



TECHNIQUES
DE L'INGÉNIEUR

LES FOCUS
TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR



QUALITÉ DE L'AIR SOUS SURVEILLANCE : MESURES ET RÉGLEMENTATIONS

août / 2022

SOMMAIRE

SOMMAIRE	2
INTRODUCTION	3
FRANCE ET UE : DEUX NIVEAUX DE CONTRÔLE DES POLLUANTS	4
▪ LE DISPOSITIF FRANÇAIS DE SURVEILLANCE DE LA QUALITÉ DE L'AIR EN CONSTANTE ÉVOLUTION	4
▪ LA MESURE DES POLLUANTS RÉGLEMENTÉS DANS L'AIR DOIT RESPECTER UN CADRE NORMATIF	6
▪ UNE DIVERSITÉ D'OUTILS ET DE MÉTHODES POUR MESURER LES POLLUANTS NON RÉGLEMENTÉS DANS L'AIR	8
▪ LES OUTILS DE MODÉLISATION DE LA QUALITÉ DE L'AIR S'ENRICHISSENT DE NOUVELLES DONNÉES	11
POUR ALLER PLUS LOIN	14
▪ DE PARIS À MARSEILLE, QUELS ENGAGEMENTS CONTRE LA POLLUTION DE L'AIR ?	14
▪ LES FEUX DE FORÊT FONT EXPLOSER LES NIVEAUX DE PARTICULES FINES	15
▪ LE FRET ROUTIER OPÈRE UNE LENTE MUTATION	16
▪ LA FRANCE, PREMIER ÉMETTEUR DE PARTICULES FINES PM2,5 EN EUROPE	18
▪ LA MOBILISATION DES CITOYENS POUR LA QUALITÉ DE LEUR AIR	19
▪ LES THÈSES DU MOIS : "QUALITÉ DE L'AIR SOUS SURVEILLANCE : MESURES ET RÉGLEMENTATIONS"	21

INTRODUCTION

La qualité de l'air est maintenue sous surveillance au niveau français et européen. Sa dégradation a nécessité le développement de capteurs pour mesurer ses différents polluants, ainsi que des outils de modélisation et de cartographie, en conformité avec une réglementation européenne. Face à la pollution de l'air et ses effets significatifs sur la santé et les écosystèmes, la France a mis en place des stations de mesure. Ce dispositif évolue au gré des nouvelles réglementations et des nouveaux équipements, mais aussi en vue d'améliorer la qualité de l'air. Chaque membre de l'Union Européenne se doit de surveiller certains polluants gazeux réglementés dans l'air. Les principes de mesure des instruments utilisés doivent être conformes à des normes et nécessitent la mise en place d'une chaîne de traçabilité métrologique. Face à l'arrivée de nouveaux capteurs, de nouvelles spécifications techniques apparaissent et une certification est proposée. En plus des polluants réglementés établis par l'Europe, la France a défini une liste de polluants d'intérêt national à mesurer dans l'air. L'Anses, Agence Nationale Sécurité Sanitaire Alimentaire Nationale, recommande de surveiller ces autres polluants, considérés comme prioritaires. Peu de méthodes normalisées existent pour les quantifier et une diversité d'outils et de méthodes est utilisée pour les qualifier. Afin d'améliorer les cartographies de polluants dans l'air à l'échelle d'un territoire, les outils de modélisation évoluent. De nouvelles données viennent enrichir les mesures de capteurs récemment déployés sur le terrain. L'amélioration des connaissances sur la chimie de l'atmosphère aide aussi à perfectionner ces modèles.

FRANCE ET UE : DEUX NIVEAUX DE CONTRÔLE DES POLLUANTS

LE DISPOSITIF FRANÇAIS DE SURVEILLANCE DE LA QUALITÉ DE L'AIR EN CONSTANTE ÉVOLUTION

Face à la pollution de l'air et ses effets significatifs sur la santé et les écosystèmes, la France a mis en place un dispositif, comprenant notamment des stations de mesure, pour les surveiller. Ce dispositif ne cesse d'évoluer au gré de nouvelles réglementations et de la nécessité d'améliorer la qualité de l'air, ainsi que face à l'arrivée de nouveaux équipements et aux avancées de la science.

La **pollution de l'air** produit de multiples effets négatifs. Chaque année, environ 40 000 décès prématurés lui sont attribués, selon Santé publique France. Une commission du Sénat a quant à elle chiffré son coût sanitaire annuel à environ 100 milliards d'euros. Les écosystèmes ne sont pas épargnés, en particulier les cultures agricoles, dont les rendements peuvent par exemple souffrir de concentrations en ozone trop élevées. Tout comme le bâti et les matériaux, qui se dégradent sous l'effet d'une exposition prolongée à différents polluants (dioxyde de soufre, dioxyde d'azote, carbone suie...).

Face à cette situation, l'Europe impose à chaque État membre de surveiller certains polluants dits réglementés et a établi des seuils à ne pas dépasser. Même si la pollution a globalement tendance à baisser en France, sous l'action de politiques publiques telle que la limitation des émissions industrielles, l'État est malgré tout régulièrement condamné par Bruxelles, pour non-respect du seuil réglementaire du dioxyde d'azote (NO₂) et des particules. Les dépassements sont surtout observés dans de grandes agglomérations, comme à Paris, Lyon ou encore Marseille, et sont liés notamment à la densité du trafic routier.

Le ministère de l'Environnement a la responsabilité de la surveillance de la qualité de l'air sur tout le territoire natio-

nal, ainsi que la prévention et l'information du public. C'est lui aussi qui définit la réglementation, en accord avec les dispositions européennes. En plus de la surveillance des **polluants réglementés**, l'État français a décidé d'aller plus loin et a défini une liste de **polluants d'intérêt national (PIN)** à mesurer. Celle-ci regroupe un peu plus de 70 pesticides, certaines espèces chimiques présentes dans des particules fines (carbone suie, ammonium...) ainsi que les particules ultrafines.

Certains seuils réglementaires risquent d'être abaissés

La coordination technique du dispositif national est assurée par le LCSQA (Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air), tandis que la mise en œuvre des mesures est confiée aux AASQA (Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air). On en dénombre 18, une dans chaque région, y compris dans les territoires d'outre-mer, et Airparif est l'une d'entre elles pour la région Île-de-France. Au total, environ 650 stations fixes sont déployées sur toute la France. Outre la surveillance des polluants dits « réglementés » et ceux d'intérêt national (PIN), d'autres mesures supplémentaires peuvent aussi être réalisées, notamment celles de polluants dits « prioritaires » qui ont été mis en évidence dans un **rapport de l'ANSES publié en 2018**.

