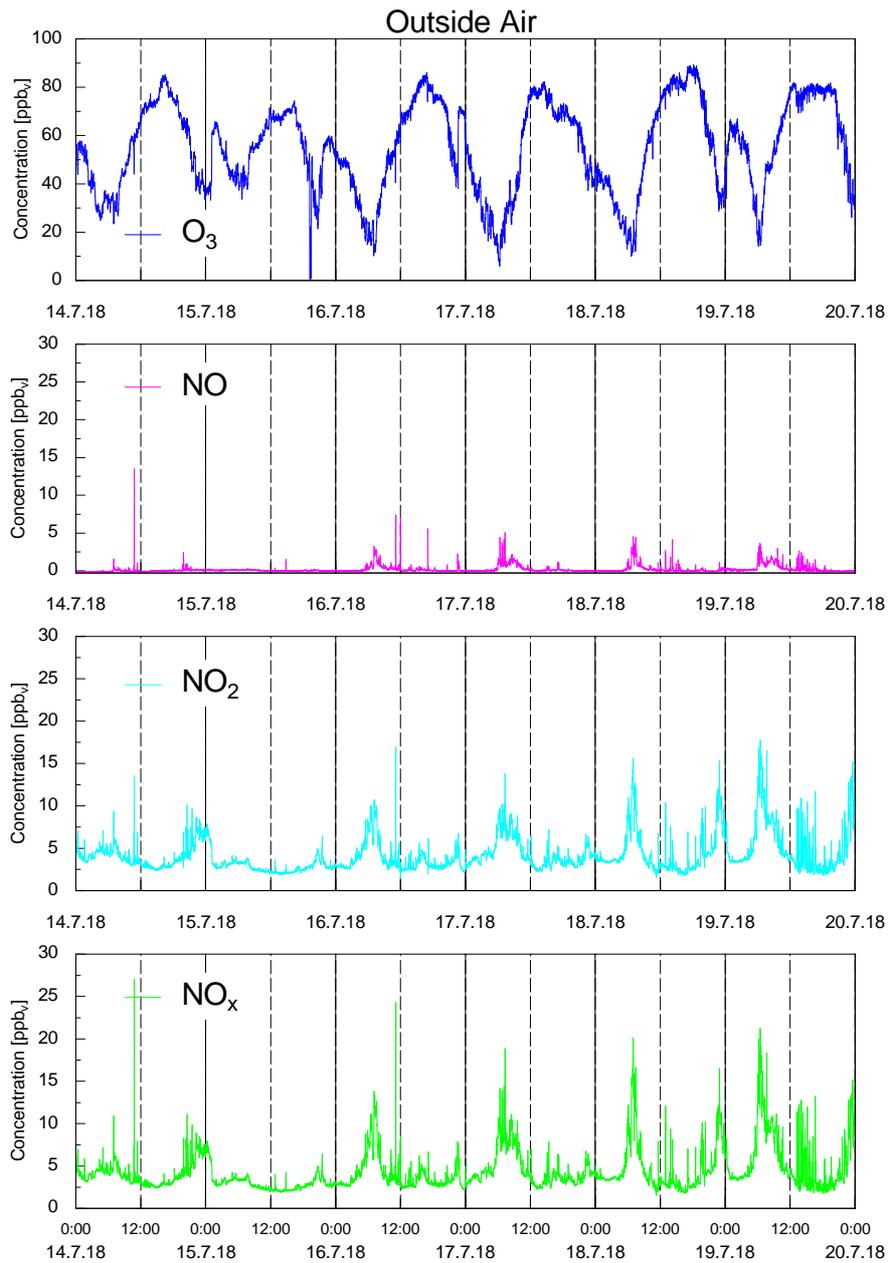


Figure 2 : Mesures parallèles de l'ozone, du NO et du NO<sub>2</sub> (NO<sub>x</sub>) au laboratoire d'artemis control AG, région de Zurich, Suisse. Les courbes montrent les interactions entre les concentrations d'ozone, l'entrée matinale du NO dans le cycle et la distribution du NO et du NO<sub>2</sub> au cours de la journée.

Dans ces situations, il n'est pas rare que les valeurs limites régionales pour l'ozone soient dépassées [Monks et al., 2015], qui sont fixées et émises en tenant compte des effets sur le système respiratoire, en particulier chez les personnes âgées ou en mauvaise santé [Bell et al., 2005, Jerrett et al., 2009]. Si les valeurs limites sont dépassées, il est conseillé aux personnes à risque d'éviter les activités extérieures intenses et de rester à l'intérieur. En effet, les concentrations d'ozone sont généralement plus faibles à l'intérieur des bâtiments, où ne se produisent pratiquement que des réactions de perte.

