

## Notes techniques

# DÉVELOPPEMENT D'UN CAPTEUR POUR LA MESURE EN TEMPS RÉEL DES EXPOSITIONS PROFESSIONNELLES À L'OZONE

## Essais d'intercomparaison avec les capteurs commerciaux

Actuellement, il n'existe pas de méthode de prélèvement et d'analyse permettant d'évaluer les expositions professionnelles individuelles à l'ozone. L'INRS a développé un capteur portable, dont les performances ont été comparées à celles de plusieurs dispositifs commerciaux. Cet article présente les principaux résultats et enseignements de cette étude.

MARIANNE  
GUILLEMOT,  
CHRISTEL  
RAVERA  
INRS,  
département  
Métrologie  
des polluants

BENJAMIN  
SUTTER  
INRS,  
département  
Ingénierie  
des procédés

CHRISTELLE  
GHAZALY  
INRS,  
département  
Métrologie  
des polluants  
(2016-2021) ;  
Klearia

L'ozone (O<sub>3</sub>) est un gaz naturellement présent dans l'atmosphère à l'état de traces, provenant principalement de la photodissociation du dioxygène moléculaire par les rayonnements ultraviolets. L'ozone est un oxydant puissant utilisé dans divers procédés industriels pour ses propriétés biocides, blanchissantes et désinfectantes. Il peut également être émis dans l'atmosphère des lieux de travail comme sous-produit lors du soudage à l'arc électrique et l'utilisation d'appareils à rayonnements ultraviolets (UV) [1].

Ces dernières années, différents dispositifs ont été mis sur le marché pour la désinfection des surfaces et l'élimination de bioaérosols dans l'air intérieur. Certains de ces équipements génèrent des concentrations importantes d'ozone dans l'air. C'est notamment le cas des épurateurs d'air intérieur associant média filtrant, photocatalyse, plasma froid et lampe UV [2].

L'exposition professionnelle à l'ozone peut provoquer des altérations sévères de la santé : céphalées, brûlures oculaires, irritation des muqueuses, lésions pulmonaires ou asthme [3,4,5,6]. Suite aux recommandations du comité d'évaluation des risques (CER) de l'Agence européenne des produits chimiques (Echa), l'ozone a été classé cancérigène de catégorie 2 et mutagène de catégorie 2 [7].

Pour protéger les travailleurs, la réglementation française fixe des valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) à l'ozone, de 100 parties par milliard (ppb) sur 8 heures et de 200 ppb sur 15 minutes (VLEP-CT : court terme) [8,9]. L'évaluation de l'exposition individuelle reste complexe.

Aucune méthode de prélèvement et d'analyse actuelle n'est conforme à la norme NF EN 482 [10]. La forte réactivité de l'ozone et les faibles rendements de récupération obtenus excluent les prélèvements classiques sur support adsorbant.

### ENCADRÉ QUELQUES DÉFINITIONS

- **Sensibilité** : lien entre les variations de signal du capteur et la concentration en polluant cible ;
- **Limite de détection** : concentration minimale détectable en polluant cible ;
- **Sélectivité** : aptitude à détecter le polluant cible à l'exclusion de tout autre ;
- **Interférents** : espèces autres que celle que l'on mesure conduisant à une réponse indésirable du capteur.

## RÉSUMÉ

L'ozone est un gaz instable et très oxydant. Il est utilisé dans différents secteurs industriels pour ses propriétés biocides, blanchissantes et oxydantes. Il est également émis dans des secteurs où il n'est pas utilisé intentionnellement, notamment lors des opérations de soudage à l'arc électrique. Une exposition à l'ozone peut provoquer des affections respiratoires et des lésions irritantes des muqueuses oculaires. Les valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) sont respectivement fixées à 100

ppb (partie par milliard ; VLEP-8h) et 200 ppb (VLEP-court terme). Actuellement, il n'existe pas de méthode de prélèvement et d'analyse permettant d'évaluer les expositions professionnelles individuelles à l'ozone. Seules des mesures d'ambiance peuvent être réalisées à l'aide d'analyseurs en temps réel, fiables mais encombrants et coûteux. Des détecteurs d'ozone portables sont également commercialisés mais, soit ils ne répondent pas aux exigences de l'évaluation des expositions professionnelles, en termes de

sélectivité et de sensibilité, soit leur coût les rend difficilement accessibles. Pour pallier ce manque, l'INRS a développé un capteur portable, sensible et sélectif à l'ozone en présence de dioxyde d'azote, principal interférent des dispositifs commerciaux. Les performances de ce capteur ont été comparées à celles de plusieurs dispositifs commerciaux basés sur des technologies de détection différentes, dans des conditions de température et d'humidité relative variables, et en présence de plusieurs co-polluants.

## DEVELOPMENT OF A SENSOR FOR REAL-TIME MONITORING OF OCCUPATIONAL EXPOSURE TO OZONE: COMPARATIVE TESTING WITH COMMERCIAL SENSORS

*Ozone is an unstable and highly oxidising gas. It is used in various industrial sectors due to its biocidal, bleaching, and oxidising properties. It is also unintentionally generated during certain activities, particularly electric arc welding. Exposure to ozone can cause respiratory disorders and irritation to the mucous membranes of the eyes. Occupational exposure limits (OELs) are set at 100 parts per billion (ppb) for an 8-hour period and 200 ppb for a short-term period.*

*Currently, there is no sampling or analytical method that can assess ozone exposure in the workplace for individuals. Only ambient air measurements can be taken using real-time monitoring instruments, which, while reliable, are bulky and expensive. Portable ozone detectors are also commercially available. However, they either do not meet the requirements for occupational exposure assessment in terms of selectivity and sensitivity, or they are too expensive to be widely adopted.*

*To address these limitations, INRS has developed a portable sensor that offers enhanced sensitivity and selectivity towards ozone in the presence of nitrogen dioxide, which is the primary substance that interferes with commercial devices. The performance of this sensor was compared with that of several commercial devices based on different detection technologies, under varying temperature and relative humidity conditions, as well as in the presence of several co-pollutants.*

La méthode de référence pour la mesure des concentrations d'ozone dans l'air repose sur la photométrie d'absorption UV à 254 nm. Bien que précis et fiables, les analyseurs utilisés pour la surveillance de l'air ambiant sont inadaptés à l'évaluation des expositions individuelles car trop encombrants, énergivores et coûteux.

Des analyseurs UV portables sont commercialisés mais leur coût reste un obstacle à une utilisation en routine pour l'évaluation des expositions professionnelles [11]. Les capteurs d'ozone commerciaux, dont le principe est basé sur une cellule électrochimique ou des semiconducteurs, sont peu sélectifs et/ou peu sensibles (Cf. Encadré). Ces dispositifs ne sont donc pas adaptés à l'évaluation des expositions professionnelles à l'ozone.

