

Évaluation du potentiel d'usage des nez électroniques dans le suivi des odeurs



**ÉVALUATION DU POTENTIEL D'USAGE DES NEZ
ELECTRONIQUES DANS LE SUIVI DES ODEURS**

RAPPORT FINAL

mai 2020

E. LEFRANÇOIS – ECO IN'EAU
N. BALGOBIN, J. CARIMALO – CNRS - C'NANO
C. CHANEAC – Sorbonne université – C'NANO



Créée à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD est depuis 1989, le catalyseur d'une coopération entre industriels, institutionnels et chercheurs.

Acteur reconnu de la recherche appliquée dans le domaine des déchets, des sols pollués et de l'utilisation efficace des ressources, RECORD a comme objectif principal le financement et la réalisation d'études et de recherches dans une perspective d'économie circulaire.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et institutionnels) définissent collégialement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

Avertissement :

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :

RECORD, Évaluation du potentiel d'usage des nez électroniques dans le suivi des odeurs, 2020, 143 p, n°18-0167/1A

- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
www.ademe.fr

Comité de suivi de l'étude :

Donatien BARRETEAU – Renault, Rémy BAYARD - INSA de Lyon / RECORD, Caroline BOUCHET - SUEZ, Guy COLOMBET - Renault, Bénédicte COUFFIGNAL - RECORD, Laurent DUPONT - SNCF, Catherine JUERY - TOTAL, Hervé ROMANO - EDF

© RECORD, 2020

RESUME

Les différents enjeux liés aux problématiques d'odeur ont gagné en importance ces dernières années. En effet, les nuisances olfactives incommoderaient de 13 à 20% de la population européenne (Merlen, 2017), et sont, avec le bruit, les sources de plaintes les plus importantes en Europe au XXIème siècle. Afin de répondre à la demande sociétale, la réglementation sur la qualité de l'air a évolué et considère maintenant les odeurs comme des pollutions. Dans le même temps, diverses méthodes d'évaluation des odeurs, instrumentales ou basées sur les jurys de nez humains, se sont développées, encadrées par des normes, encore en cours d'amélioration.

En 1982, à l'Université de Warwick, un nouvel instrument, appelé « nez électronique » a été créé, associant une série de capteurs non spécifiques à un système automatisé de reconnaissance, permettant l'interprétation du signal intégré fourni par les capteurs. L'appellation « nez électronique » s'explique par l'analogie existant entre la technologie et le système olfactif humain, les capteurs jouant le rôle des récepteurs olfactifs et le système de traitement informatique remplaçant le cerveau. Cependant, cette appellation s'avère plutôt source de promesses trompeuses, la première étant que les nez électroniques ne peuvent distinguer les molécules odorantes parmi l'ensemble des composés volatils auxquels ils sont sensibles. Il n'en demeure pas moins que ces instruments présentent certains avantages qui peuvent être valorisés en fonction des objectifs visés, des conditions environnementales et des moyens techniques et humains déployés.

Cette étude, a été l'occasion de réaliser un état de l'art de la technologie des nez électroniques et d'évaluer leur potentiel d'usage dans le suivi des odeurs. Elle comprend trois grandes parties : un état de l'art relatif aux nez électroniques, une analyse du marché et une étude de trois cas concrets. 40 entretiens ont été conduits avec les différents acteurs de la filière afin de mieux appréhender les divergences entre les messages véhiculés par la littérature et les discours commerciaux, et les retours d'expérience suite à l'usage des nez électroniques.

MOTS CLES

Nez électronique, odeur, nuisances olfactives, suivi des odeurs, composés organiques volatils

SUMMARY

Nowadays, 13 to 20% of the European population consider the olfactory annoyance as an important issue (Merlen, 2017), which is, with noise, the most important source of complaints in Europe in the 21st century. In order to meet the societal demand, the regulation on air quality has evolved and now considers odors as pollution. At the same time, several odor monitoring methods have been developed. These methods are based on a sensory approach using olfactory analysis or a physico-chemical approach associated to instrumental measurements. Standards have also been created to frame these methods and are still being improved.

A new instrument called "electronic nose" was created in 1982, at the University of Warwick. This instrument combined a series of non-specific sensors with an automated recognition system, allowing the interpretation of the integrated signal provided by the sensors. The term "electronic nose" emerged according to the analogy between the technology and the human olfactory system, the sensors playing the role of olfactory receptors and the computer processing system replacing the brain. However, because an electronic nose cannot distinguish the odorant molecules among the set of volatile compounds, this term is rather a source of misleading promises. Nevertheless, these instruments can be useful if they are used according to the objectives, the environmental conditions and the available technical and human resources.

This study was the opportunity to realize a state of the art on e-Nose technology and evaluate the potential of use of these instruments in the odor monitoring. The study is organized in 3 main parts: a state of the art relating to electronic noses, a market analysis and a study of 3 examples. 40 interviews were conducted with various actors in order to better compare the messages from the literature and sales pitch and user feedbacks.