Les processus de fabrication en nanoélectronique peuvent également être affectés par l'ozone présent dans l'air ambiant de la structure nanoélectronique et par son effet oxydant. [Park et al. 2001]

Ceci est plus facile à comprendre pour le domaine encore jeune et restreint de l'électronique polymère ou des conducteurs et semi-conducteurs polymères organiques. En effet, la structure de base des conducteurs polymères est constituée de chaînes principales de polymères conjugués, qui consistent en une séquence strictement alternée de liaisons simples et doubles. Les polymères ont donc un système d'électrons délocalisés

("mobiles"), ce qui leur confère des propriétés semi-conductrices et, après dopage chimique, la conductivité.

Cependant, les doubles liaisons insaturées (C=C) sont des points d'attaque privilégiés pour l'agent oxydant qu'est l'ozone et conduisent à la rupture de la chaîne oxydative dans le cadre de l'"ozonolyse" et donc à la destruction du polymère (conducteur).<sup>1</sup> [Selon le type de polymère conducteur et son processus de traitement et de stockage, les concentrations d'ozone de > 5 ppb<sub>v</sub> dans l'air ambiant sont déjà considérées comme critiques pour le processus et dommageables.

Dans la technologie des semi-conducteurs à base de silicium, l'effet de l'ozone (en plus d'autres agents oxydants) est tenu pour responsable de la formation indésirable et incontrôlée de couches d'oxyde de silicium sur les surfaces en silicium pur. Les surfaces métalliques natives de métaux facilement oxydables sont également considérées comme affectées.

Park et al. (2001) font état d'une croissance de Si-O de 0,015 - 0,07 Angström/minute lors d'une exposition à l'ozone dans une plage de concentration de 20 - 200 ppb<sub>v</sub>. Cette croissance de Si-O entraîne une modification indésirable des propriétés capacitives d'une cellule de stockage et doit être évitée.

---

<sup>1</sup> Le clivage de polymères par l'ozone a déjà été observé au 19<sup>th</sup> siècle sur du caoutchouc naturel/caoutchouc non stabilisé chimiquement. D'autres réactions d'oxydoréduction avec l'ozone

ont été utilisées, par exemple, dans des processus électrochimiques pour sonder la distribution verticale de l'ozone dans l'atmosphère, voir les références dans [Kames & Schmidt, 1992].

### *Moyens de limiter les concentrations d'ozone dans l'air de la salle blanche*

Le principal processus de formation de l'ozone est la formation photolytique dans l'air extérieur décrite ci-dessus. La principale source d'ozone dans l'air de la salle blanche est l'entrée d'air extérieur dans la salle blanche par le système d'air d'appoint. Des réactions localisées à la source de l'ozone, dues à l'utilisation de la lumière UV ou de la haute tension, peuvent se produire dans la salle blanche, mais elles sont limitées.

Avec des pics quotidiens de 60 à 150 ppb<sub>v</sub> dans l'air extérieur pendant plusieurs heures, une séparation active de l'ozone de l'air d'appoint est nécessaire pour respecter des valeurs seuils ne dépassant pas 5 ppb<sub>v</sub>.

Il est vrai qu'une teneur en ozone de 60 ppb<sub>v</sub>, par exemple, dans l'air extérieur n'entraîne pas immédiatement une concentration correspondante dans la salle blanche, en raison du débit d'air neuf limité à 5-7 % du débit d'air recyclé. Outre la perte murale d'ozone dans le système de conduits d'air, d'autres réactions en retour et de faibles taux d'échange et réactions de perte dans le circuit d'air recyclé permettent d'éviter ce phénomène. En règle générale, dans une salle blanche sans séparation active de l'ozone, un pic se forme en l'espace de deux heures, qui est modélisé par la courbe de niveau dans l'air extérieur.

L'utilisation de filtres AMC dans le système d'air d'appoint est recommandée pour réduire la teneur en ozone de l'air d'appoint. Dans les systèmes d'air extérieur de pointe pour les salles blanches destinées à la production de nanoélectro-

nique, au moins un étage, et de préférence deux, sont généralement prévus pour nettoyer l'air d'appoint de l'AMC.

Cependant, l'accent est souvent mis sur la réduction et la stabilisation des niveaux d'acides ou de formateurs d'acides, de composants organiques et organosiliciés de l'air et de composants alcalins.

Pour l'élimination de l'ozone de l'air par filtrage, on utilise généralement le mécanisme qui, outre la perte réactive avec le NO, représente la principale voie de perte dans l'air extérieur. Il s'agit de la perte réactive avec les surfaces et de la reformation de l'ozone en oxygène.

Un filtre AMC à base de charbon actif est généralement considéré comme un système de filtrage à grande surface. En tant que matériau très poreux, le charbon actif a en effet une "surface interne" de 900 à 1200 m<sup>2</sup>/g de sorbant. Le charbon actif adapté à la filtration des gaz à l'état de traces possède un système de pores et de micropores de transport qui sont facilement accessibles à une petite molécule mobile telle que l'ozone.