Dès lors, substituer les mesures d'ambiance par un suivi individuel en temps réel constitue un enjeu de prévention majeur pour évaluer l'exposition des

salariés, avertir en cas de fortes concentrations et corrélér de manière directe et visuelle les pratiques professionnelles et l'exposition. Pour cela, l'INRS a développé un capteur chimique portable, sensible et sélectif vis-à-vis de l'ozone (Cf. Encadré). Cet article compare les performances de ce capteur à divers dispositifs commerciaux, de manière à identifier le ou les systèmes remplissant le plus de critères demandés pour l'évaluation des expositions professionnelles.

### Méthodologie

La méthodologie de l'étude consiste à comparer les performances des différents capteurs dans des atmosphères contrôlées où les paramètres – concentration d'ozone, température et humidité relative – sont maîtrisés, en présence de plusieurs co-polluants tels que :

- le dioxyde d'azote et le chlore, interférents les



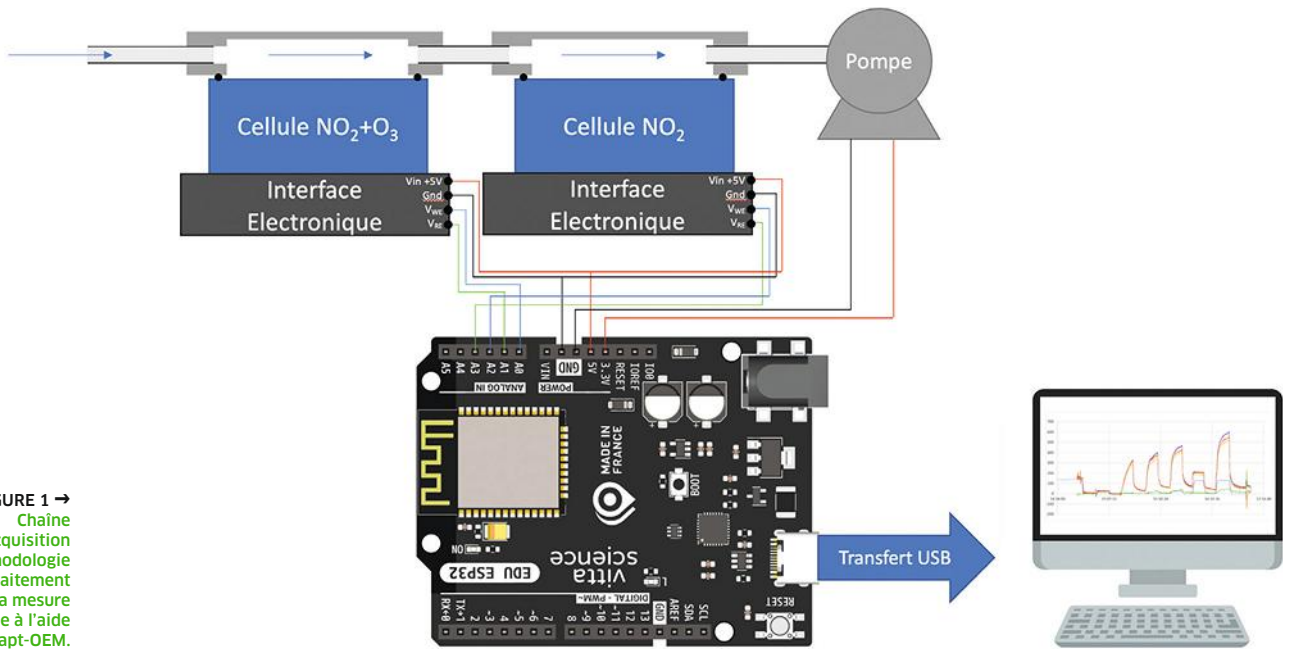


FIGURE 1 → Chaîne d'acquisition et méthodologie de traitement pour la mesure de l'ozone à l'aide du Capt-OEM.

plus fréquents de l'ozone dans les atmosphères professionnelles ;

- le toluène, comme exemple de composé organique volatil (COV) de la famille des hydrocarbures aromatiques<sup>1</sup>.

Trois types de capteurs ont été testés dans cette étude :

- deux capteurs commerciaux et prêts à l'emploi ;
- un capteur « OEM » (de l'anglais *Original Equipment Manufacturer*), constitué de deux cellules de mesures commercialisées intégrées dans un dispositif de prélèvement, d'acquisition et de traitement des données développé à l'INRS ;
- un capteur chimique entièrement développé à l'INRS.

**Les capteurs commerciaux**

Deux dispositifs portables ont été évalués :

- un capteur basé sur un système de détection électrochimique ; il est noté « Capt-EC » ;
- un capteur basé sur la mesure de l'absorbance du gaz prélevé dans l'ultraviolet, à 254 nm ; il est noté « Capt-UV ».

Ces deux capteurs ont été sélectionnés en fonction de la technologie utilisée, de la gamme de concentrations mesurables annoncée par le fabricant et de la possibilité d'accéder aux données enregistrées.

**Le capteur « OEM » étudié par l'INRS**

Un autre type de capteur est également étudié : il s'agit de deux cellules électrochimiques commerciales, montées en série selon les préconisations du constructeur : une cellule « NO<sub>2</sub>+O<sub>3</sub> », sensible à la fois à l'ozone et au dioxyde d'azote, et une cellule « NO<sub>2</sub> », dédiée au dioxyde d'azote. L'architecture du système comprend :

- les cellules de mesure : elles génèrent un courant proportionnel à la concentration de gaz ;
- l'interface électronique : elle convertit ce courant en tensions mesurables ;
- l'acquisition : un microcontrôleur assure la conversion analogique-numérique des tensions et transmet les données vers un ordinateur pour un traitement en temps réel.

Une pompe est associée au montage afin de renouveler l'air en continu au voisinage des cellules lors des essais et d'obtenir une meilleure réactivité (Cf. Figure 1). Les parties prélèvement d'air, alimentation électrique, interface électronique, acquisition et traitement du signal ont été réalisées à l'INRS. Ce dispositif est noté « Capt-OEM ».

→ **Calcul des concentrations**

Le calcul de la concentration en ozone est réalisé en deux étapes :

**Étape A : concentration en NO<sub>2</sub>**

Le capteur spécifique NO<sub>2</sub> possède une sensibilité au dioxyde d'azote, S<sub>NO<sub>2</sub></sub> [mV·ppb<sup>-1</sup>] donnée par le fabricant :

$$C_{NO_2} = \frac{V_{net,NO_2}}{S_{NO_2}} \tag{1}$$

Où V<sub>net</sub> correspond au signal du capteur.