Le dispositif français de surveillance est en constante évolution. Il doit se mettre en conformité avec les directives européennes, qui sont régulièrement mises à jour, la prochaine étant programmée à la fin de cette année. « *Pour l'instant, rien n'a fuité, mais des seuils réglementaires vont probablement être abaissés*, confie Marc Durif, directeur du LCSQA. *Certains polluants, dont la surveillance n'avait pas un caractère obligatoire, pourraient le devenir comme les particules ultrafines inférieures à 0,1 micromètre ou encore*

l'ammoniac (NH₃). Cette substance, d'origine principalement agricole, a la particularité d'être un précurseur d'aérosols lorsqu'elle s'associe à des oxydes d'azote (NO_x), dont les émissions sont liées aux villes et au trafic routier. Ce processus est bien connu et peut conduire à des épisodes de pollution atmosphérique au printemps au moment des épandages d'engrais dans les champs. »

Des progrès technologiques et l'arrivée de nouveaux instruments de mesure participent aussi à faire évoluer le dispositif de surveillance. Aux côtés des 650 stations fixes déployées par les AASQA, sont ainsi apparus il y a quelques années des microcapteurs. *« Ils sont plus légers et moins chers que les instruments de référence, complète Marc Durif. Ce sont aussi des instruments moins fiables que les appareils de référence, mais qui aident à améliorer les outils de modélisation pour cartographier les polluants à l'échelle de tout un territoire. Et demain, ces outils numériques vont s'enrichir également de nouvelles données, notamment satellitaires. »*

Évaluer les inflammations observées dans les cellules pulmonaires

Alors que jusqu'ici, la [surveillance de la pollution de l'air](#) est réalisée grâce à la détermination de concentration massique de gaz ou de particules, des travaux de recherche sont en cours pour non plus quantifier les polluants, mais déterminer leurs effets sanitaires. La technique envisagée consiste à évaluer le potentiel oxydant de certains composés, afin de déterminer leur capacité à créer des inflammations au niveau des voies respiratoires humaines, notamment sur les [cellules pulmonaires](#). *« Cette technique peut être très intéressante face aux pollutions particulières qui contiennent plusieurs composés différents, comme des HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques), des métaux..., ajoute Marc Durif. En travaillant sur le potentiel oxydant, il est possible de prendre en compte le mélange de composés présents dans les particules et son éventuel effet sanitaire sur les populations. »* Mais ce nouveau procédé est encore au stade de la recherche. *« On est loin de basculer dans un déploiement opérationnel de cet outil, mais nous allons poursuivre ces travaux afin d'évaluer le*

potentiel de cette technique dans notre réseau de surveillance. »

Des réflexions sont également en cours au sein du dispositif afin de déployer des protocoles de mesures harmonisés de nouvelles substances à l'échelle nationale dans les AASQA. C'est notamment le cas de l'ammoniac, un précurseur de particules, comme évoqué un peu plus haut, mais aussi du sulfure d'hydrogène (H₂S). Ce composé est issu de la décomposition des macroalgues vertes ou brunes, en particulier sur les côtes ouest métropolitaines, ainsi que dans certains territoires d'outre-mer.

Toutes les mesures réalisées par les AASQA remontent ensuite vers la [plate-forme Geod'air](#) qui recueille à ce jour plus de 170 millions de données depuis 2013. *« Tout le monde peut consulter les résultats pour connaître les concentrations de polluant dans les stations de mesure près de chez lui, précise Marc Durif. Les données peuvent aussi être utilisées pour faire de la modélisation. »*

Et parce que la pollution ne s'arrête pas aux frontières de l'Hexagone, les données du dispositif de surveillance français sont envoyées en temps réel à l'agence européenne de l'environnement, où elles peuvent par exemple être récupérées par la [plate-forme Copernicus](#). Celle-ci offre un service open source sur la qualité de l'air à l'échelle de l'Europe, et toutes les données peuvent être exploitées par des sociétés privées. Apple, notamment, s'en sert indirectement pour faire fonctionner son application « Air quality ».

19/08/2022

LA MESURE DES POLLUANTS RÉGLEMENTÉS DANS L'AIR DOIT RESPECTER UN CADRE NORMATIF

L'Europe impose à chaque pays membre de surveiller certains polluants gazeux réglementés dans l'air. Les principes de mesure des instruments utilisés doivent être conformes à des normes et nécessitent la mise en place d'une chaîne de traçabilité métrologique. Face à l'arrivée de nouveaux capteurs, de nouvelles spécifications techniques apparaissent et une certification est proposée.

La mesure des **polluants gazeux réglementés**, dont la surveillance est obligatoire, obéit à un cadre réglementaire bien précis. Les principes de mesure des instruments utilisés doivent être conformes aux normes désignées comme « méthode de référence » dans la directive européenne 2008/50/CE. Il est possible d'en utiliser d'autres, mais à condition de démontrer l'équivalence du nouveau matériel par rapport à la méthode de référence. Dans les faits, les techniques de mesure des appareils dont se servent les AASQA (Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air) sont celles développées il y a une quarantaine d'années.

Chaque polluant a sa propre technique d'analyse de référence. Ainsi, la chimiluminescence est employée pour la mesure des oxydes d'azote (NO/NOx/NO₂), la fluorescence UV pour le dioxyde de soufre (SO₂), la spectroscopie à rayonnement infrarouge non dispersif pour le monoxyde de carbone (CO), la photométrie UV pour l'ozone (O₃) et la chromatographie en phase gazeuse pour les BTEX (Benzène, Toluène, Éthylbenzène et Xylènes).

Mais ce prérequis ne suffit pas. Pour garantir l'exactitude et la fiabilité des analyses réalisées dans les stations de mesure en tout point du territoire, une chaîne nationale de traçabilité métrologique des mesures est mise en place.

Son objectif : raccorder tous les appareils de mesure à un même étalon national de référence, lui-même raccordé au système de mesure international. Le LNE (Laboratoire national de métrologie et d'essais), dans le cadre du LCSQA (Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air), et sous l'égide du ministère en charge de l'Écologie, a développé des étalons spécifiques pour les polluants atmosphériques gazeux cités précédemment.

Des audits pour s'assurer du respect du référentiel technique national

Pour mettre en place ce dispositif, des laboratoires de métrologie intermédiaires ont été créés en région afin de faire face à plus de 1 400 appareils de mesure à étalonner régulièrement et répartis sur toute la France. Pour schématiser, la chaîne nationale de traçabilité métrologique repose sur la circulation périodique **d'étalons** de transfert entre ces laboratoires appelés aussi « niveau 2 » et le LNE (niveau 1), ainsi qu'entre ces mêmes laboratoires et les AASQA, qui représentent le « niveau 3 ».

Pour compléter ce dispositif, des comparaisons interlaboratoires sont organisées périodiquement à tous les niveaux de la chaîne nationale de **traçabilité métrologique**. Elles sont un moyen fiable et performant pour attester du bon fonctionnement du dispositif de surveillance. Des audits techniques sont aussi réalisés par le LCSQA pour s'assurer que les AASQA respectent les exigences du référentiel technique national établi par le dispositif national. Le LCSQA vérifie également que les appareils utilisés pour les mesures réglementaires sont conformes à la méthode de référence.

Depuis plusieurs années, les AASQA utilisent de plus en

plus des systèmes capteurs pour compléter leurs études. Plus légers et moins coûteux que les analyseurs de référence, ces appareillages peuvent être déployés en plus grand nombre afin d'avoir un maillage plus complet sur un territoire donné. Actuellement, un groupe de travail de normalisation européen élabore des spécifications techniques visant à fournir des lignes directrices pour l'évaluation des performances des systèmes capteurs utilisés pour la mesure indicative de polluants gazeux et particulaires dans l'air ambiant. Et en janvier dernier, une première spécification technique relative aux polluants gazeux a été publiée.