KEY WORDS

Electronic nose; odor; olfactory nuisance; odor monitoring; volatile organic compounds

SOMMAIRE

1	Introduction	11
1.1	Motivations et objectifs de cette étude.....	11
1.2	Méthodologie	12
2	Contexte et périmètre de l'étude.....	13
2.1	Qualité de l'air et nuisance olfactive.....	13
2.1.1	<i>Impact sociétal des nuisances olfactives.....</i>	<i>14</i>
2.1.2	<i>Biologie de l'odeur et système olfactif</i>	<i>16</i>
2.1.3	<i>Le nez électronique : historique et définition.....</i>	<i>20</i>
2.2	Règlementation et normes concernant la mesure des odeurs.....	22
2.2.1	<i>Réglementation</i>	<i>22</i>
2.2.2	<i>Réglementation européenne.....</i>	<i>22</i>
2.2.3	<i>Normes.....</i>	<i>25</i>
2.2.4	<i>Évolution réglementaire et normative</i>	<i>27</i>
3	Principes technologiques d'un nez électronique.....	34
3.1	Détection et transduction du signal : les réseaux de capteurs	35
3.1.1	<i>fs intégrés dans les nez électroniques.....</i>	<i>35</i>
3.1.2	<i>Critères de choix pour un capteur</i>	<i>39</i>
3.2	L'intégration du signal issu des capteurs	42
	<i>Filtrage</i>	<i>43</i>
	<i>Conversion du signal analogique en numérique</i>	<i>43</i>
3.3	La reconnaissance de la signature globale.....	43
3.4	La calibration	44
3.5	La phase d'apprentissage	46
4	Dynamique de la recherche.....	49
4.1	Analyse bibliométrique.....	49
4.1.1	<i>Essor de la recherche depuis 1991</i>	<i>49</i>
4.1.2	<i>Secteur d'applications concernés.....</i>	<i>50</i>
4.1.3	<i>Pays moteurs</i>	<i>51</i>

4.2	Focus sur quelques équipes de recherche et exemples de projets de recherche collaboratifs.....	52
4.2.1	<i>Équipes de recherche</i>	52
4.2.2	<i>Exemples de projets européens.....</i>	58
5	Marché des nez électroniques	62
5.1	Organisation de la filière	62
5.1.1	<i>Les concepteurs de nez électroniques</i>	62
	environnementales, se doivent d'être calibrés par du	65
5.1.2	<i>Les bureaux d'études.....</i>	65
5.2	Les secteurs d'application des nez électroniques.....	66
5.2.1	<i>Applications actuelles</i>	68
5.2.2	<i>Futures applications des nez électroniques ?</i>	70
5.3	Principaux produits du marché.....	80
5.4	Les technologies dites concurrentes et leurs applications.....	91
5.4.1	<i>Méthodes online (de laboratoire).....</i>	91
5.4.2	<i>Les réseaux de capteurs spécifiques</i>	93
5.4.3	<i>Méthodes sensorielles</i>	94
5.4.4	<i>Méthode senso-instrumentale</i>	97
5.4.5	<i>Implication des riverains</i>	98
5.4.6	<i>Modélisation</i>	101
5.4.7	<i>Des méthodes complémentaires ?.....</i>	102
5.4.8	<i>Positionnement des nez électroniques en fonction des secteurs d'application</i>	103
6	Étude de cas	107
6.1	Détection et mesure des odeurs sur site industriel	107
6.1.1	<i>Définition du besoin</i>	107
6.1.2	<i>Les nez électroniques sont-ils adaptés ?.....</i>	108
6.2	Détection et mesure des odeurs dans des espaces partagés.....	113
6.2.1	<i>Définition du besoin</i>	113
6.2.2	<i>Retours d'expérience</i>	113
6.2.3	<i>Les nez électroniques sont-ils adaptés? Lesquels plus particulièrement?.....</i>	114

7	Limites et perspectives	115
7.1	Limites actuelles.....	115
	<i>7.1.1 Les biais induits par l'analogie avec le sens de l'olfaction humain.....</i>	<i>115</i>
	<i>7.1.2 Les déceptions liées aux caractéristiques techniques des nez électroniques</i>	<i>116</i>
7.2	Principaux axes de recherche.....	120
	<i>7.2.1 Amélioration de la détection.....</i>	<i>120</i>
	<i>7.2.2 Recherche sur les aspects « traitement du signal ».....</i>	<i>124</i>
8	Conclusion.....	126
9	Bibliographie.....	128
10	Annexes	131

Liste des acronymes

Acronyme anglais/français	Signification en anglais	Traduction française	Définition
BDD	Database	Base de données	Ensemble d'informations structurées accessibles au moyen d'un logiciel.
BOD/DBO	Biologic Oxygen Demand	Demande Biologique en Oxygène	Quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder les matières organiques par voie biologique
DFA	Discriminant function analysis	Analyse discriminante	Méthode statistique permettant de décrire, expliquer et prédire l'appartenance à des groupes prédéfinis un ensemble d'observations à partir d'une série de variables prédictives. Parmi ces méthodes, l'analyse discriminante linéaire et l'analyse canonique discriminante sont fréquemment employées.
IMS	Ion mobility spectrometry	Spectrométrie par mobilité ionique	Technique d'analyse chimique consistant à soumettre des molécules ionisées à un champ électrique dans un courant de gaz.
GC	Gaz chromatography	Chromatographie en phase gazeuse	Technique de séparation d'un mélange de molécules volatiles
Kmeans	k-means clustering	Partitionnement en k-moyennes	K-means est un algorithme non supervisé de clustering non hiérarchique. Il permet de regrouper en K clusters distincts les observations du jeu de données. Ainsi les données similaires (ayant une distance de dissimilarité réduite) se retrouveront dans un même cluster. Par ailleurs, une observation ne peut se retrouver que dans un cluster à la fois (exclusivité d'appartenance).
KNN	k nearest neighbors	Méthode des k plus proches voisins	La méthode des K plus proches voisins (KNN) a pour but de classifier des points cibles (classe méconnue) en fonction de leurs distances par rapport à des points constituant un échantillon d'apprentissage (c'est-à-dire dont la classe est connue a priori). C'est est une approche de classification supervisée intuitive, souvent utilisée dans le cadre du machine learning.