**Étape B : concentration en O<sub>3</sub>**

La contribution due au NO<sub>2</sub> est soustraite du signal de la cellule mixte « NO<sub>2</sub>+O<sub>3</sub> » notée OX dans l'équation :

$$C_{O_3} = \frac{V_{net,ox} - (S_{ox,NO_2} \cdot C_{NO_2})}{S_{ox,O_3}} \tag{2}$$

Où  $S_{Ox,NO_2}$  et  $S_{Ox,O_3}$  [ $mV \cdot ppb^{-1}$ ] représentent respectivement la sensibilité de la cellule OX au dioxyde d'azote et à l'ozone.

Deux niveaux de traitement sont possibles pour le calcul de la concentration en ozone :

- à partir des données de sensibilité transmises par le fabricant des cellules électrochimiques ;
- ou bien, en s'appuyant sur une calibration expérimentale (relation signal-concentration) établie lors d'expositions à des niveaux connus de polluant.

Les résultats des deux niveaux de traitement sont désignés par « Capt-OEM » et « Capt-OEM-corr », respectivement.

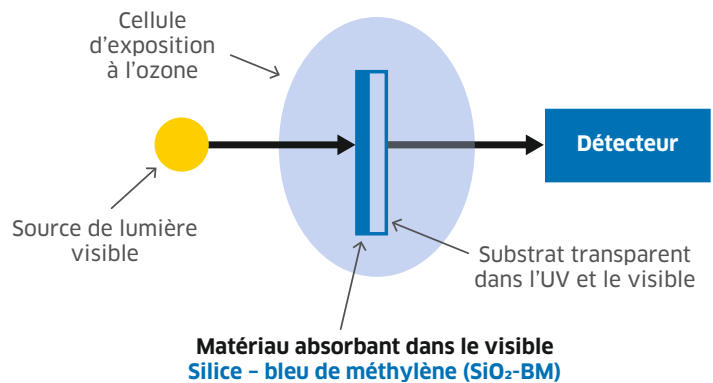
### Le capteur développé par l'INRS

Ce dispositif est un capteur chimique basé sur l'interaction entre un gaz cible et un matériau sensible, développé de manière à ce qu'au moins une de ses propriétés physiques (absorbance, conductivité, masse, ...) soit modifiée au contact des molécules gazeuses ciblées. Ce matériau est associé à un transducteur qui mesure en continu toute variation de cette propriété et permet ainsi de mettre en évidence la présence ou non du composé ciblé. Le matériau sensible est déposé sous forme de film mince sur le substrat, ce qui va permettre la miniaturisation du capteur.

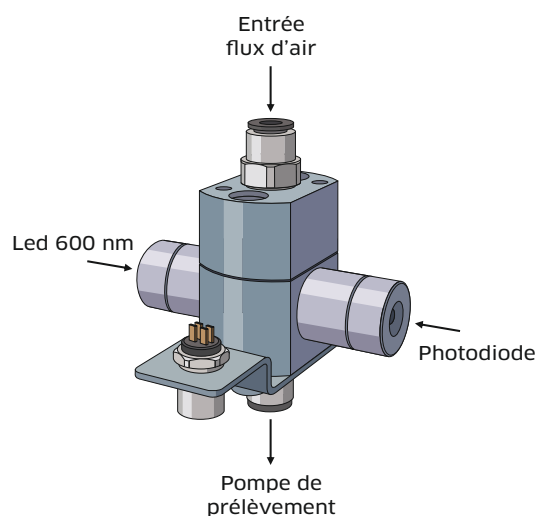
Le matériau sensible sélectionné pour la détection de l'ozone est une silice mésoporeuse déposée sur une plaque de verre et imprégnée de bleu de méthylène (Cf. Figure 2) [12,13].

L'absorbance du bleu de méthylène est mesurée en continu à l'aide d'un circuit optique contenant une source de lumière visible éclairant à 600 nm (orange) et un détecteur enregistrant le signal résultant du matériau absorbant. La plaque de verre revêtue du matériau sensible est insérée dans une cellule de mesure, intégrant une LED comme source lumineuse et une photodiode comme détecteur (Cf. Figure 3).

L'air ambiant est prélevé à l'aide d'une pompe et traverse la cellule de mesure contenant le matériau sensible. La présence d'ozone dans l'air entraîne une oxydation du bleu de méthylène, ce qui se traduit par une diminution de sa coloration bleue et de son absorbance à 600 nm. Cela conduit à une augmentation de la tension mesurée par la photodiode.



↑ FIGURE 2  
Principe de fonctionnement du capteur chimique d'ozone développé par l'INRS.



← FIGURE 3  
Cellule de mesure du capteur chimique d'ozone INRS.

### → Calcul des concentrations d'ozone

La relation entre la variation de l'absorbance du bleu de méthylène et la concentration en ozone a été modélisée à partir d'un modèle cinétique de pseudo-second ordre [14].

Une unité d'acquisition et de traitement du signal a été développée de manière à afficher en temps réel la concentration d'ozone mesurée par le capteur, et d'enregistrer les données pour un traitement ultérieur. Ce capteur est noté « Capt-INRS » dans les essais suivants.