Lors d'essais indicatifs en laboratoire, presque tous les filtres AMC de pointe à base de charbon actif se sont donc révélés adaptés. Lors de ces essais, des efficacités de filtration supérieures à 98 % peuvent être facilement démontrées sur de courtes périodes pour des filtres neufs et à des concentrations élevées. Ces essais sont souvent réalisés à des concentrations d'ozone très élevées et extrapolés en termes de "performance de capacité" via la taille d'une dose en ppb<sub>v</sub> h à une période d'utilisation utilisable dans des conditions typiques de pollution de l'air extérieur.

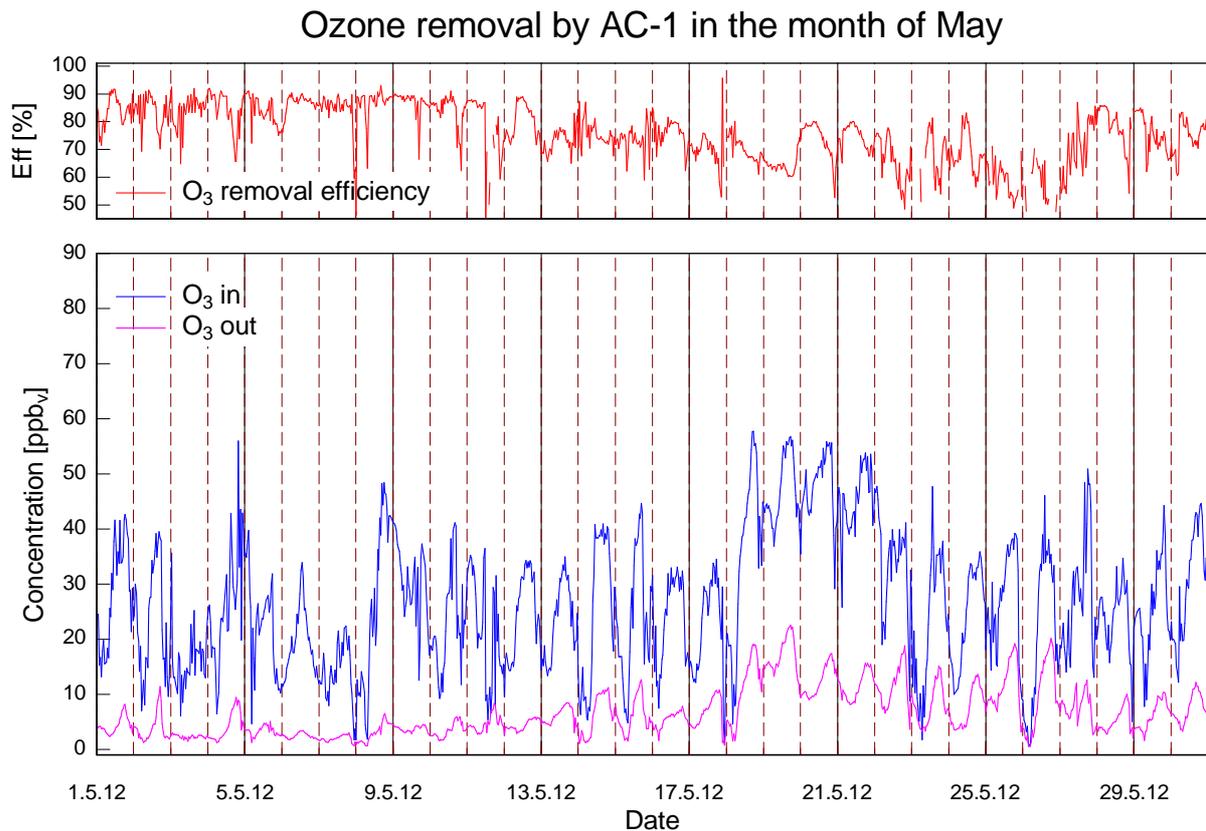


Figure 3 : Suivi des valeurs d'ozone mesurées ("O<sub>3</sub> in" dans l'air extérieur, "O<sub>3</sub> out" sur le côté aval de la barrière filtrante) et de l'élimination de l'ozone sur un système d'air extérieur équipé de filtres de type AC-1 (production pilote de matériaux nanoélectroniques). Les jours où les concentrations d'ozone dans l'air extérieur augmentent constamment conduisent à la formation d'une "base" d'environ 40 ppbv, qui subsiste également la nuit, ce qui entraîne un "effet de mémoire" et une réduction des performances de séparation de l'ozone pour ce type de filtre (AC-1). L'effet est réversible mais indésirable, car il n'est pas possible d'influencer activement ou de prévoir l'évolution des concentrations dans l'air extérieur.

Malheureusement, les efficacités de séparation trouvées dans les essais conçus de cette manière ne se concrétisent souvent pas dans la pratique. La raison en est la combinaison du mécanisme de séparation et des exigences de performance pour des concentrations maximales plus faibles mais se produisant périodiquement dans la pratique.