Parallèlement, le LNE et l'Ineris se sont associés pour créer une certification volontaire appelée « Air quality sensor ». « Nous avons développé une plateforme instrumentée qui permet de tester les performances de ces systèmes capteurs », explique Tatiana Macé, responsable du département « Métrologie des gaz » au LNE. Elle peut servir en appui technique aux fabricants lorsqu'ils développent leurs capteurs, ou dans le cadre de la certification avec l'Ineris. » Le référentiel de certification s'appuie sur des protocoles d'essais en laboratoire et en conditions réelles basés sur les documents du groupe de travail de normalisation européen. Dans un premier temps, cette certification volontaire vise les particules fines PM_{2,5} (inférieures ou égales à 2,5 micromètres) et le dioxyde d'azote (NO₂), et devrait s'étendre à d'autres polluants tels que l'ozone (O₃) et les particules PM₁₀ (inférieures ou égales à 10 micromètres).

Fournir un résultat dont l'incertitude est inférieure ou égale à 15 %

Ces systèmes capteurs peuvent être ajustés en utilisant les données des stations de mesure. Des comparaisons sont d'ailleurs organisées chaque année afin de comparer leurs performances avec celles des instruments de référence. Ils embarquent différentes technologies : certains fonctionnent à l'aide de détecteurs à infrarouge, d'autres par électrochimie (NO₂, Ozone, SO₂), tandis que les méthodes optiques sont souvent utilisées pour les particules. Ils mesurent un ou plusieurs polluants à la fois.

« Ces systèmes capteurs pourraient encore évoluer, mais

il y a encore beaucoup de travail à mener pour les rendre aussi fiables que les analyseurs de référence, confie Tatiana Macé. Ils ne sont pas toujours spécifiques, cela signifie qu'un polluant peut parfois venir créer des interférences et perturber la mesure. Ils peuvent aussi être sensibles aux températures ou à l'humidité. » Cependant, certains d'entre eux pourraient être utilisés pour des mesures réglementaires dites « indicatives », présentant une incertitude dans la mesure plus large.

En matière de mesure des polluants gazeux réglementés, les instruments de mesure ont l'obligation de fournir un résultat dont l'incertitude est inférieure ou égale à 15 %. En sachant que celle-ci est à respecter lorsque les seuils d'information et d'alertes sont atteints. Dans le cas du dioxyde de soufre (SO₂) par exemple, ce seuil est fixé par la réglementation à 500 µg/m³. « L'obligation de ne pas dépasser 15 % d'incertitude ne vaut que pour des concentrations dans l'air élevées, complète Tatiana Macé. S'agissant du dioxyde de soufre, mais aussi du monoxyde de carbone, les concentrations dans l'air ont beaucoup baissé ces dernières années, mais les instruments restent encore adaptés à la mesure de ces faibles concentrations. »

22/08/2022

UNE DIVERSITÉ D'OUTILS ET DE MÉTHODES POUR MESURER LES POLLUANTS NON RÉGLEMENTÉS DANS L'AIR

En plus des polluants réglementés établis par l'Europe, la France a défini une liste de polluants d'intérêt national à mesurer dans l'air, à laquelle s'ajoute une liste de polluants dits prioritaires que l'ANSES recommande de surveiller. Peu de méthodes normalisées existent pour les quantifier et une diversité d'outils et de méthodes est utilisée pour les qualifier.

En raison de leur potentiel impact sanitaire et environnemental, l'État français a défini une liste de **polluants d'intérêt national (PIN)** à surveiller dans l'air ambiant extérieur, en plus de ceux dits réglementés, au sens des directives européennes. À cette liste, s'ajoutent 13 polluants dits prioritaires, dont certains sont déjà couverts par les PIN, que l'ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) préconise également de surveiller régulièrement, dans un **rapport publié en 2018**. Peu de méthodes normalisées existent pour quantifier ces polluants dont la composition physico-chimique peut être par ailleurs très hétérogène : gazeux, particuliers, organiques, inorganiques... Les AASQA (Associations Agréées pour la Surveillance de la Qualité de l'Air) et les organismes de recherche peuvent avoir recours à une diversité d'outils pour les qualifier, avec des méthodes qui peuvent différer notamment en fonction de l'objectif de surveillance souhaité.

Dans la liste des PIN, sont inscrites 75 **substances pesticides**. La méthode de mesure retenue consiste à réaliser des prélèvements de l'air à l'aide de cartouches couplées à des filtres (substances semi-volatiles) ou de filtres uni-

quement (substances polaires), puis à procéder à plusieurs types d'analyses par chromatographie, principalement grâce à des détecteurs spectrométriques. « Cette méthode est robuste et fiable, déclare Sabine Crunaire, chargée d'études pour le LCSQA (Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air) et Enseignant-Chercheur au sein de l'IMT Nord Europe. L'ensemble des molécules de la liste est mesuré sur l'ensemble du territoire français, dont les DROM (Départements-Régions d'Outre-Mer). En fonction du tissu agricole et donc des sources locales, certaines AASQA peuvent demander l'analyse de substances complémentaires. »

Grossir artificiellement la taille des particules ultrafines

Pour détecter certains composés présents dans les particules (sulfate, ammonium, nitrate, matière organique, carbone suie), tous classés dans la catégorie des PIN, deux méthodes sont employées. La première consiste à les prélever à l'aide de filtres, puis à extraire lesdites substances pour les analyser par des techniques de **chromatographie liquide**. La seconde, appelée ACSM (Aerosol Chemical Speciation Monitor), est réalisée par **spectrométrie de masse**, en temps réel. « La première méthode a une meilleure précision, car le prélèvement se déroule plus longtemps, typiquement 24 heures, ce qui permet d'accumuler plus d'échantillons et de diminuer les limites de détection, souligne Sabine Crunaire. Alors que l'ACSM permet d'obtenir des mesures temporelles plus fines, de l'ordre de la demi-heure. Les fractions particulières que l'on peut atteindre ne sont en plus pas les mêmes. Avec l'ACSM, on analyse les fractions des particules PM1 (diamètre aérody-

namique inférieur à 1 micromètre) alors qu'avec les filtres, ce sont plutôt les PM10 et les PM2,5, c'est-à-dire des particules prélevées avec une efficacité supérieure à 50 % pour des diamètres aérodynamiques respectivement inférieurs à 10 et 2,5 micromètres. »

À noter que le carbone suie exige une méthode particulière d'analyse consistant à utiliser un aethalomètre. Il s'agit d'un instrument optique d'absorption à différentes longueurs d'onde, permettant de remonter à l'origine du carbone suie, et de connaître s'il est issu de la combustion de biomasse, du trafic routier... Le suivi de la composition chimique des particules fines en milieu urbain est piloté par l'Ineris dans le cadre du **dispositif CARA (Caractérisation chimique des particules)**.

Quant aux particules ultrafines (PUF), dernier polluant à avoir été intégré à la classe des PIN, un procédé de comptage à noyau de condensation est employé. Cette technique consiste à grossir artificiellement la taille des particules (à partir de 7 nanomètres de diamètre), afin de déterminer la concentration en nombre plus facilement.