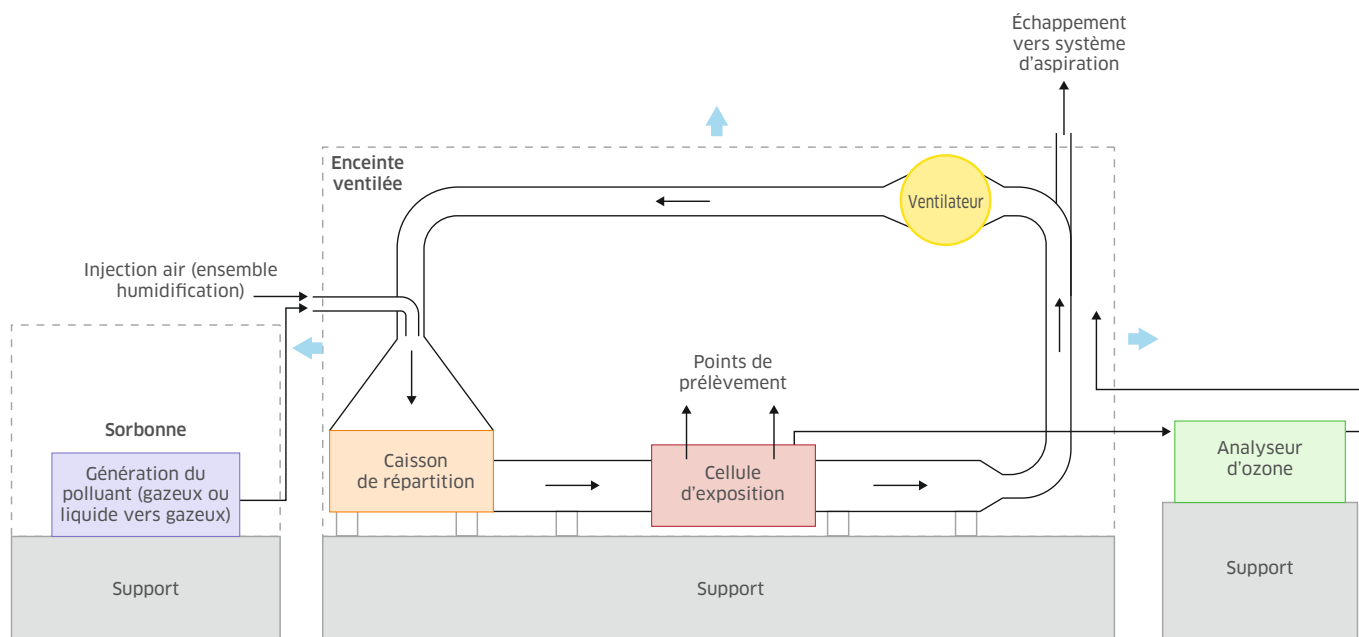
Le Tableau 1 présente les différentes caractéristiques des capteurs évalués.

↓ TABLEAU 1  
Caractéristiques des différents capteurs testés.

CAPTEURS	DÉBIT DE PRÉLÈVEMENT	LIMITE DE DÉTECTION	INTERFÉRENCE CONNUE	COÛT
Capt-EC	NC <sup>(a)</sup>	20 ppb	Réponse de 0,71 ppm <sup>(b)</sup> en présence de 1 ppm de NO <sub>2</sub> Réponse de 0,8 ppm en présence de 1 ppm de Cl <sub>2</sub>	900 €
Capt-UV	0,8 L/min	3 ppb	Pas d'interférence	10 000 €
Capt-OEM	1,5 L/min	< 15 ppb	Réponse de 100 % à 5 ppm de Cl <sub>2</sub>	130 € <sup>(c)</sup>
Capt-INRS	0,35 L/min	10 ppb	Pas d'interférence connue avant les essais.	< 1 000 € <sup>(d)</sup>

(a) Non communiqué. (b) Partie par million (1 ppm = 1 000 ppb). (c) Hors interface électronique, système d'acquisition, pompe et système de calibration expérimentale. (d) Estimation réalisée par un bureau d'étude.





↑ FIGURE 4 Schéma synoptique du banc de génération.

#### → Les bancs d'essais

Les performances des différents capteurs ont été évaluées dans deux bancs d'essais, permettant de générer plusieurs niveaux de concentration en ozone, sous différents taux d'humidité relative et à des températures différentes. La sélectivité des capteurs a également été évaluée en les exposant à différents co-polluants, seul ou en mélange avec l'ozone.

Le banc d'essai présenté sur la Figure 4 permet de générer différentes concentrations d'ozone, entre le dixième et deux fois la VLEP-8h, à une température et un taux d'humidité contrôlés, compris respectivement entre 15 °C et 40 °C; et entre 20 % et 80 %. Deux co-polluants, le dioxyde d'azote et le toluène, ont également été générés dans ce banc, seul ou en mélange avec l'ozone.

Ce dispositif de génération est constitué d'un générateur d'ozone (*Thermo Scientific Model 49i*, étalonné par l'AASQA Grand-Est<sup>2</sup>), également utilisé en tant qu'analyseur de référence pour le suivi de la concentration d'ozone dans le banc. L'ozone est injecté dans le banc d'essai et dilué dans de l'air de manière à obtenir les concentrations souhaitées. Il est ensuite homogénéisé dans le caisson de répartition. Le débit d'air dans le banc est compris entre 35 L/min et 70 L/min, de manière à obtenir les concentrations d'intérêt des différents polluants. Le flux est accéléré à l'aide d'un ventilateur afin d'obtenir des vitesses d'air représentatives des situations professionnelles, entre 0,1 m/s et 2 m/s. Le dioxyde d'azote est généré à partir d'une bouteille étalon et un analyseur de dioxyde d'azote

(*Ecotech Serinus 40*) est utilisé pour mesurer sa concentration dans le banc. Le toluène est généré à l'aide d'un pousse-seringue qui envoie du toluène liquide dans une cellule thermostatée à 70 °C où il est vaporisé. Une analyse en ligne par chromatographie en phase gazeuse couplée à un détecteur à ionisation de flamme permet de caractériser la concentration de toluène générée dans le banc. Selon leur mode de prélèvement, les dispositifs sont soit placés à l'intérieur de la cellule d'exposition, soit connectés à un point de prélèvement au niveau de la cellule d'exposition.

La sensibilité au chlore des différents capteurs a été caractérisée dans un second banc d'essai, constitué d'un matériau compatible avec les propriétés corrosives de ce gaz et équipé d'un dispositif de neutralisation avant évacuation. Le débit dans le banc est de 30 L/min et la concentration de chlore générée à partir d'une bouteille étalon est mesurée à l'aide d'un capteur de chlore préalablement étalonné. Le générateur-analyseur d'ozone est utilisé pour générer l'ozone en mélange avec le chlore et mesurer la concentration après dilution dans le banc. Les essais de sensibilité au chlore ont été réalisés sous air sec à 20 °C.

#### Résultats et discussion

Les temps de réponse de l'ensemble des capteurs, inférieurs ou égaux à une minute, permettent une comparaison directe avec la VLEP-CT (15 minutes). Ce paramètre n'a donc pas été évalué dans cette étude, qui se concentre prioritairement sur la justesse de la mesure et la sélectivité des dispositifs.

## Description des essais

Tous les essais sont réalisés sous flux continu selon plusieurs scénarios d'exposition, en faisant varier la concentration d'ozone, de manière croissante puis décroissante, la température, le taux d'humidité relative (HR) et les différents co-polluants, seuls ou en mélange avec l'ozone. L'objectif de ces essais est de caractériser les capteurs dans des situations proches de celles rencontrées dans différentes atmosphères professionnelles.