*Etude comparative des systèmes de filtres AMC pour la séparation de l'ozone - variantes de matériaux et durée de vie*

La perte d'ozone sur les surfaces solides est, entre autres, une recombinaison en oxygène ( $2 \text{O}_3 \rightarrow 3 \text{O}_2$ ) ainsi qu'une réaction avec les substances présentes sur les surfaces dans le sens d'une réaction de sorption.

Une réaction avec le matériau de la surface elle-même ou une combinaison des mécanismes mentionnés peut également se produire.

En conséquence, il est clair qu'il existe des matériaux et des surfaces qui dégradent très peu l'ozone et sont utilisés dans ce sens (verre, PTFE [Cano-Ruiz et al., 1993]) ainsi que des matériaux qui dégradent l'ozone de manière efficace et continue (par exemple, les filtres à ozone chauffés avec des structures en métal/oxyde de métal sur les systèmes et les appareils).

Dans le domaine de la filtration des AMC, il n'est judicieux que d'utiliser des systèmes qui garantissent que la concentration dans la zone de sortie du filtre est en permanence inférieure aux valeurs limites de 2 à 5 ppb<sub>v</sub> à des concentrations faibles, mais changeant dynamiquement,

sans puissance thermique supplémentaire et en tenant compte des autres AMC présents dans l'air. Les systèmes doivent être exempts de sous-produits, provenant par exemple de l'élimination de l'ozone.

Le tableau 1 présente une comparaison de l'efficacité de séparation initiale de l'ozone sur quatre filtres AMC. Les filtres AMC AC1 - AC4 ont en commun que le matériau de sorption dans le corps de base est le charbon actif. Les caractéristiques des surfaces internes des charbons actifs sont différentes.

À titre de comparaison, la séparation de l'ozone sur les filtres AMC en polymères fonctionnels (FP-B et FP-A) est présentée, qui - conformément aux attentes et à la conception du matériau - ne devraient pas présenter et ne présentent pas de séparation de l'ozone.

Tableau 1 : Efficacité de la séparation initiale de l'ozone sur différents filtres AMC, les types AC ("charbon actif") sont tous basés sur des matériaux composites à base de charbon actif, les types FP ("polymère fonctionnel") sur des structures de polymères organiques poreux.

	AC-1	AC-2	AC-3	AC-4	FP-B	FP-A
Entrée [ppb] <sub>v</sub>	10-75	10-75	10-75	10-75	10-75	10-75
Sortie [ppb] <sub>v</sub>	1-15	1-5	1-4	1-5	10-75	10-73
Distance	90-70%	96-85%	98-94%	96-90%	0%	0-2%

Tableau 2 : Efficacité de l'élimination de l'ozone par les filtres AMC après une dose d'entrée de 6 000 ppb<sub>v</sub> h.

	AC-1	AC-2	AC-3	AC-4	FP-B	FP-A
Entrée [ppb] <sub>v</sub>	10-75	10-75	10-75	10-75	10-75	10-75
Sortie [ppb] <sub>v</sub>	10-20	1-5	1-4	1-5	10-75	10-73
Distance	90-60%	96-80%	98-94%	96-84%	0%	0-2%

Dans le prolongement de ces recherches, nous montrons le comportement de divers filtres AMC soumis à une charge cyclique jour-nuit contrôlée et continue dans le cadre d'un essai à long terme dans des conditions de fonctionnement réalistes (figures 4 et 5).

On peut constater que le filtre AMC de type AC-2, un filtre avec l'application cible "VOC & Condensables", atteint initialement une efficacité de séparation

élevée dans des conditions de test réalistes, ce qui peut garantir la conformité avec le critère  $< 5 \text{ ppb}_v$ . Cette image change après une utilisation prolongée de - dans ce test - trois mois sous une exposition constamment élevée (correspond à une dose totale d'environ  $100'000 \text{ ppb}_v\text{h}$ ). L'efficacité de la séparation diminue et ne respecte plus la valeur limite aux concentrations maximales (comparer les états "à l'état neuf" et "vieilli" dans la figure 4).