Acronyme anglais/français	Signification en anglais	Traduction française	Définition
MEMS	Microelectromechanical system	Microsystème électromécanique	Microsystème fabriqué à partir de matériaux semi-conducteurs.
MOS	Metal Oxide Semi-conductor	Oxyde métallique semi-conducteur	Matériau composé d'anions oxyde et de cations métalliques.
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor	Transistor à effet de champ à grille isolée	Dispositif semiconducteur de la famille des transistors, utilisant un champ électrique pour contrôler la conductivité d'un canal dans un matériau semiconducteur.
NDIR Sensor	Nondispersive infrared sensor	Capteur basé sur l'infrarouge non dispersif	Capteur basé sur le principe de la spectroscopie infrarouge non-dispersive. Cette technique est notamment utilisée pour la sélection et la détection sensible du dioxyde de carbone (CO ₂)
PCA/ACP	Principal Components Analysis	Analyse en composante principale	Méthode d'analyse de données numériques complexes permettant de représenter ces données dans un espace à 2 dimensions en déformant le moins possible la réalité
PID	Photo-ionization Detector	Détecteur à photo-ionisation	Le principe repose sur l'ionisation des composés par des photons. Les longueurs d'ondes utilisées sont souvent courtes et énergétiques comme les ultra-violets. Les molécules sont ionisées et transformées en cations. Une mesure de l'intensité du courant produit par les molécules ionisées est ensuite réalisée pour établir une corrélation avec la concentration initiale des composés. Souvent utilisé pour la détection des COV et de certains gaz inorganiques comme H ₂ S ou NH ₄ pour des concentrations allant de 1 ppb à 10 000 ppm

Acronyme anglais/français	Signification anglais en	Traduction française	Définition
PM2,5/PM10	Particulate Matter	Particules fines en suspension	Particules d'un diamètre respectivement inférieur à 2,5 ou 10 µm
ppb	Part per billion	Partie par milliard	1/10 ⁹
ppm	Part per million	Partie par million	1/10 ⁶
SAW	Surface Acoustic Waves	Onde acoustique de surface	Onde élastique qui se propage à la surface d'un matériau élastique.
SM	Mass spectrometry	Spectrométrie de masse	Technique physique d'analyse permettant de détecter et d'identifier des molécules d'intérêt par mesure de leur masse, et de caractériser leur structure chimique.
STEP/STEU	Wastewater treatment plant	Station d'épuration/Stations de traitement des eaux usées	Installation destinée à épurer les eaux usées domestiques ou industrielles et les eaux pluviales avant le rejet dans le milieu nature
SVM	Support Vecteur Machine	Machines à vecteurs de support	Ensemble de techniques d'apprentissage supervisé destinées à résoudre des problèmes de discrimination et de régression. Ces méthodes sont des alternatives aux méthodes de classification linéaires sur les jeux de données complexes.
VOC/COV	Volatil Organic Compound	Composés organiques volatils	Les composés organiques volatils regroupent une multitude de substances, qui peuvent être d'origine biogénique (naturelle) ou anthropique (humaine). Les plus connus sont le butane, le toluène, l'éthanol (alcool à 90°), l'acétone et le benzène que l'on retrouve dans l'industrie, le plus souvent sous la forme de solvants organiques (par exemple, dans les peintures ou les encres). (ADEME)

1 Introduction

1.1 Motivations et objectifs de cette étude

L'histoire philosophique et scientifique nous apprend que l'odorat a été considéré pendant longtemps comme un sens archaïque et inutile à la société. Ainsi, Schopenhauer affirme qu'il s'agit d'un sens inférieur aux autres, Kant le juge ingrat et Freud estime que la rupture avec l'animal et l'essor de la civilisation humaine auraient eu lieu notamment grâce au refoulement de l'odorat (Guérer, 2017).

Depuis, nous avons appris que l'odorat joue un rôle crucial dans plusieurs aspects de notre société. En effet, il a prouvé son importance dans de nombreux secteurs tels que la santé et le bien-être, la sécurité, le marketing ou encore l'éducation (Guérer, 2017). De plus, les odeurs sont devenues une préoccupation importante au sein de nos sociétés : elles peuvent être ressenties et sont considérées, d'un point de vue réglementaire, comme une réelle pollution de l'air. Au cours de ces dernières années, la protection de la population vis-à-vis des nuisances olfactives a suscité un intérêt croissant de la part des autorités publiques et industrielles. En effet, la tendance à relocaliser les activités industrielles à proximité des lieux d'habitation, afin de ne pas consommer de terres arables et, parallèlement, la densification de l'habitat urbain, ont engendré une augmentation importante du nombre de nuisances olfactives (Cors et al. 2017). Ces nuisances ont des impacts sur le bien-être et la santé des personnes exposées. Elles ont aussi des conséquences économiques puisqu'elles freinent, voire empêchent, l'aboutissement de certains projets industriels (Cors, 2017). Ainsi, il est important de disposer d'outils appropriés pour la surveillance des nuisances olfactives. Les méthodes et instruments de détection des odeurs sont aujourd'hui coûteux et inutilisables en temps réels. De plus, ils nécessitent la mobilisation d'une équipe technique importante (Jury de nez humains, GC-MS). La détection et le suivi des odeurs sont donc devenus des enjeux majeurs de la recherche scientifique et industrielle, et visent à répondre à des problématiques tant environnementales que de santé publique ou encore de sécurité.

Pour toutes ces raisons, RECORD, un réseau ouvert à toute organisation publique ou privée et qui soutient la réalisation de recherches dans le cadre d'une coopération tripartite entre industries, organismes publics et chercheurs, a proposé une étude d'évaluation du potentiel d'usage des nez électroniques dans le suivi des odeurs.