Un exemple de scénario d'exposition est présenté sur la *Figure 5*, où les réponses de Capt-EC (en rouge) et Capt-UV (en vert) sont reportées pour différentes concentrations en ozone, à 20 °C et 50 % d'humidité relative, puis à 20 °C et 70 % HR, et enfin à 30 °C et 50 % HR.

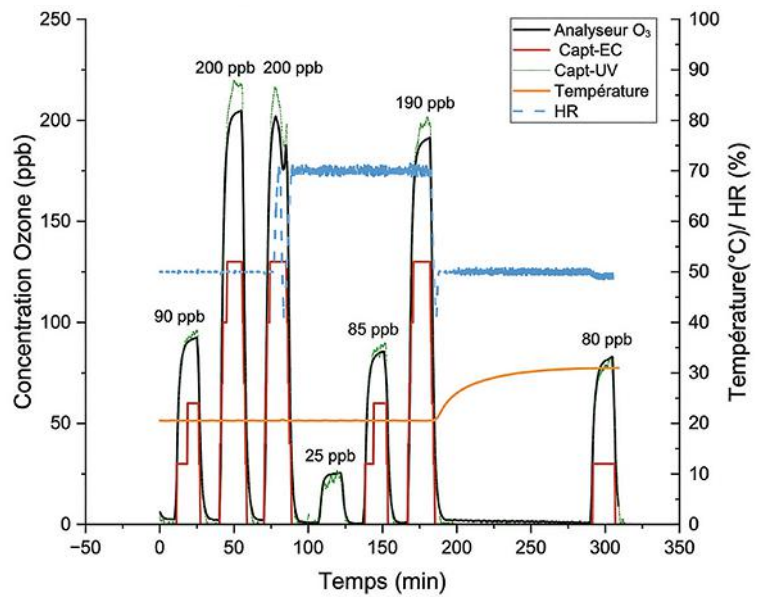
Ce graphique montre les écarts de réponse entre les dispositifs en fonction des conditions d'essais. L'ensemble des essais a été réalisé selon ce mode opératoire. L'influence des conditions d'essais est caractérisée en comparant la réponse des différents capteurs à celle de l'analyseur de référence. Les données sont moyennées sur les cinq dernières minutes de chaque palier de stabilité. Ces valeurs moyennes constituent la base de l'interprétation des sensibilités et des effets d'interférence détaillés dans la suite de cet article.

## Réponse et sensibilité des différents capteurs à 20 °C et 50 % HR

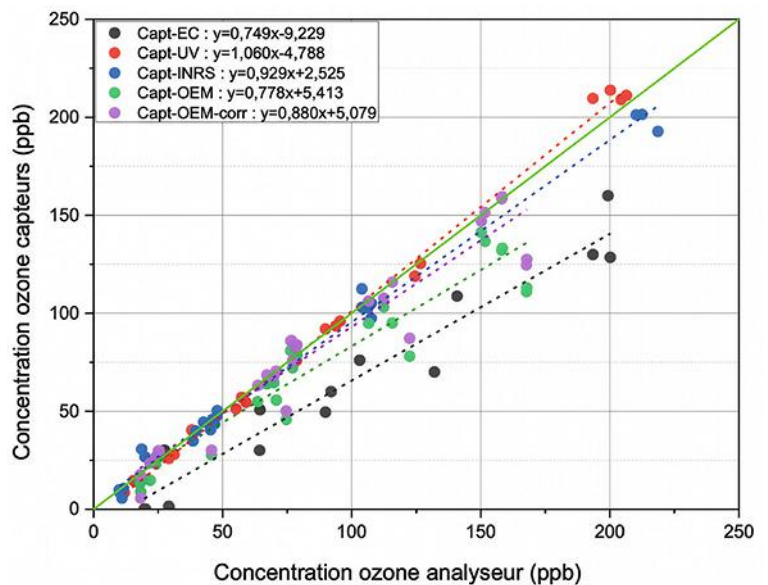
Ces essais ont pour objectifs de caractériser la réponse de chaque capteur pour différentes concentrations d'ozone. La *Figure 6* reporte la concentration moyenne mesurée par les capteurs en fonction de celle de l'analyseur de référence. La ligne pleine verte représente une parfaite concordance entre les dispositifs. Tous les points situés au-dessus correspondent à une surestimation de la concentration d'ozone (pente supérieure à 1), et tous les points situés en dessous à une sous-estimation (pente inférieure à 1).

Les deux capteurs Capt-UV et Capt-INRS montrent une réponse juste, avec moins de 10 % d'écart par rapport à la valeur de l'analyseur de référence. Les deux capteurs Capt-EC et Capt-OEM sous-estiment systématiquement les concentrations en ozone de plus de 20 %.

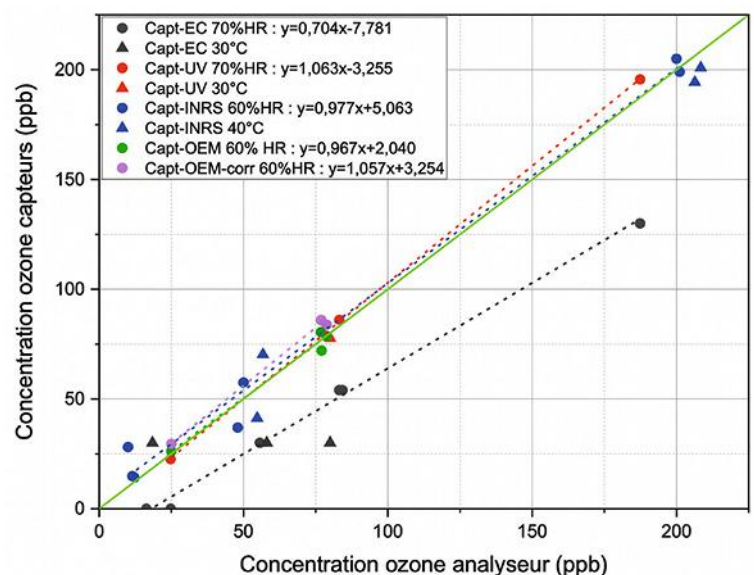
Le traitement du signal apporté à Capt-OEM, notamment l'étalonnage à l'ozone, permet d'améliorer la justesse des mesures comme le montrent les résultats de Capt-OEM-corr. Ce capteur montre toutefois un défaut de répétabilité sur certaines expérimentations. Les capteurs Capt-UV, Capt-INRS, Capt-OEM et Capt-OEM-corr offrent une très bonne sensibilité, avec respectivement des limites de détection de 10, 10, 20 et 20 ppb, soit le dixième et le cinquième de la VLEP-8h. *A contrario*, Capt-EC ne détecte pas les concentrations d'ozone inférieures



↑ FIGURE 5 influence de la température et du taux d'humidité relative sur la réponse de Capt-EC et de Capt-UV.