La liste de l'ANSES comprend cinq métaux : le vanadium, le cobalt, l'antimoine, le cuivre et le manganèse. La méthode d'analyse pour les mesurer est éprouvée, puisque c'est la même que celle employée pour les métaux lourds réglementés (arsenic, cadmium, plomb, nickel). Des prélèvements à l'aide de filtres sont pratiqués, puis intervient une phase d'extraction au four micro-onde en milieu acide, suivie d'une analyse en laboratoire par ICP-MS (Inductively Coupled Plasma- Spectromètre de masse) à l'aide d'une torche à plasma. « Les limites de détection pour l'antimoine restent assez élevées, complète Sabine Crunaire. *Tout comme pour les pesticides, les quantités recherchées sont extrêmement faibles, de l'ordre de la dizaine ou centaine de nanogrammes par m³. À chaque étape, il faut donc s'assurer que l'extraction est complète et l'analyse nécessite le raccordement à des matériaux ou des solutions de références certifiés. À noter que des essais sont actuellement menés par le LCSQA afin de réaliser des analyses en temps réel de certains métaux, mais ces travaux sont encore à leurs prémices. »*

Des mesures dites indicatives peuvent aussi être utilisées

Tous les composés organiques de la liste de l'ANSES (1,3-butadiène, 1,1,2-trichloroéthane, trichloroéthylène, l'acrylonitrile et naphthalène) peuvent être mesurés par chromatographie en phase gazeuse. Ce procédé nécessite une étape de préconcentration, qui consiste à collecter pendant une durée de l'ordre de 30 minutes les composés sur un support de prélèvement, généralement du noir de carbone graphité ou un polymère, dans le but d'accumuler de la masse d'échantillons. Ce support est ensuite chauffé très rapidement à haute température (200-300°C), afin de récupérer les composés accumulés pour les séparer et les analyser par une technique de chromatographie en phase gazeuse couplée à un système de détection (détecteur à ionisation de flamme, spectromètre de masse...). « *Cette méthode est assez lourde à mettre en œuvre et demande une technicité et des contrôles métrologiques poussés, précise Sabine Crunaire. Pour chaque composé organique, il faut en effet adapter le support de préconcentration et la méthode chromatographique utilisée. Si les 5 composés organiques de la liste ANSES sont tous présents dans le même échantillon, il est important que les conditions d'échantillonnage, de désorption et d'analyse soient finement optimisées pour obtenir un résultat robuste avec un prélèvement unique. »*

Le carbone suie et les PUF étant déjà inclus dans la liste des PIN, il reste un dernier composé dans la liste de l'ANSES : le sulfure d'hydrogène (H₂S). Pour mesurer sa concentration, la méthode la plus répandue consiste à d'abord le convertir en dioxyde de soufre (SO₂), par oxydation à l'aide d'un catalyseur chauffé, puis à mesurer le SO₂ par fluorescence UV.

Toutes les méthodes décrites ci-dessus permettent d'obtenir des mesures avec un niveau d'incertitude le plus faible possible. Les organismes en charge des mesures peuvent aussi recourir à des mesures dites indicatives, souvent moins lourdes à mettre en œuvre, mais avec un niveau de confiance dans le résultat obtenu moins élevé. Ces méthodes peuvent être utilisées dans un premier temps,

afin de détecter la présence de certains polluants, avant que des mesures plus précises soient réalisées. Dans le cas des composés organiques, il est par exemple possible d'effectuer des prélèvements passifs, qui ne nécessitent pas de pompage, à l'aide de petites cartouches remplies d'un absorbant, sur lequel vont venir se fixer les polluants de l'air. Le prélèvement se déroule pendant un temps long, environ une à deux semaines, à la suite de quoi l'échantillon est récupéré puis analysé.

23/08/2022

LES OUTILS DE MODÉLISATION DE LA QUALITÉ DE L'AIR S'ENRICHISSENT DE NOUVELLES DONNÉES

Afin d'améliorer les cartographies de polluants dans l'air à l'échelle d'un territoire, les outils de modélisation évoluent et commencent à intégrer les mesures de nouveaux capteurs déployés sur le terrain ainsi que des données satellitaires. L'amélioration des connaissances sur la chimie de l'atmosphère aide aussi à perfectionner ces modèles.

En matière de [surveillance de la qualité de l'air](#), le développement d'outils de modélisation et de cartographie est incontournable. Car si les instruments de mesure déployés par les AASQA (Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air) sont capables d'observer de manière fiable et normalisée les concentrations en polluants, leur nombre limité ne permet en aucun cas de couvrir un territoire aussi vaste que la France. Par ailleurs, en plus de reconstituer en temps réel la qualité de l'air, ces représentations numériques sont également indispensables pour réaliser des prévisions à court et long terme, afin d'informer le public, mais aussi pour mieux appréhender le futur.

Depuis une vingtaine d'années, l'Ineris et le CNRS ont développé un modèle baptisé Chimère, disponible aujourd'hui en open source. Il alimente, entre autres, la [plate-forme nationale Prev'Air](#) de prévision de la qualité de l'air, celle-ci faisant partie intégrante du dispositif français de surveillance. Ce modèle repose sur des données entrantes, issues de trois sources différentes. Tout d'abord, celles collectées par le CITEPA (Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique), un organisme dont le rôle est d'inventorier les émissions de tous les polluants atmosphériques ainsi que les gaz à effet en France liés à l'activité humaine (trafic routier, industrie, agriculture, résidentiel...). Ensuite, les données de météorologie (vent, pré-

cipitation...) afin d'appréhender la [dispersion des polluants](#). Et enfin, les émissions naturelles telles que les poussières désertiques du Sahara, ainsi que tous les composés émis par la végétation. Régulièrement, ce modèle est confronté aux mesures officielles effectuées par les AASQA.

Des algorithmes pour intercalibrer les mesures de nouveaux capteurs

Afin d'améliorer la représentation spatiale des cartographies de polluants, de nouveaux outils numériques sont en cours de développement et la tendance aujourd'hui est à la conception de modèles hybrides, qui intègrent les trois types de données entrantes ci-dessus, ainsi que des observations du terrain. Et notamment, les analyses issues de nouveaux instruments de mesure miniaturisés, dont l'utilisation est aujourd'hui en plein essor. « Nous avons développé un nouvel outil appelé SESAM qui prend en compte ces nouveaux capteurs, révèle Augustin Colette, responsable de l'unité modélisation de la qualité de l'air à l'Ineris. *Étant donné qu'ils sont moins précis que les instruments officiels, on s'intéresse à eux non pas individuellement, mais en termes de réseau. Plusieurs centaines d'entre eux peuvent être présents sur une même zone. Certains sont installés sur des véhicules comme des taxis et sont donc mobiles, ce qui signifie qu'ils peuvent se croiser. Ils peuvent aussi s'approcher des stations de références des AASQA, et dans ce cas, il est possible de comparer leurs mesures avec les instruments réglementés. Grâce à ce réseau, nous parvenons à les intercalibrer à l'aide de méthodes algorithmiques spécifiques et ainsi améliorer nos cartographies.* »

Grâce à des travaux de recherche débutés il y a une quin-

zaine d'années, les modèles commencent aussi à s'enrichir en données satellitaires. De nombreux constituants atmosphériques peuvent en effet s'observer depuis l'espace, comme les aérosols, le dioxyde d'azote, l'ozone, l'ammoniac... « Nous sommes sur le point de les intégrer dans nos outils opérationnels, déclare Augustin Colette. Toute la difficulté est que les satellites actuels sont défilants, c'est-à-dire qu'ils ne couvrent pas en permanence une zone donnée. Mais tout va changer en 2024 ou 2025, avec l'arrivée de **satellites géostationnaires** du programme Copernicus. Grâce à ces données à haute fréquence temporelle, nous allons vraiment avoir des observations pertinentes pour un système de modélisation futur qui nous permettra de baisser les incertitudes de mesure. Les prévisions météo ne sont en effet pas toujours justes, de même que les inventaires du CITEPA, dans lesquels il peut parfois manquer certaines émissions polluantes. Grâce à ces données satellitaires, il sera possible de corriger ces erreurs en temps réel. »