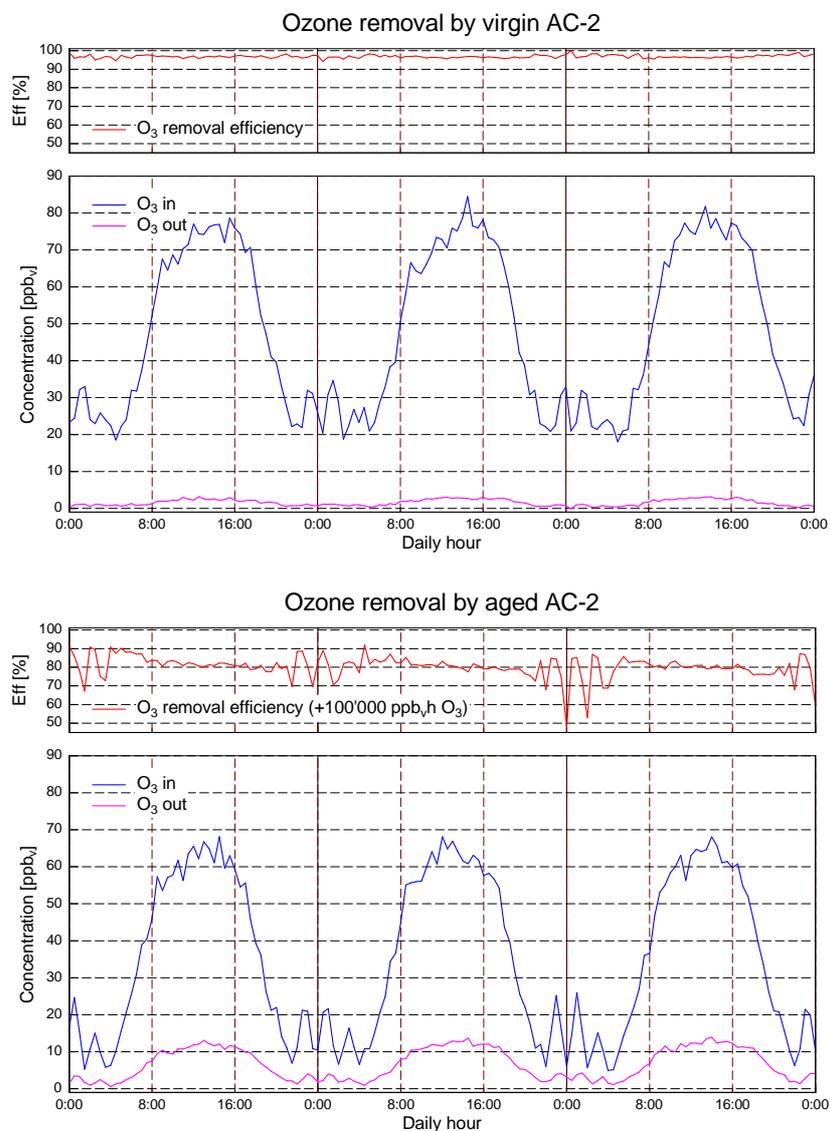


Figure 4 : Comparaison de l'efficacité initiale d'élimination de l'ozone au niveau du filtre AMC AC-2 avec l'efficacité d'élimination de ce filtre à l'état vieilli (jusqu'à une dose de  $100'000 \text{ ppb}_v\text{h}$  d'ozone).

En même temps, l'efficacité de la séparation déterminée par rapport à la concentration d'entrée diminue à nouveau à des concentrations plus faibles. C'est en particulier le cas de la dans les périodes de baisse de concentration qui suivent la charge de pointe journalière. Nous attribuons ce comportement à une saturation temporaire de la surface réactive en cas

de réaction inhibée, que l'on peut appeler "effet de mémoire". Le filtre conserve une influence de la phase précédente, ce qui empêche proportionnellement la réaction décomposition de l'ozone de plus faible concentration qui vient d'arriver et entraîne une réduction mesurable de la production spontanée d'ozone.