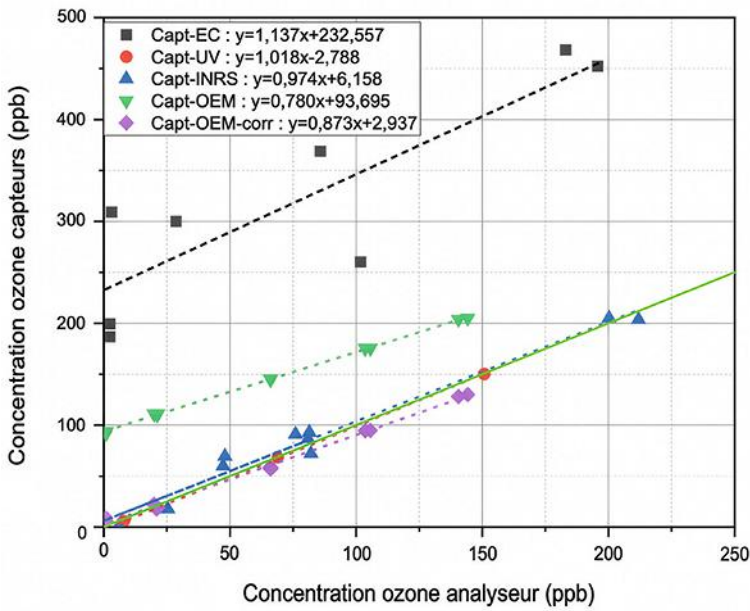


↑ FIGURE 6 Réponse des capteurs en fonction de l'analyseur de référence.

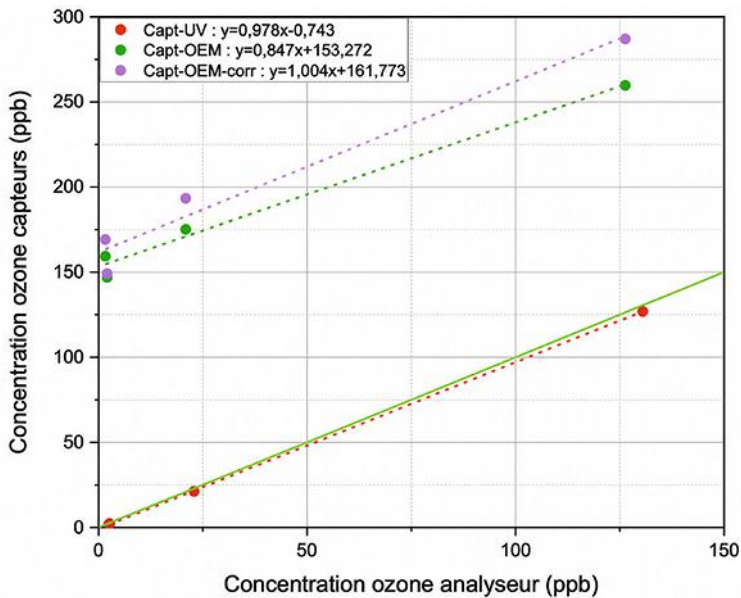


↑ FIGURE 7 Réponse des différents capteurs à HR > 50 % et T > 25 °C.

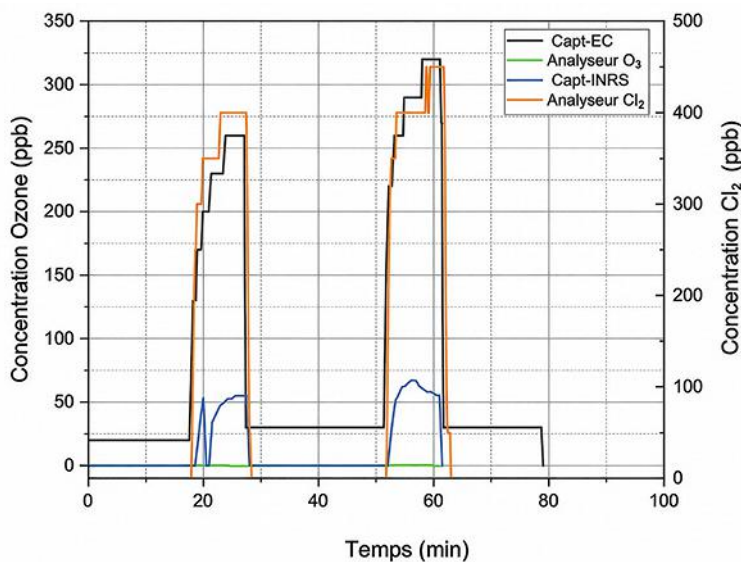




↑ FIGURE 8 Réponse des capteurs en présence de 500 ppb de dioxyde d'azote.



↑ FIGURE 9 Réponse de Capt-UV, Capt-OEM et Capt-OEM-corr en présence de 500 ppb de chlore.



↑ FIGURE 10 Réponse de Capt-EC et Capt-INRS en présence de chlore.

à 60 ppb (points situés sur l'axe des abscisses). Les capteurs Capt-EC et Capt-OEM sont caractérisés par une grande variabilité de leur réponse, indiquant une faible répétabilité de la mesure.

### Influence des conditions de température et d'humidité

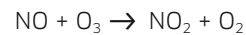
Les différents capteurs ont ensuite été soumis à différents taux d'humidité relative (60 % et 70 %) et différentes températures (30°C et 40°C) pour simuler différentes situations de travail (Cf. Figure 7).

Il apparaît dans ce graphique que la réponse des différents capteurs n'est pas influencée de manière significative par la température et le taux d'humidité relative. Les dispositifs mesurent la température en temps réel, à l'exception de Capt-EC pour lequel cette information n'est pas disponible. Le traitement du signal de Capt-INRS, Capt-OEM et Capt-OEM-corr intègre une correction de la réponse en fonction de la température. Par ailleurs, Capt-UV et Capt-INRS disposent en amont de la cellule de mesure d'un dispositif de stabilisation de l'humidité relative, leur permettant de ne pas être influencés par ce paramètre.

### Influence des co-polluants

#### → Le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>)

Le dioxyde d'azote peut être présent dans différentes situations professionnelles en même temps que l'ozone, soit parce que ces deux gaz sont générés par l'activité professionnelle, soit parce que le dioxyde d'azote est formé par la réaction entre l'ozone et le monoxyde d'azote :



C'est le cas, par exemple, du soudage à l'arc électrique : le dioxyde d'azote est issu de la réaction entre l'ozone produit par la réaction entre l'arc électrique et l'oxygène de l'air et les oxydes d'azote formés par l'oxygène et l'azote de l'air ambiant lorsque celui-ci est porté à des températures élevées.