1.2 Méthodologie

Les objectifs de l'étude sont les suivants :

- Réaliser un état des lieux des connaissances concernant les nez électroniques et évaluer leur niveau de maturité pour une application *in situ* ;
- Evaluer le potentiel d'application des nez électroniques dans les environnements publics et industriels, intérieurs comme extérieurs ;
- Analyser de façon critique les techniques et méthodologies disponibles.

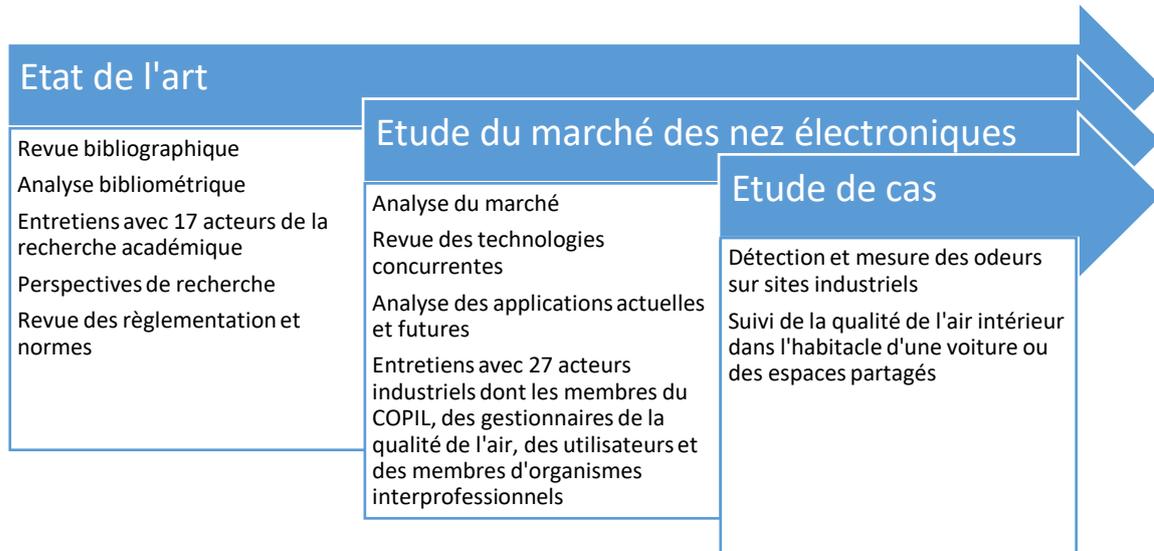


Figure 1 - Méthodologie adoptée dans l'étude (RECORD 2020)

Pour répondre aux objectifs de cette étude, nous avons mené une analyse bibliographique minutieuse, et avons conduit de nombreux entretiens avec les acteurs académiques et socio-économiques dont l'activité présente un lien avec la détection, la quantification ou la qualification d'odeurs (Annexe I). Nous avons par la suite réalisé une étude du marché approfondie des nez électroniques, en recensant les acteurs et produits commercialisés ou en cours de développement à l'échelle européenne et mondiale.

Un état de l'art sur la réglementation en cours et ses évolutions a également été réalisé afin de contextualiser le développement technique et commercial des nez électroniques.

Enfin, trois contextes d'applications différents ont été détaillés et ont permis d'exprimer les besoins, les contraintes des utilisateurs, les avantages et inconvénients des différentes méthodes de mesure des odeurs et l'intérêt des nez électroniques dans ces contextes variés :

- Suivi des odeurs sur site industriel : à l'émission ;
- Suivi des odeurs sur site industriel : en limite de site ;
- Suivi des odeurs de vie dans des véhicules ou espaces partagés

2 Contexte et périmètre de l'étude

2.1 Qualité de l'air et nuisance olfactive

Les préoccupations relatives à la qualité de l'air n'ont cessé de croître ces dernières années. Les normes concernant la qualité de l'air en Europe ont été significativement améliorées au cours des décennies passées, et les émissions de polluants atmosphériques ont fortement diminué.

L'enjeu principal de la qualité de l'air est la santé. La pollution aurait provoqué plus de 100 millions de décès anticipés au XXème siècle, et d'après l'Organisation Mondiale de la Santé, près d'un décès prématuré sur huit serait imputable à la pollution atmosphérique. (Solidarité-Santé-gouv.fr, 2018)

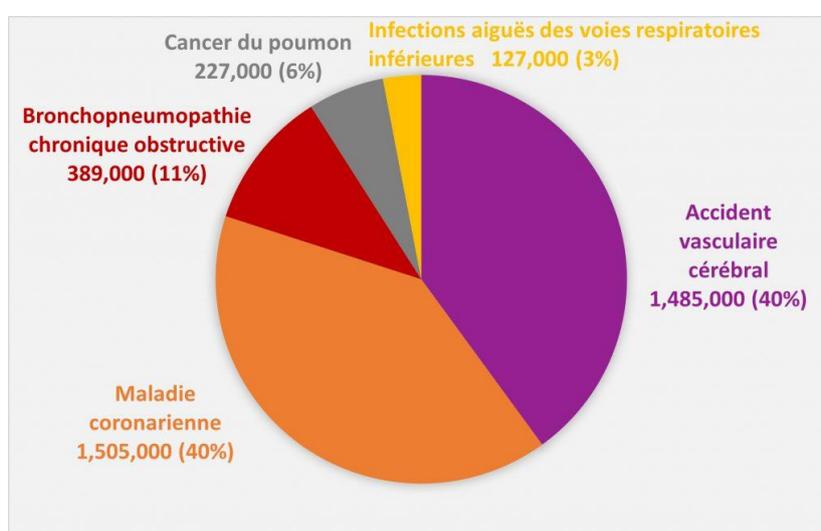


Figure 2 - Maladies provoquées par la pollution atmosphérique (source : OMS)