Mieux représenter les aérosols condensables dans l'atmosphère

En attendant, les modèles actuels s'enrichissent grâce à l'amélioration des connaissances sur la chimie de l'atmosphère, notamment dans le domaine des poussières en suspension. Certaines d'entre elles sont directement émises sous la forme de poussière solide, mais l'on sait à présent que d'autres se forment par condensation, sous l'effet de mécanismes physico-chimiques dans l'atmosphère. C'est le cas des aérosols issus du chauffage au bois résidentiel. « Une grande partie des émissions n'a pas lieu sous la forme solide lors de la combustion, mais se solidifie après dans l'atmosphère, analyse Augustin Colette. Depuis 5 ans, nous avons beaucoup investi dans ce domaine, et nous avons très nettement amélioré la manière dont nous représentons les aérosols condensables dans nos modèles. »

Ces outils numériques comprennent plusieurs centaines de polluants différents, mais seuls quelques-uns sont exploités, comme l'ozone, le dioxyde d'azote, les particules PM10 (inférieures à 10 micromètres) et PM2,5 (inférieures à 2,5 micromètres). « Ces quatre polluants sont ceux sur lesquels nous avons le plus confiance dans le résultat obte-

nu, ajoute Augustin Colette. Nous en modélisons d'autres, mais les incertitudes sont plus grandes. Nous travaillons en ce moment afin de tenter de rajouter les pesticides. Concernant le monoxyde de carbone, nous ne le modélisons pas, car ce polluant se cantonne essentiellement à l'intérieur des bâtiments. Quant au dioxyde de soufre (SO₂), il est pertinent de le mesurer à proximité de sites industriels, et non pas dans des modèles de cartographie qui s'appliquent à de vastes territoires grands comme la France. »

24/08/2022

POUR ALLER PLUS LOIN

DE PARIS À MARSEILLE, QUELS ENGAGEMENTS CONTRE LA POLLUTION DE L'AIR ?

Paris, Grenoble et Strasbourg voient leurs efforts pour lutter contre la pollution de l'air liée au trafic routier récompensés. Elles arrivent en tête du classement des 12 plus grandes agglomérations françaises agissant contre la pollution de l'air. Mais les défis restent importants.

Si les grandes agglomérations commencent à s'intéresser à certains aspects de la [pollution de l'air](#), les défis restent importants. « *Aucune des grandes agglomérations françaises ne va aujourd'hui assez loin pour protéger efficacement ses habitants de la pollution de l'air* », estime le [rapport commun](#) de Réseau action climat, Greenpeace et UNICEF France publié le 11 décembre. Celui-ci dresse un bilan de l'action engagée par les 12 plus grandes agglomérations françaises ces cinq dernières années en la matière.

De Paris à Marseille, des engagements à consolider

La [zone à faibles émissions](#) de Paris est déjà opérationnelle et regroupe 49 communes du Grand Paris. Grâce à elle, la capitale se hisse en tête du classement. En plus, la ville a pour objectif une sortie complète du diesel en 2024 et une sortie de l'essence en 2030. Strasbourg se positionne en ce sens, Grenoble doit confirmer son engagement. « *La très grande majorité des villes et métropoles françaises tardent à s'engager vers la fin de la voiture individuelle essence ou diesel et la sortie du tout-voiture* », regrette Lorelei Limousin, responsable des politiques Climat - Transports pour le Réseau Action Climat France.

Marseille se trouve en fin de classement, quel que soit l'indicateur retenu. Montpellier et Nice sont aussi dans le rouge, en fin de classement. D'autres agglomérations,

comme Lyon et Nantes, se démarquent positivement sur certains enjeux, mais restent trop timides sur la réduction de la place de la voiture et la sortie des véhicules polluants. Les politiques des autres agglomérations - Bordeaux, Lille, Rennes et Toulouse - restent trop faibles sur l'ensemble des sujets.

Les élections municipales en perspective

Les ONG veulent profiter des élections municipales pour que les candidats prennent des engagements sur la mobilité et la pollution de l'air. « *La lutte contre la pollution de l'air, dont le trafic routier est largement responsable en ville, et le développement des mobilités durables seront des sujets incontournables de la prochaine échéance électorale : les nouveaux élus devront prendre des mesures à la hauteur de l'urgence sanitaire et climatique* », prévient Sarah Fayolle, chargée de campagne Transports à Greenpeace France.

Les ONG appellent couramment à agir en urgence contre la pollution de l'air. Elles demandent de réduire la place de la voiture, développer les mobilités douces et les transports en commun. Cela passe par la mise en place de zones à faibles émissions, et l'adoption de politiques de sortie du diesel et de l'essence. Afin d'accélérer la transition vers des modes de déplacement et de [transports moins polluants](#), les agglomérations peuvent mettre en place des aides financières spécifiques. Enfin, les ONG appellent à des mesures spécifiques pour un public plus vulnérable, les enfants.

11/12/2019

LES FEUX DE FORÊT FONT EXPLOSER LES NIVEAUX DE PARTICULES FINES

Plus de 20 000 hectares ont brûlé en Gironde en 7 jours suite à d'intenses feux de forêt. Ces feux entraînent localement un épisode de pollution aux particules fines. Le panache de fumée a traversé la France, avec des concentrations pouvant dépasser plusieurs centaines de $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pendant quelques heures.

Les feux de forêt qui sévissent actuellement en Gironde et dans les Landes émettent des quantités importantes de particules fines vers l'atmosphère. Une large partie de la Gironde et des Landes est encore impactée par un épisode de pollution aux particules ce jeudi 21 juillet, partage [Atmo Nouvelle-Aquitaine](#).

Plusieurs communes y subissent un air « extrêmement mauvais ». Pour les particules de moins de 10 micromètres de diamètre, les PM10, le seuil d'alerte est fixé à $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne journalière. Le seuil d'information et de recommandation est pour sa part fixé à $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne journalière. Avec un air « extrêmement mauvais », les PM10 s'élèvent à plus de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne journalière. C'est plus de trois fois le seuil d'information et de recommandation.

Un panache de fumée qui traverse la France

Le panache de fumée a affecté une grande partie du territoire métropolitain entre le mardi 19 et le mercredi 20 juillet, confirme l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris). Des pics ponctuels de pollution aux particules fines ont été constatés dans les mesures des associations agréées de surveillance de la qualité de l'air sur une bande allant de la Normandie, la Bretagne, les Pays de la Loire et la Nouvelle-Aquitaine. Mardi soir, le ciel de la capitale s'est même couvert d'une légère brume. Une odeur de feu, remontant de Gironde, se faisait sentir par beaucoup d'habitants d'Île-de-France.