La Figure 8 reporte la réponse des cinq capteurs en présence de 500 ppb de NO<sub>2</sub>, correspondant à la VLEP-8h de cette substance.

L'interférence du NO<sub>2</sub> est bien connue, notamment dans le cas des capteurs basés sur une cellule de mesure électrochimique. Elle est renseignée par les fabricants : pour le capteur Capt-EC, une valeur de 0,71 ppm est indiquée en présence de 1 ppm de NO<sub>2</sub>. Cette interférence est bien mise en évidence dans cet essai, avec une surestimation de la concentration d'ozone de plus de 200 ppb par le capteur Capt-EC. Les mesures de Capt-EC étant peu répétables, comme le montre la Figure 8, il n'est pas possible de corriger sa réponse en fonction de la concentration en NO<sub>2</sub>. Par conséquent, la présence

d'ozone est masquée par cette sensibilité croisée<sup>3</sup>. Les dispositifs Capt-OEM et Capt-OEM-corr intègrent une cellule de mesure spécifique au NO<sub>2</sub>, dont le signal est utilisé pour calculer la réponse à l'ozone de la cellule OX. Lorsque seul l'algorithme de correction du constructeur est appliqué, pour Capt-OEM, une surestimation de la concentration en ozone, de l'ordre de 100 ppb, est observée en présence de 500 ppb de NO<sub>2</sub>. En ce qui concerne Capt-OEM-corr, le double étalonnage des deux cellules vis-à-vis du NO<sub>2</sub> et de l'O<sub>3</sub> permet de compenser efficacement cette interférence. Cette étape de calibration expérimentale est indispensable pour améliorer la justesse du système et maîtriser sa sensibilité croisée.

Les deux capteurs dont la mesure est basée sur une cellule optique, Capt-UV et Capt-INRS, sont sélectifs à l'ozone en présence de NO<sub>2</sub>.

#### → Le chlore (Cl<sub>2</sub>)

Le chlore est un interférent majeur de la plupart des capteurs d'ozone commerciaux. Les fabricants de Capt-EC et Capt-OEM reportent une sensibilité croisée respective de 0,8 ppm à 1 ppm de chlore (Cl<sub>2</sub>) et de 100 % à 5 ppm de Cl<sub>2</sub>.

Les essais ont été réalisés en présence de 500 ppb de chlore, correspondant à la VLEP-CT de ce gaz. La Figure 9 décrit les réponses de Capt-UV, Capt-OEM et Capt-OEM-corr à différentes concentrations d'ozone.

La réponse de Capt-OEM-corr est impactée par la présence de chlore avec une surestimation d'environ 160 ppb de la concentration en ozone. La réponse de Capt-UV n'est pas influencée par ce co-polluant.

Capt-EC et Capt-INRS n'ont pas pu être testés avec les deux gaz en mélange, mais seulement en présence de chlore à 400 ppb et 450 ppb (Cf. Figure 10).

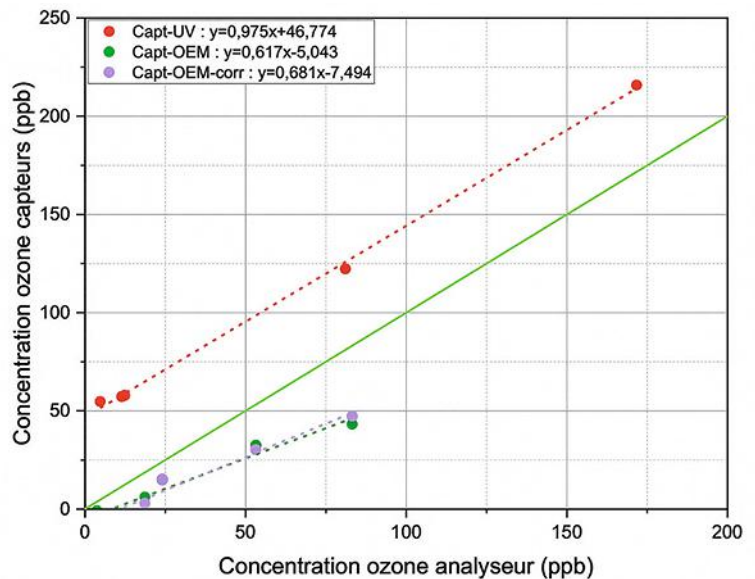
La réponse de Capt-EC est fortement impactée par la présence de chlore avec une réponse de 260 et 320 ppb lors des expositions successives au chlore. Capt-INRS est également influencé, mais dans une moindre mesure, par la présence de Cl<sub>2</sub> puisqu'il annonce des concentrations d'environ 50 ppb d'ozone lors des expositions au chlore.

Les faux positifs de Capt-EC, Capt-INRS et Capt-OEM-corr peuvent masquer la présence d'ozone en mélange avec le chlore.

#### → Le toluène

Pour des raisons techniques, les performances de Capt-EC et Capt-INRS n'ont pas pu être évaluées en présence de toluène.

La Figure 11 montre que Capt-UV est sensible à ce co-polluant, avec une surestimation de la concentration d'ozone d'environ 45 ppb pour une concentration de 20 ppm de toluène, correspondant à la



↑ FIGURE 11 Réponse des capteurs en présence de 20 ppm de toluène.

VLEP-8h de ce gaz. Le toluène est une substance chimique dont l'absorbance en UV est connue, comme tous les hydrocarbures aromatiques. Ici, à 254 nm, l'absorbance du toluène est faible au regard de sa concentration mais elle perturbe la mesure d'ozone. L'interférence du toluène sur la mesure de Capt-UV est la même quelle que soit la concentration en ozone. Si les deux substances sont présentes en même temps, une correction peut alors être réalisée par le suivi de la concentration en toluène à l'aide d'un capteur dédié.

Dans le cas de Capt-OEM et Capt-OEM-corr, une interférence « négative » est observée, avec une sous-estimation de 35 % à 40 % de la concentration en ozone. Cette interférence n'est pas documentée par le fabricant du capteur.

#### Synthèse des résultats

Les cinq capteurs étant basés sur des principes de mesure différents, leurs performances varient en fonction de différents facteurs. Le Tableau 2 récapitule les résultats obtenus.