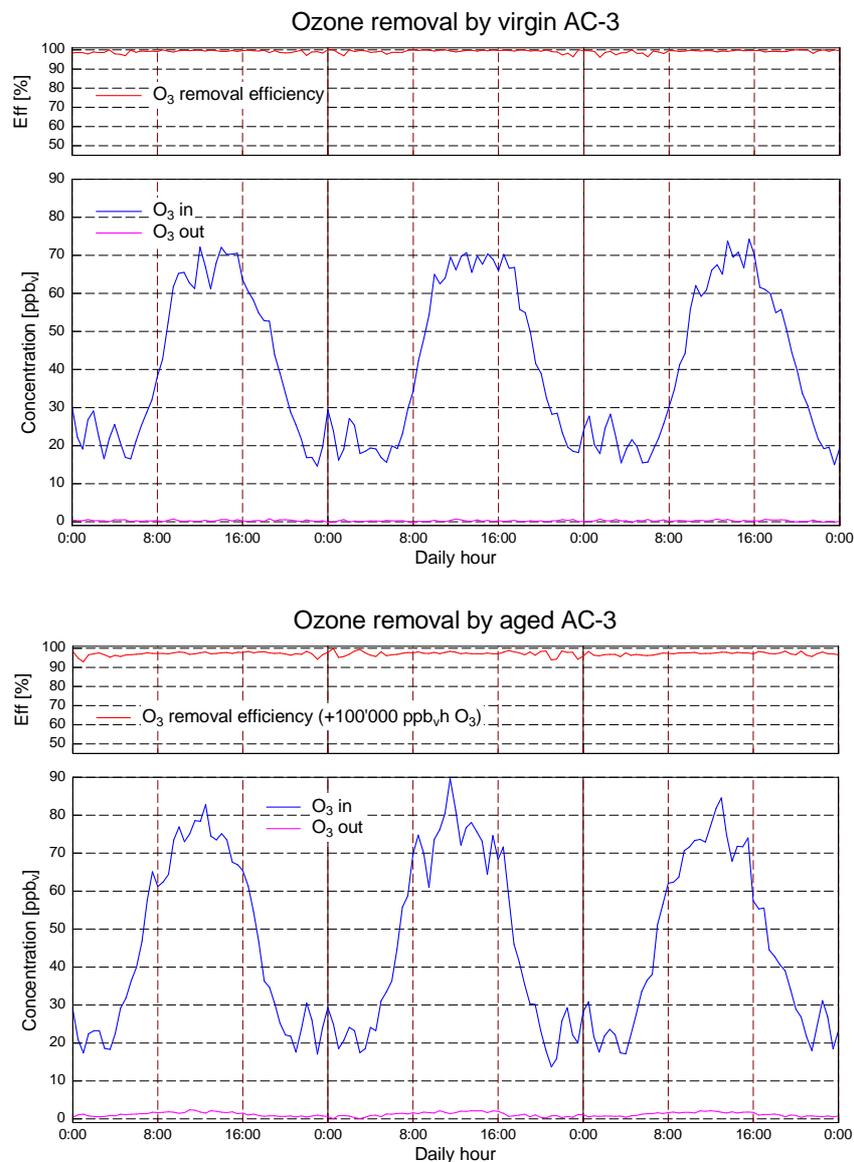


Figure 5 : Comparaison de l'efficacité initiale d'élimination de l'ozone au niveau du filtre AMC AC-3 avec l'efficacité d'élimination de ce filtre à l'état vieilli (jusqu'à une dose de 100'000 ppb,h d'ozone).

L'"effet mémoire" est une caractéristique fondamentale de nombreux types de charbon actif courants et a été observé à plusieurs reprises au cours du fonctionnement des filtres AMC. Cela se produit en particulier lorsqu'aucune sélection spécifique de matériau n'est requise et mise en œuvre pour le critère de séparation stable de l'ozone. (Voir l'exemple de l'utilisation de de l'AC-1 pour un apport d'air frais (installation pilote de nanoélectronique) dans la *figure 3*).

En comparaison, les filtres AMC de type AC-3 (et AC-4) ne présentent pas cette caractéristique indésirable - ni après une période de fonctionnement plus longue, ni dans des conditions de fonctionnement détaillées la résolution temporelle de la performance dans une phase d'augmentation ou de diminution des concentrations d'ozone à l'entrée. Une inhibition progressive de la réaction n'est pas reconnaissable et est basée sur la sélection spécifique du matériau adaptée à la tâche (*figure 5*).

Lors de l'analyse et de l'étude des filtres AMC utilisés dans les salles blanches (fonctionnement dans des systèmes d'air extérieur, imposition de différentes charges totales d'AMC déterminées par les conditions locales de la conception du système, les sources d'AMC naturelles et imposées dans l'environnement), les études décrites ci-dessus peuvent être confirmées d'un bout à l'autre.

Le filtre de type AC-2 - un filtre conçu pour traiter les COV et les condensables - subit une perte d'efficacité de captage des COV en raison de l'influence des AMC organiques et inorganiques et de l'ozone. Exprimée en % d'efficacité, elle se manifeste principalement en aval des pics de pollution et pendant les périodes où le niveau d'ozone est élevé, lorsqu'il n'y a plus d'alternance jour/nuit.

En termes d'évaluation des performances à faibles concentrations, le filtre semble "usé" et "inefficace". Cependant, il peut être démontré que l'efficacité de filtration augmente à nouveau quelque temps après ces épisodes. Cependant, étant donné que la durée et la fréquence des épisodes ne sont pas prévisibles ni influençables, il n'est pas possible de garantir une conformité sûre aux limites des salles blanches avec les seuls filtres de type AC-2, VOC & Condensables.

En comparaison, la perte d'efficacité de la séparation avec le filtre de type AC-3 est faible, voire indétectable, même après plus de 18 mois de fonctionnement continu. L'utilisation de ce type de filtre permet de respecter l'exigence d'une faible concentration à la sortie à tout moment et dans toutes les circonstances prévisibles. Pour les filtres AMC basés sur les matériaux filtrants AC-3 et AC-4, ces performances sont indiquées, spécifiées et garanties par artemis control AG dans les informations relatives au produit. Ces filtres AMC peuvent être reconnus par l'utilisateur grâce à leur code produit.

## Conclusions

L'ozone (O<sub>3</sub>) est un composant perturbateur (AMC Airborne Molecular Contamination) présent dans un certain nombre d'étapes du processus de fabrication des semi-conducteurs, qui entraîne la formation involontaire et incontrôlable de couches d'oxyde. Dans le cas des conducteurs polymères, l'exposition à l'ozone peut entraîner des ruptures de chaîne et une réduction de la conductivité.