« La base de données [Geod'air](#) a ainsi pu enregistrer 49 valeurs horaires au-dessus de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dans la journée du 19 juillet », partage l'Ineris. L'institut veut toutefois rassurer : « Ces extrêmes sont demeurés relativement sporadiques ». Le panache de fumée s'est donc déplacé rapidement. Sur la journée, seules quatre stations, toutes situées en Nouvelle-Aquitaine, enregistraient une moyenne journalière supérieure à $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

22/07/2022

LE FRET ROUTIER OPÈRE UNE LENTE MUTATION

Le transport de marchandises par voie routière est extrêmement émetteur de CO2. Bien que des solutions émergent, il est aujourd'hui difficile de se passer des poids lourds, qui sont irremplaçables aux deux extrémités de la chaîne logistique.

Le rapport de l'Etat sur l'environnement publié en 2019 indiquait que le [secteur des transports était responsable d'environ un tiers des émissions de gaz à effet de serre](#). Les poids lourds, au milieu de tout cela, généraient 22 % de la pollution totale due aux transports, soit 30 Mt eq CO2. Aussi, le transport routier est un secteur fortement émetteur d'oxydes d'azote, un autre gaz à effet de serre très puissant.

Le transport routier de marchandises, loin devant les autres

Ces chiffres sont colossaux, alors que le parc de poids lourds français ne représente que 2 % en proportion du parc tricolore de véhicules routiers. Un dernier chiffre : si le transport routier de marchandises ne [représente que 6 % en distance parcourue du trafic routier total, il représente 80 % des marchandises transportées](#), toujours en 2019.

Ces chiffres ne sont pas voués à évoluer à la baisse. Le principal concurrent du camion, le train, coûte trop cher à mettre en place et les autorités françaises ont décidé de [ne pas faire du rail une priorité](#).

A partir de là, comment faire pour voir le transport routier réaliser sa propre transition énergétique, alors même que les habitudes des particuliers, dans le contexte actuel, vont vers toujours plus de commandes à distance, avec des délais de livraison toujours raccourcis ?

D'après le Forum International du Transport, le [volume des marchandises transportées dans le monde devrait tripler entre 2015 et 2050](#). Les engagements pris, au niveau

national et international pour faire baisser l'impact environnemental du secteur du fret routier sont d'autant plus ambitieux.

Ainsi, depuis la mise en place du [projet VECTO par l'Union Européenne en 2019](#), le renouvellement du parc de poids lourds doit répondre à deux contraintes fortes :

- un objectif de réduction des émissions de CO2 de 15 %, fixé pour 2025, en tant que réduction relative sur la base des émissions de CO2 moyennes des véhicules utilitaires lourds nouvellement immatriculés pendant la période allant du 1er juillet 2019 au 30 juin 2020 ;
- dès 2030, un objectif de réduction des émissions de CO2 fixé à - 30 %.

Un réexamen de ces dispositions est même prévu en 2022 pour potentiellement accélérer ce dispositif. Ensuite, le [Green Deal européen a vu la France s'engager sur une ambition de neutralité carbone à l'horizon 2040](#). Cette volonté s'accompagnera de l'interdiction de tous les véhicules fonctionnant grâce à des énergies fossiles. Plus près de nous, les collectivités locales ont déjà commencé à mettre en place une régulation contraignante concernant [l'accès des poids lourds dans leurs zones routières](#). Le but : favoriser un basculement progressif des flottes vers des motorisations à faibles émissions. L'entrée en vigueur de ces réglementations sera effective à Paris d'ici 2024.

[Les pistes pour améliorer le bilan carbone du fret routier](#) sont de trois ordres : l'optimisation des flux logistiques, les innovations technologiques sur les poids lourds, et le développement de nouveaux carburants.

Le secteur de la logistique est en pleine mutation. [Les innovations technologiques, le comportement des consommateurs et la structure des échanges vont considérablement évoluer dans les années qui viennent](#). Aussi l'[automatisation des flux](#), la généralisation de la RFID, la mise en place

de la robotique dans les entrepôts sont autant de solutions dont la généralisation participera à optimiser le transport global des marchandises, limitant ainsi le risque de voir des poids lourds circuler avec un chargement à moitié plein.

Les **innovations technologiques sur les poids lourds** vont de l'**automatisation** de la conduite au développement de matériaux plus légers, en passant par la **connectivité des véhicules**, entre eux et avec les plateformes logistiques. L'objectif, encore une fois, est d'optimiser les flux de marchandises et des poids lourds sur les routes, notamment en permettant aux camions de circuler les uns derrière les autres (**platooning**), ce qui permet d'économiser 10% de carburant en moyenne.

Enfin, le **développement de nouveaux carburants** est probablement la solution la moins complexe à mettre en place sur le court terme. Plusieurs carburants innovants sont développés : carburant 100% végétal, ED95 (biocarburant), biogaz... un **carburant à base d'eau** est même à l'essai aux Pays-Bas.

14/12/2021

LA FRANCE, PREMIER ÉMETTEUR DE PARTICULES FINES PM2,5 EN EUROPE

Selon l'Agence européenne de l'environnement, la France rejeterait environ 164.000 tonnes de particules fines dans l'atmosphère par an. L'Hexagone partage la première place des nations les plus polluantes d'Europe avec l'Italie, bien devant l'Allemagne. Et selon cette étude, les activités domestiques sont responsables à elles seules de presque la moitié des rejets de PM2.5.

En matière d'émissions de [particules fines](#), la France est placée au rang de lanterne rouge en Europe. Selon une [étude](#) menée par l'Agence européenne de l'environnement (EEA), la France aurait rejeté dans l'atmosphère durant l'année 2017 environ 164.000 tonnes de particules fines PM2.5. Dans les pays voisins, seule l'Italie a enregistré des niveaux d'émissions similaires. À l'inverse, le Portugal, les Pays-Bas, l'Irlande ou encore la Belgique ont atteint de niveaux d'émissions beaucoup moins élevés.

Les foyers français, premiers responsables de la pollution au PM2.5

Principal responsable de ces émissions de particules fines : les systèmes de chauffage. Ainsi, les chaudières, cuisinières et autres foyers – fermés ou ouverts – engendrent 70.000 tonnes de PM2.5 en 2017. Dans les faits, 45% des émissions de PM2.5 en France sont dus aux rejets domestiques (tabac et autres sources comprises). Notons que selon l'association de surveillance de la qualité de l'air Air-Parif, les émissions de [particules fines PM10](#) et de gaz à effet de serre (GES) liées aux activités domestiques sont également élevées.

Le reste des émissions de particules fines se partagent majoritairement entre l'industrie manufacturière (17%), le transport routier (15%), les déchets (6,7%), l'utilisation énergétique liée à l'industrie (66%) et l'agriculture (6,4%). Il est important de noter que grâce aux convertisseurs

catalytiques installés sur les système d'échappement des véhicules, les rejets de PM2.5 liés aux transports ont été considérablement réduits depuis les années 1990.

La France patine, et Paris s'équipe contre les particules fines

Mais malgré les efforts réalisés par la France depuis trente ans pour réduire ses émissions de particules fines, la santé publique exige que davantage de mesures soient mises en place. Toujours selon l'EEA, la France était, en 2017, le troisième pays d'Europe à enregistrer le plus de décès liés à l'exposition aux particules PM2.5. Ainsi, 35.800 personnes seraient décédées dans l'Hexagone des suites d'une pathologie liée à l'exposition aux particules fines. Au niveau européen, 10% des personnes mortes à cause des particules fines sont décédées en France.