Bien que l'exposition à la pollution de l'air soit reconnue comme un facteur de risque de mortalité lié aux maladies respiratoires et aux cancers, ce sont les maladies cardiovasculaires qui représentent la principale conséquence de cette pollution. Ces dernières sont à elles seules responsables d'environ 80% de l'ensemble des décès causés par la pollution de l'air ambiant (Figure 2). Les études menées montrent en effet qu'une exposition à l'air pollué, même relativement brève, est associée à une hausse de l'incidence de l'infarctus du myocarde, des accidents vasculaires cérébraux, d'arythmies comme la fibrillation auriculaire ainsi qu'à une aggravation de l'insuffisance cardiaque. Ainsi, on estime que les effets délétères sur la santé cardiovasculaire engendrés par l'exposition à la pollution ont le même impact que ceux causés par l'hypertension, la sédentarité et le tabagisme. (Solidarité-Santé-gouv.fr, 2018)

Par conséquent, dans ce contexte de préoccupation majeure vis-à-vis de la qualité de l'air, l'odeur ne représente qu'une nuisance. Elle a été longtemps négligée pour cette raison et pour des raisons d'ordres plus anthropologiques et culturelles. Cependant, depuis une vingtaine d'années, les odeurs prennent une place de plus en plus importante dans la vie quotidienne des populations. Elles sont au

cœur des priorités environnementales et sanitaires. En effet, les nuisances olfactives sont de moins en moins acceptées et deviennent de véritables enjeux pour la population et pour les diverses activités qui peuvent engendrer ces nuisances (papeterie, agroalimentaire, traitement de déchet, station d'épuration ...). Les nuisances olfactives incommoderaient de 13 à 20% de la population européenne (Merlen, 2017), et sont, avec le bruit, les sources de plaintes les plus importantes en Europe au XXI^{ème} siècle.

2.1.1 Impact sociétal des nuisances olfactives

Une des inquiétudes principales concernant les odeurs est leur possible toxicité. Il convient donc de rappeler qu'une odeur en soit est une perception sensorielle et ne peut donc pas être toxique. Cependant, les composés responsables de ces odeurs, présents dans l'air respiré, peuvent pour certains avoir un impact sur la santé. La toxicité est liée aux caractéristiques chimiques des molécules. Dans la grande majorité des cas, il n'y pas de relation simple entre l'odeur perçue et la concentration chimique des molécules qui composent le mélange odorant. Des composés tels que le monoxyde de carbone ont un seuil de toxicité largement inférieur au seuil olfactif. A l'inverse, le mercaptan (ou le sulfure d'hydrogène) a un seuil de perception très inférieur à son seuil de toxicité. Dans ce cas, la détection de l'odeur est une mesure de prévention du risque toxique. Par ailleurs, les odeurs ne sont pas additives. Ainsi, deux composés avec des caractéristiques odorantes propres peuvent donner, en se mélangeant, une odeur ayant une caractéristique olfactive complètement différente.

Bien que la toxicité ne puisse pas être imputée à des odeurs en tant que telles, ces dernières peuvent avoir des effets délétères sur la santé au travers des nuisances qu'elles engendrent. Elles dégradent la qualité de vie et peuvent entraîner des effets indirects sur la santé tels que des troubles de l'appétit, et/ou de l'inconfort. Ainsi, des études ont démontré que l'exposition aux nuisances olfactives affecte l'individu, et détériore sa qualité de vie (renforcement de l'anxiété, de la fatigue).

Sur le plan économique, les riverains sont surtout très attachés à la perte de valeur de leur propriété quand cette dernière se trouve dans un contexte pénalisant à cause des nuisances olfactives.

Une nuisance odorante peut être acceptée ou refusée, selon le contexte dans lequel les riverains la perçoivent. Ainsi, la nuisance olfactive est caractérisée par de nombreux facteurs tels que :

- L'évolution du désagrément ;
- La fréquence de perception ;
- La crainte qu'elle peut occasionner ;
- La durée de sa perception.

Il convient donc de juger du caractère acceptable ou non d'une odeur en évaluant son niveau mais aussi sa fréquence. Une odeur jugée comme agréable peut devenir nuisible si elle est ressentie fréquemment, sur une longue durée.

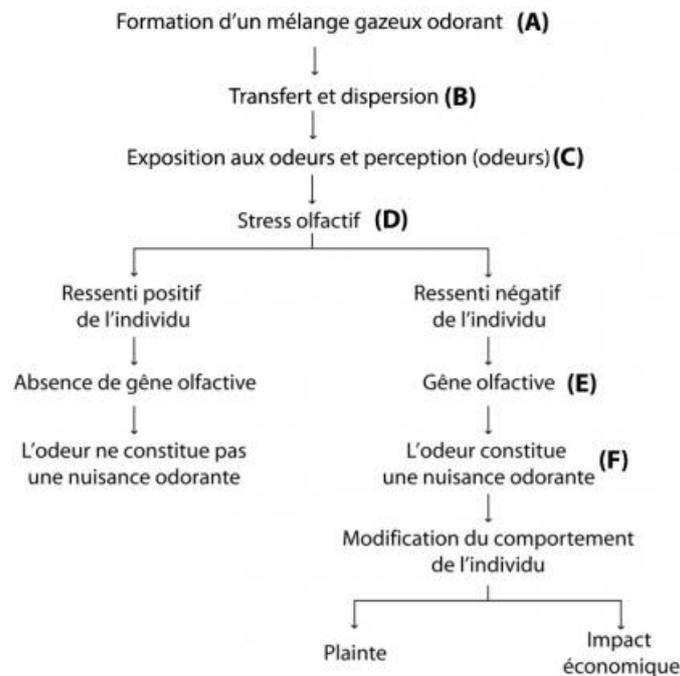


Figure 3 - Différents phénomènes entrant en jeu entre l'émission d'odeur et les plaintes émises par les riverains (ENSP, s.d.)