Pour ces raisons, il existe des spécifications spécifiques pour la concentration maximale d'ozone tolérable dans l'air de la salle blanche ou dans l'installation de traitement pour un grand nombre de processus et de situations de stockage. Ces limites tiennent également compte des propriétés des matériaux et des temps de cycle des processus.

Les valeurs limites tolérables pour les concentrations d'ozone dans le processus sont généralement de l'ordre de quelques ppb. Dans tous les cas, elles sont bien inférieures aux concentrations typiques de l'air extérieur par temps ensoleillé.

Comme la source des concentrations d'ozone dans les salles blanches est essentiellement l'air extérieur, le contrôle des concentrations d'ozone commence souvent dès la filtration AMC de l'air frais. Il peut être étendu aux zones des salles blanches ou à des installations de traitement spécifiques.

Bien que, lors de tests orientés et de courte durée sur les matériaux, presque tous les matériaux poreux tels que les charbons actifs, les zéolithes, etc. présentent un effet réducteur vis-à-vis de la molécule d'ozone instable, des effets à long terme, tels que ceux observés lors

de la filtration de l'ozone, ne sont pas à exclure.

Les effets à long terme, tels qu'une modification passivante des surfaces, ne sont pas détectés lors des tests à court terme. Ces effets à long terme peuvent passer inaperçus pendant longtemps, mais ils entraînent une chute soudaine de l'efficacité de séparation pendant les phases de charge continue élevée. Dans le pire des cas, ils entraînent une violation des limites de processus spécifiées. Ces violations peuvent apparaître et disparaître spontanément en raison de la cause mentionnée, ce qui conduit à un "phénomène fantôme". Cette discontinuité a provoqué de nombreuses incertitudes quant à la stabilité du processus. En principe, les filtres AMC pour la séparation à large bande des COV/condensables de l'air ne sont pas, en premier lieu, des filtres AMC stables à long terme pour l'ozone.

L'utilisation de sorbants spécifiques avec des surfaces modifiées et stabilisées dans les filtres AMC ainsi spécifiés empêche la perte de performance mentionnée. Cela permet de respecter les limites du procédé sur une très longue période de fonctionnement et sur une large plage de concentrations d'entrée, y compris les pics journaliers, tout en respectant les instructions d'utilisation.

artemis control propose des filtres AMC spécialement conçus pour réduire l'ozone dans l'air de manière efficace et stable à long terme.

N'hésitez pas à nous contacter si vous avez besoin de plus d'informations, de conseils ou d'une solution de filtration AMC pour cette tâche.

## À propos d'artemis control

artemis control est un fournisseur de premier plan de solutions de contrôle de la contamination, notamment de filtres AMC, de filtres à particules et de services analytiques pour les industries des semi-conducteurs et des nanotechnologies en général. artemis control est certifié ISO 9001:2015 et dispose d'installations de fabrication, de service à la clientèle et/ou de recherche desservant les principaux sites mondiaux de ces industries. Pour plus d'informations, veuillez consulter le site [www.artemis-control.com](http://www.artemis-control.com)