Afin de lutter contre les émissions de particules fines, la France a pris des engagements fixés par la directive sur les plafonds d'émissions nationaux (NEC). Dans le rapport 2019, la France s'engage à réduire à l'horizon 2030 de 30% les émissions de particules fines PM2.5 par rapport à celles enregistrées en 2017. Preuve de la volonté d'action des pouvoirs publics, Valérie Pécresse, présidente de la région Île-de-France, a récemment indiqué sur [France Bleu](#) que Paris serait très prochainement équipé d'une station de mesure des particules ultrafines.

13/09/2019

LA MOBILISATION DES CITOYENS POUR LA QUALITÉ DE LEUR AIR

La pollution de l'air aux particules fines est à l'origine de plus de 3 millions de décès par an et 85 millions d'années perdues dans l'espérance de vie en bonne santé. Des chiffres préoccupants aussi à l'échelle de la France, qui comptabilise environ 11 000 décès annuels directement imputés à une mauvaise qualité de l'air ambiant. Préoccupation mondiale, la pollution atmosphérique génère des contestations citoyennes dans l'Hexagone, signe d'une évolution de la mobilisation d'une partie de la société dite civile.

Un extrait de [De la biosurveillance participative de la qualité de l'air](#) par Lionel SCOTTO D'APOLLONIA, Davia DOSIAS-PERLA, Pierre CAMPS, Thierry POIDRAS

Une **mobilisation citoyenne** est intervenue suite au projet de déplacement et doublement de l'Autoroute A9 au niveau de la commune de Saint-Aunès, à l'Est de la Métropole Montpellier Méditerranée. La crainte des riverains : voir une dégradation de la qualité de l'air induite par l'augmentation du trafic. Ils ont ainsi vu une autoroute passer de 2×3 voies à 4×3 voies. Cette mobilisation a abouti à la création d'un site expérimental dont l'objectif est d'étudier l'impact des haies arborées sur la **qualité de l'air**. Ce site assez singulier est composé de trois merlons – les parties pleines d'un parapet – arborés, autour desquels 14 filtres passifs NO2 et 8 micro-capteurs de particules fines (PM 10 et PM 2.5) ont été implantés par l'agence de l'air Atmo Occitanie. En effet, l'indice européen de la qualité de l'air se base sur cinq sources de polluants : l'ozone (O3), le dioxyde de soufre (SO2), le dioxyde d'azote (NO2) et les particules fines en suspension (PM 2.5 et PM 10) néfastes pour la santé. De l'anglais « Particulate Matter », elles désignent les particules dont le diamètre aérodynamique est inférieur respectivement à 2,5 et 10 µm. Ce dispositif a été mis en place dans le cadre d'une étude de suivi de l'impact du doublement de l'autoroute, avec un engagement de traitement et

de diffusion des résultats sur une période de 10 ans. Deux stations météorologiques sont également opérationnelles aux abords des merlons.

Un tunnel à vent à portée du public

De plus, un tunnel à vent est conçu de façon à reproduire des conditions atmosphériques similaires à celles présentes à l'air libre. Ce tunnel instrumenté d'une longueur de 6 m offre une section carrée de 0,75 m² suffisante pour placer les végétaux dans un flux d'air dont la vitesse sera régulée. Les composants sélectionnés ainsi que l'architecture du banc permettront de produire un vent dont la vitesse peut varier de 0,1 à 10 m/s (36 km/h maxi). L'accès à la zone d'exposition aux particules est assez grand pour faciliter l'entrée et éviter la « perte » des particules fixées sur les feuilles et les filtres témoins passifs. Un dispositif de comptage des particules est inséré dans le tunnel afin d'enregistrer l'évolution du nombre des particules en amont et en aval des échantillons. Ceci dans le but d'avoir un élément de comparaison avec les mesures faites à l'extérieur. Il est utile également, dans la mesure du possible, d'utiliser en parallèle des capteurs de particules low cost disponibles sur le marché afin d'élargir les capacités de mesures. Les protocoles d'exposition des échantillons seront précisément déterminés afin de pouvoir conduire de front les mesures magnétiques et géochimiques au laboratoire.

Le tunnel est construit sur le site des services techniques de la ville de Saint-Aunès. Il s'agit d'intégrer le citoyen dans l'analyse de la qualité de l'air qu'il respire. Dans cet objectif, le public pourra visiter les installations. Il est donc important de concevoir un instrument facile à mettre en œuvre, éducatif, didactique et agréable à regarder. La visée est double : effectuer les mesurages nécessaires à la météorologie, et former le citoyen tout en le faisant participer activement. Le banc expérimental se compose de deux parties

distinctes et éloignées l'une de l'autre : la première est le tunnel à vent lui-même, quand la seconde se trouve dans le laboratoire Géosciences Montpellier où se feront les mesures magnétiques et géochimiques. Il est tout aussi important d'ouvrir les laboratoires expérimentaux au public pour qu'il ait une vue d'ensemble sur la [métrologie](#).

Exclusif ! L'article complet dans les ressources documentaires en accès libre jusqu'au 8 septembre 2022 !

De la biosurveillance participative de la qualité de l'air,
par Lionel SCOTTO D'APOLLONIA, Davia DOSIAS-PERLA, Pierre CAMPS, Thierry POIDRAS

25/08/2022

LES THÈSES DU MOIS : "QUALITÉ DE L'AIR SOUS SURVEILLANCE : MESURES ET RÉGLEMENTATIONS"

Pour vous accompagner et vous fournir une information toujours plus riche, Techniques de l'Ingénieur s'associe au Réseau National des Ecoles Doctorales - Sciences Pour l'Ingénieur (REDOC SPI). Chaque mois, notre partenaire sélectionne des thèses en lien avec notre dossier mensuel afin de vous permettre de creuser plus loin les thématiques développées dans le dossier.

Pour notre dossier d'août, "Qualité de l'air sous surveillance : mesures et réglementations", voici les thèses sélectionnées par le REDOC SPI. Retrouvez le résumé de ces thèses ainsi que les thèses des mois précédents sur [le site de notre partenaire](#).

Nez électronique communicant pour le contrôle de la qualité de l'air intérieur Aymen Sendi Thèse de doctorat en MicroNano Systèmes - Soutenue le 11-12-2020 Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes

Study of indoor air quality by multi-sensor systems E-liane Assy Thèse de doctorat en Chimie théorique, physique, analytique - Soutenue le 29-01-2021 PhysicoChimie des Processus de Combustion et de l'Atmosphère

Stratégies optimales de maîtrise de la qualité de l'air dans les bureaux : évaluation du potentiel des matériaux adsorbants Guillaume Serafin Thèse de doctorat en Energétique et thermique - Soutenue le 11-02-2020 Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement

Low-cost wireless sensor networks in participatory air quality monitoring Mohamed Anis Fekih Thèse de doctorat en Informatique - Soutenue le 04-02-2022 Centre d'Innovation en Télécommunications et Intégration de services

Système de détection ultra-sensible et sélectif pour le suivi de la qualité de l'air intérieur et extérieur Nicolas Morati Thèse de doctorat en Sciences pour l'ingénieur. Micro et nanoélectronique - Soutenue le 30-03-2021 Institut Matériaux Microélectronique Nanosciences de Provence