La forme la plus courante d'expression de la population à la suite de la confrontation avec des nuisances olfactives est la plainte. Ainsi, les registres de plaintes (Annexe II), mis en place par les autorités publiques, sont des outils indispensables car ils permettent de consigner des informations primordiales pour la caractérisation de la nuisance : il peut s'agir du nombre de plaignants, de la localisation de la plainte, de sa fréquence, ou encore de l'heure à laquelle elle a lieu.

Des méthodes et technologies de détection et de mesure des odeurs ont donc été développées. De nombreuses solutions proposées sur le marché ou décrites dans des articles scientifiques utilisent le terme de « nez électronique » pour décrire leur offre. Souvent, ces technologies se rapprochent davantage de capteurs multi-gaz et n'essaient en aucun cas de détecter ou de quantifier une odeur. Par ailleurs, le terme de nez électronique est trompeur puisqu'il induit une analogie directe avec les nez humains. Il convient ici de rappeler que nous ne sommes aujourd'hui pas en mesure de reproduire le sens de l'odorat humain avec un instrument, aussi sophistiqué soit-il, du fait du nombre limité de ses composants (capteurs) et de la complexité du sens de l'odorat.

Afin de dissiper toute confusion possible, nous considérerons comme nez électroniques dans cette étude, les technologies répondant le mieux possible aux critères suivants :

- Intégrer plusieurs capteurs ;
- Produire un résultat différent des réponses fournies par ces capteurs ;
- Cibler la détection de molécules odorantes et/ou d'odeurs.

Par ailleurs, sans omettre l'ensemble des secteurs d'application des nez électroniques, nous nous concentrerons particulièrement sur les applications environnementales, industrielles ou publiques des nez électroniques, dans le cadre de cette étude.

2.1.2 Biologie de l'odeur et système olfactif

Un nez électronique est un instrument capable de détecter, de discriminer voire de mesurer une odeur, en s'inspirant du fonctionnement du système olfactif humain. Pour une bonne compréhension du principe, des avantages et des limites des nez électroniques, les paragraphes suivants s'attacheront à décrire deux notions que sont l'odeur et le système olfactif.

2.1.2.1 Définition d'une odeur

Une odeur se définit comme une **combinaison de molécules** perçue par un **organe sensoriel**, i.e. un organe dont de l'action découle une perception sensitive.

L'activité, ou pouvoir odorant d'une molécule, dépend de plusieurs paramètres intrinsèques comme sa nature chimique, sa structure, sa taille, son poids moléculaire, sa chiralité. D'autres paramètres réagissant avec les récepteurs de l'épithélium olfactif sont également déterminants : la polarité, la capacité de liaison, la solubilité et la flexibilité ou encore la concentration.

Une odeur se caractérise par sa concentration (en Unité d'Odeurs), son intensité (puissance de perception), sa qualité (son identification) et son ton hédonique. Concentration et intensité sont des mesures objectives alors que qualité et ton hédonique font appel à la mémoire olfactive et dépendent donc de l'expérience d'un individu (paramètres subjectifs). Le ton hédonique est parfois appelé « acceptabilité ».

- La concentration d'une odeur, est donnée par le facteur de dilution qu'il faut appliquer à un effluent pour qu'il ne soit plus ressenti comme odorant par 50% des personnes constituant un échantillon de population.

Remarque : La norme européenne (CEN/TC264 2003) a introduit une unité de mesure de la concentration d'odeur, l'unité d'odeur européenne (UO_E/m^3).

1 UO_E/m³ correspond à la quantité de gaz qui, présente dans 1 m³ d'air, conduit au seuil de perception du jury. Un jury de nez est composé de personnes qui ont des capacités olfactives dites « standard ». Un nez « moyen » est un nez représentatif de la population. Selon la norme EN13725 - qui définit et encadre la mesure de la concentration d'odeur, et par la même occasion ce qu'est un nez représentatif de la population - un juré de nez moyen doit pouvoir percevoir un composé de référence (le n-butanol) à une certaine concentration (40 ppb) avec une stabilité dans le temps.

Une odeur dont la concentration est de 2,5 UO_E/m³ signifie qu'il aura fallu la diluer 2,5 fois pour que, introduite dans 1 m³ d'air, elle atteigne le seuil de perception d'un jury (50% des membres du jury la perçoivent). Le seuil de perception est aussi dit seuil liminaire.

La concentration d'une odeur est parfois appelée niveau ou encore persistance d'odeur.

- Le débit d'odeur, est défini conventionnellement comme étant le produit du débit d'air rejeté, exprimé en m³/h, par le facteur de dilution au seuil de perception. Il est exprimé en UO_E/h par exemple.

- L'intensité de l'odeur, est proportionnelle à la concentration des molécules odorantes à partir du seuil de détection jusqu'à un seuil de saturation, c'est-à-dire dans la zone supraliminaire. Elle est fonction du caractère spécifique des composés odorants perçus, de leur composition et de leurs interactions mutuelles et avec la muqueuse olfactive (Figure 4).