#### Conclusion

Cette étude a permis, pour la première fois, d'évaluer les performances de différents types de capteurs d'ozone. Ces essais montrent qu'il n'y a pas de capteur portable « idéal » pour l'évaluation des expositions professionnelles à l'ozone. Le dispositif le plus performant en termes de sélectivité, sensibilité et justesse est Capt-UV, dont le seul interférent mis en évidence ici est le toluène. Cependant, son coût limite fortement son déploiement en santé au travail. Les capteurs dont la mesure est basée sur une cellule électrochimique sont très peu sélectifs. En plus de la sensibilité croisée avec le dioxyde d'azote et le chlore, Capt-EC a montré des performances limitées en termes de sensibilité, justesse et répétabilité des mesures.



	CAPT-EC	CAPT-UV	CAPT-OEM	CAPT-OEM-corr	CAPT-INRS
Limite de détection (ppb)	60	10	20	20	10
Justesse	☹	☺	☹	☺	☺
Répétabilité	☹	☺	☹	☺	☺
Influence de la T °C (30 °C - 40 °C)	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune
Influence de l'HR (60 % - 70 %)	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune
Sensibilité croisée	NO <sub>2</sub> 500 ppb	230 ppb d'O <sub>3</sub>	Aucune	90 ppb d'O <sub>3</sub>	Aucune
	Cl <sub>2</sub> 500 ppb	≈ 290 ppb d'O <sub>3</sub>	Aucune	150 ppb d'O <sub>3</sub>	160 ppb d'O <sub>3</sub>
	Toluène 20 ppm	Non testée	50 ppb d'O <sub>3</sub>	- 40 %	- 35 %
Coût (rappel)	900 €	10 000 €	130 € <sup>(a)</sup>		< 1 000 € <sup>(b)</sup>

(a) Hors interface électronique, système d'acquisition, pompe et système de calibration expérimentale. (b) Estimation réalisée par un bureau d'étude.

↑ TABLEAU 2  
Résultats des différents capteurs testés.

Cette technologie peut être utilisée pour la mesure de l'ozone, mais nécessite un étalonnage sous ozone et sous dioxyde d'azote, ainsi qu'une intégration dans un dispositif de prélèvement, d'acquisition et de traitement du signal comme l'ont montré les résultats de Capt-OEM et Capt-OEM-corr.

Le capteur développé par l'INRS offre l'avantage de ne pas être sensible au dioxyde d'azote, et faiblement sensible au chlore. Il a montré des performances équivalentes à Capt-UV en termes de limite de détection et de justesse. Sa sélectivité en présence de toluène devra également être évaluée. Son principe de mesure de l'absorbance dans le domaine visible le rend moins coûteux à fabriquer que Capt-UV, mais il n'est actuellement pas commercialisé.

Dans tous les cas, l'utilisation d'un capteur nécessitent de bien connaître l'environnement dans lequel seront réalisées les mesures, afin d'anticiper le cas échéant d'éventuelles interférences et de suivre les concentrations des co-polluants à l'aide de capteurs dédiés. ●

1. Devant l'impossibilité de tester l'ensemble des COV, le laboratoire a sélectionné les interférents les plus connus : le dioxyde d'azote et le chlore, ou bien des molécules représentatives de « grandes familles » de molécules : toluène pour les hydrocarbures aromatiques, formaldéhyde pour les aldéhydes. Aucune interférence n'a été observée pour le formaldéhyde, lors de la manipulation effectuée.
2. AASQA : association agréée de surveillance de la qualité de l'air.
3. L'ozone ayant une VLEP inférieure à celle du dioxyde d'azote, il est important que sa présence soit identifiée avec certitude.

## BIBLIOGRAPHIE

[1] SINGER B.C. ET AL. – Indoor secondary pollutants from cleaning product and air freshener use in the presence of ozone. *Atmos. Environ.*, 2006, 40 (40), pp. 6696-6710.

[2] BÉMER D., GÉRARDIN F. – Évaluation des performances de filtration d'aérosols de trois technologies d'épurateurs d'air intérieur. *Hygiène & sécurité du travail*, 2022, 269, pp. 42-53. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=NT%20103>

[3] WESCHLER C.J. – Ozone in indoor environments: concentration and chemistry. *Indoor Air*, 2000, 10 (4), pp. 269-288.

[4] KAMPA M., CASTANAS E. – Human health effects of air pollution. *Environmental Pollution*, 2008, 151 (2), pp. 362-367.

[5] WOLKOFF P. – Indoor air pollutants in office environments: assessment of comfort, health, and performance. *International journal of hygiene and environmental health*, 2013, 216, pp. 371-394.

[6] MUDWAY I.S., KELLY F.J. – Ozone and the lung: a sensitive issue. *Molecular aspects of medicine*, 2000, 21, 1-2, pp. 1-48. Accessible sur : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10804262/>

[7] 23<sup>e</sup> ADAPTATION AU PROGRÈS TECHNIQUE (ATP) DU RÈGLEMENT CLP, applicable à partir du 1<sup>er</sup> février 2027. *Journal officiel de l'Union européenne*, 20 juin 2025.

[8] INRS – Fiche toxicologique n° 43 – Ozone. 2024. Accessible sur : [https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX\\_43](https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_43)

[9] CIRCULAIRE DU MINISTÈRE DU TRAVAIL DU 19 JUILLET 1982 relative à certaines substances dangereuses. In: INRS - Les VLEP. ED 6443, 2022. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206443>

[10] NORME NF EN 482 – Exposition sur les lieux de travail. Procédures pour déterminer la concentration d'agents chimiques. Exigences élémentaires relatives aux performances.

Afnor, mars 2021. Accessible sur : <https://www.boutique.afnor.org/> (site payant).

[11] SAGONA J.A. ET AL. – Accuracy and practicality of a portable ozone monitor for personal exposure estimates. *Atmos. Environ.*, 2018, 1, 175, pp. 120-126.

[12] GHAZALY C. – Développement d'un capteur spectrophotométrique pour la mesure en temps réel des expositions professionnelles à l'ozone. Thèse, Université de Lorraine, 2019. Accessible sur : [https://hal.univ-lorraine.fr/tel-02529404/file/DDOC\\_T\\_2019\\_0207\\_GHAZALY.pdf](https://hal.univ-lorraine.fr/tel-02529404/file/DDOC_T_2019_0207_GHAZALY.pdf)

[13] GHAZALY C., GUILLEMOT M. ET AL. – Real-time ozone sensor based on selective oxidation of methylene blue in mesoporous silica films. *Sensors*, 2019, 19 (16), 3508. Accessible sur : <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/16/3508>

[14] PLAZINSKI W. ET AL. – Modeling of sorption kinetics: The pseudo-second order equation and the sorbate intraparticle diffusivity. *Adsorption*, 2013, 19 (5), pp. 1055-1064.