Potential of Micro-scale Optical Spectroscopy for Environmental sensing : Focus on Gas and Air Quality A-laeldeen Fathy Rezk Thabet Mohamed Thèse de doctorat en Electronique, Optronique et Systèmes - Soutenue le 19-11-2020 Laboratoire électronique, systèmes de communication et microsystèmes

Traitement multi-échelle des données spatio-temporelles appliquées à la qualité de l'air dans les zones urbaines Maryam Rahmani Projet de thèse en Informatique et applications - depuis le 01-09-2021 Centre de Recherche en Informatique, Signal et Automatique de Lille

Intégration de la qualité de l'air intérieur dans l'analyse du cycle de vie des bâtiments Rachna Bhoonah Projet de thèse en Energétique et génie des procédés - depuis le 01-10-2020 Centre Efficacité énergétique des Systèmes

Conception et expérimentation d'un réseau de mesure de la qualité de l'air pour l'orientation et le suivi des stratégies d'aménagement *Souad Bouri* Projet de thèse en Géographie - depuis le 25-09-2020 *Prodig*

Conception d'antennes capteurs et validation de leurs performances par analyse chimique pour la surveillance de la qualité de l'air en milieu urbain *Emilie Bertrand* Projet de thèse en Electronique, microélectronique, optique et lasers, optoélectronique microondes robotique - depuis le 12-01-2021 *Institut d 'Electronique et des Technologies du Numérique*

25/08/2022

Gagnez du temps et sécurisez vos projets en utilisant une source actualisée et fiable



RÉDIGÉE ET VALIDÉE
PAR DES EXPERTS




MISE À JOUR
PERMANENTE



100 % COMPATIBLE
SUR TOUS SUPPORTS
NUMÉRIQUES



SERVICES INCLUS
DANS CHAQUE OFFRE

- + de 340 000 utilisateurs chaque mois
- + de 10 000 articles de référence et fiches pratiques
- Des Quiz interactifs pour valider la compréhension 

SERVICES ET OUTILS PRATIQUES



Questions aux experts*

Les meilleurs experts techniques et scientifiques vous répondent



Articles Découverte

La possibilité de consulter des articles en dehors de votre offre



Dictionnaire technique multilingue

45 000 termes en français, anglais, espagnol et allemand



Archives

Technologies anciennes et versions antérieures des articles



Info parution

Recevez par email toutes les nouveautés de vos ressources documentaires

*Questions aux experts est un service réservé aux entreprises, non proposé dans les offres écoles, universités ou pour tout autre organisme de formation.

Les offres Techniques de l'Ingénieur

INNOVATION

- Éco-conception et innovation responsable
- Nanosciences et nanotechnologies
- Innovations technologiques
- Management et ingénierie de l'innovation
- Smart city – Ville intelligente

MATÉRIAUX

- Bois et papiers
- Verres et céramiques
- Textiles
- Corrosion – Vieillessement
- Études et propriétés des métaux
- Mise en forme des métaux et fonderie
- Matériaux fonctionnels. Matériaux biosourcés
- Traitements des métaux
- Élaboration et recyclage des métaux
- Plastiques et composites

MÉCANIQUE

- Frottement, usure et lubrification
- Fonctions et composants mécaniques
- Travail des matériaux – Assemblage
- Machines hydrauliques, aérodynamiques et thermiques
- Fabrication additive – Impression 3D

ENVIRONNEMENT – SÉCURITÉ

- Sécurité et gestion des risques
- Environnement
- Génie écologique
- Technologies de l'eau
- Bruit et vibrations
- Métier : Responsable risque chimique
- Métier : Responsable environnement

ÉNERGIES

- Hydrogène
- Ressources énergétiques et stockage
- Froid industriel
- Physique énergétique
- Thermique industrielle
- Génie nucléaire
- Conversion de l'énergie électrique
- Réseaux électriques et applications

GÉNIE INDUSTRIEL

- Industrie du futur
- Management industriel
- Conception et production
- Logistique
- Métier : Responsable qualité
- Emballages
- Maintenance
- Traçabilité
- Métier : Responsable bureau d'étude / conception

ÉLECTRONIQUE – PHOTONIQUE

- Électronique
- Technologies radars et applications
- Optique – Photonique

TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION

- Sécurité des systèmes d'information
- Réseaux Télécommunications
- Le traitement du signal et ses applications
- Technologies logicielles – Architectures des systèmes
- Sécurité des systèmes d'information

AUTOMATIQUE – ROBOTIQUE

- Automatique et ingénierie système
- Robotique

INGÉNIERIE DES TRANSPORTS

- Véhicule et mobilité du futur
- Systèmes aéronautiques et spatiaux
- Systèmes ferroviaires
- Transport fluvial et maritime

MESURES – ANALYSES

- Instrumentation et méthodes de mesure
- Mesures et tests électroniques
- Mesures mécaniques et dimensionnelles
- Qualité et sécurité au laboratoire
- Mesures physiques
- Techniques d'analyse
- Contrôle non destructif

PROCÉDÉS CHIMIE – BIO – AGRO

- Formulation
- Bioprocédés et bioproductions
- Chimie verte
- Opérations unitaires. Génie de la réaction chimique
- Agroalimentaire

SCIENCES FONDAMENTALES

- Mathématiques
- Physique Chimie
- Constantes physico-chimiques
- Caractérisation et propriétés de la matière

BIOMÉDICAL – PHARMA

- Technologies biomédicales
- Médicaments et produits pharmaceutiques

CONSTRUCTION ET TRAVAUX PUBLICS

- Droit et organisation générale de la construction
- La construction responsable
- Les superstructures du bâtiment
- Le second œuvre et l'équipement du bâtiment
- Vieillessement, pathologies et réhabilitation du bâtiment
- Travaux publics et infrastructures
- Mécanique des sols et géotechnique
- Préparer la construction
- L'enveloppe du bâtiment
- Le second œuvre et les lots techniques

OFFRE



Environnement

Développez une politique environnementale efficace tout en respectant les intérêts économiques de votre entreprise

Ref : TIP800WEB

PRÉSENTATION

Une information claire et complète par thème (eau, air, déchets, sols, bruit, odeurs) sur la **caractérisation des polluants, l'évaluation de leurs impacts et les techniques de dépollution**,
La prise en compte des **aspects économiques, juridiques et stratégiques spécifiques à chaque type de pollution**,
La présentation détaillée des **outils environnementaux d'aide à la décision** et leur mise en oeuvre.

VOTRE COMMANDE :

Référence	Titre de l'ouvrage	Prix unitaire H.T	Qté	Prix total H.T
TIP800WEB	Environnement	2 295 €	1	2 295 €
Total H.T en €				2 295 €
T.V.A : 5,5%				126,23 €
Total TTC en €				2 421,23 €

VOS COORDONNÉES :

Civilité M. Mme

Prénom _____

Nom _____

Fonction _____

E-mail _____

Raison sociale _____

Adresse _____

Code postal _____

Ville _____

Pays _____

Date :

Signature et cachet obligatoire

CONDITIONS GÉNÉRALES DE VENTE

Conditions générales de vente détaillées sur simple demande ou sur www.technique-ingenieur.fr

Si vous n'êtes pas totalement satisfait, vous disposeriez d'un délai de 15 jours à compter de la réception de l'ouvrage pour le retourner à vos frais par voie postale. Livraison sous 30 jours maximum.