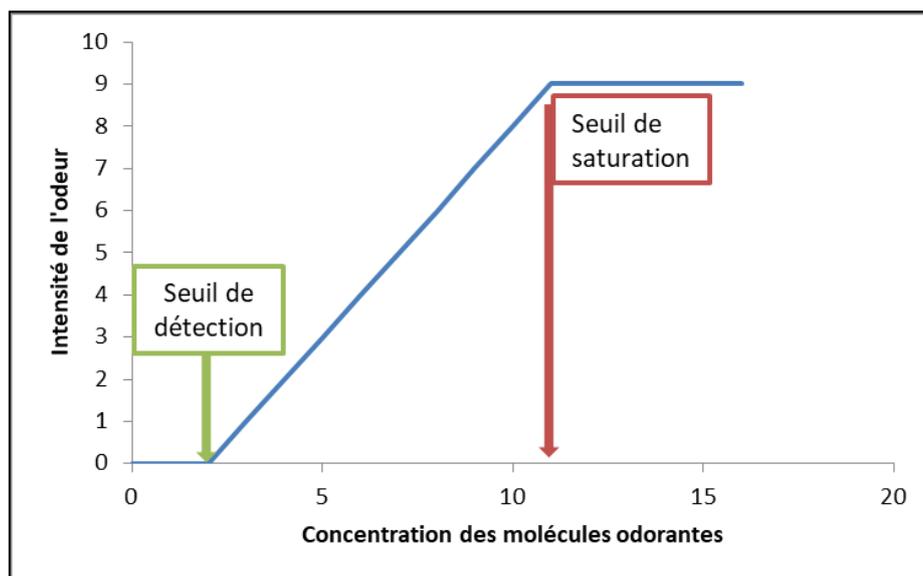


Figure 4 – Seuil de détection et de saturation d'une odeur

A noter que la concentration, l'intensité d'une odeur et sa toxicité ne sont pas corrélés.

2.1.2.2 Le système olfactif

Une odeur est perçue lorsque des molécules d'un composé odorant atteignent l'épithélium olfactif, qui constitue l'organe récepteur principal de l'olfaction. Cet organe sensoriel est une région de 2 à 3 cm² recouverte de mucus composés de cellules neuronales appelées récepteurs olfactifs (Figure 5).

Le nez humain compte plusieurs millions de récepteurs olfactifs, de 400 types différents. Étant donné que l'humain est en mesure de détecter plus de 10 000 odeurs différentes, il apparaît que nos cellules olfactives sont non-spécifiques. Ainsi, un récepteur donné réagira de façon plus ou moins prononcée selon la nature des molécules en présence. L'ensemble des récepteurs olfactifs constitue le site d'interactions entre les molécules odorantes et les neurorécepteurs. Ils reconnaissent des combinaisons de réponses des récepteurs, qui constituent la signature spécifique d'une odeur. Ces récepteurs transforment l'information physico-chimique caractéristique de la molécule odorante en impulsion électrique. Les signaux électriques sont ensuite propagés par un réseau d'axones qui convergent vers les quelques 2000 glomérules des bulbes olfactifs à l'intérieur de la boîte crânienne. L'ensemble des traitements réalisés dans les diverses composantes du cerveau correspond à la perception par l'être humain de l'odeur propre à un stimulus donné.

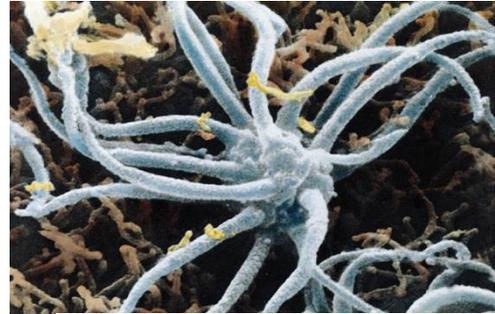


Figure 5 : Vue microscopique d'une cellule olfactive @Collection De Agostini/DEA PICTURE LIBRARY/BSIP (source : Garvanèse, 2017)

Le système olfactif peut être sollicité par deux voies :

- La voie externe, en inspirant par les narines : c'est la perception ortho-nasale ou olfaction directe ;
- La voie rétro-nasale (par le pharynx) : la perception des odeurs par voie rétro-nasale correspond aux odeurs présentes dans la bouche remontant dans la fosse nasale au moment de l'expiration.

La perception olfactive résulte d'une réaction complexe entre les caractéristiques des molécules odorantes, celles de l'appareil olfactif et les caractéristiques psychologiques et culturels de l'individu (éducation, vécu, culture, ...). Ainsi, **l'odeur est une interprétation subjective** par le système nerveux résultant de la stimulation du système olfactif par une molécule ou un mélange de molécules odorantes. C'est une perception mentale malléable qui évolue en fonction de nos expériences et de notre culture (Garvanèse 2017).