## Littérature

- Bell, M. L., Dominici, F. et Samet, J. M. (2005). A Meta-Analysis of Time-Series Studies of Ozone and Mortality with Comparison to the National Morbidity, Mortality, and Air Pollution Study. *Epidemiology*, **16**(4), 436-445. DOI : 10.1097/01.ede8.0000165817.40152.85
- Cano-Ruiz, J. A., Kong, D., Balas, R. B. et Nazaroff, W. W. (1993). Removal of Reactive Gases at Indoor Surfaces : Combining Mass Transport and Surface Kinetics. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, **27**(13), 2039-2050. doi.org/10.1016/0960-1686(93)90276-5
- Cooper, O. R., Parrish, D. D. Ziemke, J., Balashov, N. V. & Cupeiro. M., (2014). Distribution mondiale et tendances de l'ozone troposphérique : An Observation-Based Review. *Elementa : Science of the Anthropocene*, **2**(1), 000029. DOI.org/10.12952/journal.elementa.000029
- Crutzen, P. J. (1971). Ozone Production Rates in an Oxygen-Hydrogen-Nitrogen Oxide Atmosphere (Taux de production d'ozone dans une atmosphère d'oxygène, d'hydrogène et d'oxyde d'azote). *Journal of Geophysical Research*, **76**(23), 7311-7327.
- Finlayson-Pitts, B. J. et Pitts, J. N. (2000). Chimie de la haute et de la basse atmosphère : Theory, Experiments, and Applications. *Academic Press*.
- Fishman, J. et Crutzen, P. J. (1978). L'origine de l'ozone dans la troposphère. *Nature*, **274**(5669), 855-858.
- Jacob, D. J. (2000). Heterogeneous Chemistry and Tropospheric Ozone (Chimie hétérogène et ozone troposphérique). *Atmospheric Environment*, **34**(12-14), 2131-2159.
- Jerrett, M., Burnett, R. T., Pope, C. A., Ito, K., Thurston, G., Krewski, D., et al. (2009). Long-Term Ozone Exposure and Mortality (Exposition à l'ozone à long terme et mortalité). *New England Journal of Medicine*, **360**(11), 1085-1095. DOI:10.1056/nejmoa0803894
- Kames, J., Schmidt, R.W.H, Ozone measurement instruments for stratosphere and troposphere, *Labor 2000*, 6-19 (1992)
- Monks, P. S. (2000). A Review of the Observations and Origins of the Spring Ozone Maximum (Examen des observations et des origines du maximum d'ozone de printemps). *Atmospheric Environment*, **34**(21), 3545-3561.
- Monks, P. S., Archibald, A. T., Colette, A., Cooper, O., Coyle, M., Derwent, R., et al. (2015). Tropospheric Ozone and its Precursors from the Urban to the Global Scale from Air Quality to Short-Lived Climate Forcer. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **15**(15), 8889-8973. DOI:10.5194/acp-15-8889-2015
- Park, Y.-K., Kim, H.-J., Kim, D.-W. et Park, J.-H. (2001). Environmental Ozone Effect on the Growth of Hemispherical Grained Silicon for ULSI DRAM Stacked Capacitor. *Journal of the Electrochemical Society*, **148**(8), F170. DOI.org/10.1149/1.1385379
- Petrack, L. et Dubowski, Y. (2009). Heterogeneous Oxidation of Squalene Film by Ozone under Various Indoor Conditions. *Indoor Air*, **19**(5), 381-391. DOI:10.1111/j.1600-0668.2009.00599.x
- Seinfeld, J. H. et Pandis, S. N. (2016). Chimie et physique de l'atmosphère : De la pollution atmosphérique au changement climatique. *John Wiley & Sons*.
- Wang, H., Huang, C., Tao, W. et al. Seasonality and Reduced Nitric Oxide Titration Dominated Ozone Increase during COVID-19 Lockdown in Eastern China. *npj Clim Atmos Sci* **5**, 24 (2022). DOI.org/10.1038/s41612-022-00249-3

## *artemis control - Contacts*

### Europe - Siège

#### Suisse

artemis control AG  
Seestrasse 147  
CH-8610 Uster  
Suisse

Téléphone : +41 43 366 40 10 +41 43 366 40 10  
Fax : +41 43 366 40 11  
Courriel : [info-eu@artemis-control.com](mailto:info-eu@artemis-control.com)  
[www.artemis-control.com](http://www.artemis-control.com)

#### Allemagne

artemis control GmbH  
Magdeburger Strasse 38  
D-47800 Krefeld  
Allemagne

Téléphone : +49 2151 74 77 800 +49 2151 74  
77 800  
Fax : +49 2151 74 77 801  
Courriel : [info-eu@artemis-control.com](mailto:info-eu@artemis-control.com)  
[www.artemis-control.com](http://www.artemis-control.com)

### Asie du Nord-Est

#### Taiwan

artemis control Co, Ltd.  
N° 241-3, Sec 1, Youth Rd.  
Parc industriel de la jeunesse  
Yang Mei, Taoyuan, Taiwan 326, ROC

Téléphone : + 886 3 496 23 45 ext : + 886 3 496  
23 45 ext. 606  
Fax : + 886 3 496 39 97  
Mobile : + 886 97 522 30 90  
Courriel : [info-nea@artemis-control.com](mailto:info-nea@artemis-control.com)

### Pacifique Sud-Est

#### Singapour

artemis control Pte Ltd  
21 Bukit Batok Crescent  
#12-79 Tour WCEGA  
Singapour 658065  
Singapour

Téléphone : + 65 6631 48 54 + 65 6631 48 54  
Fax : + 65 6826 43 32  
Courriel : [info-sea@artemis-control.com](mailto:info-sea@artemis-control.com)

## *Contenu et clause de non-responsabilité*

artemis control suppose que les informations contenues dans ce document sont correctes au moment de la publication. Toutes les spécifications et conceptions peuvent être modifiées sans préavis. artemis control n'est pas responsable des erreurs ou omissions dans ce document. artemis control n'est pas tenu de mettre à jour les informations contenues dans ce document. Vous ne pouvez pas utiliser ce document dans le cadre d'une infraction ou d'une autre analyse technique ou juridique relative aux produits d'artemis control décrits dans ce document. Ce document n'accorde aucune licence, expresse ou implicite, par préclusion ou autre, sur les droits de propriété intellectuelle.

Le contenu et la structure de ce rapport technique d'artemis control AG sont protégés par le droit d'auteur. La reproduction d'informations ou de données, en particulier l'utilisation de textes, de parties de textes ou d'images, de logos, nécessite l'accord écrit préalable d'artemis control. Les droits de marque et les droits d'auteur des images utilisées restent la propriété de leurs détenteurs respectifs. En cas de violation d'une marque ou d'un droit, veuillez-nous en informer.