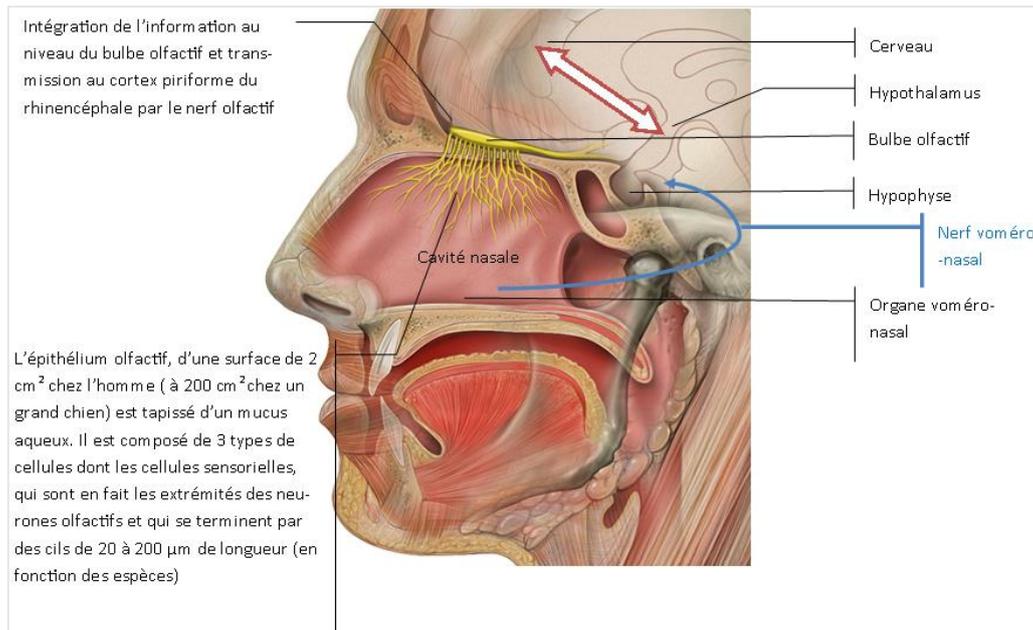


Figure 6 : Anatomie du système olfactif humain (Lynch 2019)

La nuisance olfactive est donc une notion complexe à définir étant donné qu'elle n'est pas uniquement caractérisée par des propriétés physico-chimiques du composé ou des composés odorants. Jaubert (2010) définit une gêne olfactive comme une odeur qui « *polarise notre attention et nous empêche de nous concentrer sur nos activités* ». La gêne olfactive provoque donc un dérangement chez l'individu. Par ailleurs, le niveau d'odeur n'est pas suffisant pour traduire la notion de nuisance olfactive. Ainsi, à titre d'exemple, une odeur forte mais ponctuelle n'entraînera pas la même gêne qu'une odeur plus faible mais fréquente. Par conséquent, l'exposition à une nuisance doit être évaluée selon des variables incluant à la fois l'espace et le temps.

Prix Nobel 2004

La découverte de la plus grande famille de gènes, celle des récepteurs olfactifs



[Linda Buck et Richard Axel](#)

Le prix Nobel de physiologie de 2004, décerné à Linda Buck et Richard Axel pour leurs recherches sur les récepteurs olfactifs, a permis de mettre en lumière le sens le plus négligé, peut-être du fait de son manque de considération dans le processus d'homínisation : l'odorat.

Ces recherches ont permis de découvrir que près de 1% du génome humain est consacré à l'information génétique pour les récepteurs olfactifs, démontrant ainsi qu'il s'agit de la plus grande famille de gènes du génome humain.

SYNTHESE

Contexte, biologie de l'odeur et système olfactif

Les différents enjeux liés aux problématiques d'odeurs ont gagné en importance ces dernières années. En effet, les nuisances olfactives incommoderaient de 13 à 20% de la population européenne (Merlen, 2017).

L'odeur est une notion particulièrement difficile à appréhender étant donné qu'elle n'existe pas en tant que telle mais est une représentation complexe, intellectuelle, sensorielle et culturelle de composés chimiques. Les nuisances olfactives engendrent de nombreuses inquiétudes liées à la toxicité supposée (souvent à tort) de ces odeurs. Bien qu'il n'y ait pas de relation simple entre concentration d'une molécule et une odeur perçue, les effets sur la santé des nuisances olfactives ne sont pas négligeables : dégradation de la qualité de vie, ou encore trouble de l'appétit. Les nuisances olfactives sont elles-mêmes difficiles à juger. Les critères sont nombreux, et comprennent la fréquence des nuisances, la durée de perception de ces dernières ou encore les craintes qu'elles peuvent occasionner.

2.1.3 Le nez électronique : historique et définition

L'origine de travaux portant sur le développement d'un appareil spécifiquement destiné à la détection d'odeurs remonte au début des années 1960. Cependant, le terme « nez électronique » n'est apparu dans la littérature qu'une vingtaine d'années plus tard, à la suite des recherches menées à l'Université de Warwick par le groupe de Dodd et Persaud. En effet, ils ont été les premiers, dès 1982, à définir un nez électronique comme étant un outil qui associe une série de capteurs chimiques non-spécifiques à un système automatisé de reconnaissance, permettant l'interprétation des réponses des capteurs. L'appellation « nez électronique » s'explique par l'analogie existant entre ce type d'appareil de mesure et le système olfactif humain, les capteurs jouant le rôle des récepteurs olfactifs et le système de traitement informatique remplaçant le cerveau (Sambemana 2012). Cette analogie ne signifie pas que les nez électroniques sont en mesure d'atteindre les performances d'un nez humain, dont la complexité est encore loin d'être intégralement comprise. Cette définition est depuis dépassée, et ne reflète pas la réalité des nez électroniques actuellement développés ou en cours de développement (capteurs non-chimiques et spécifiques).

Les nez électroniques sont constitués de réseaux miniaturisés de capteurs à large spectre, avec des surfaces sensibles très variées (des polymères conducteurs, des polymères à empreinte moléculaire, des oxydes métalliques, des nanotubes de carbone, etc.), dont certaines propriétés sont modifiées en présence de molécules odorantes. Elles sont couplées à un transducteur (électrochimique, optique, électrique, gravimétrique, etc.) qui génère, après traitement du signal, une signature, ou empreinte, caractéristique de l'environnement odorant. Cette signature est ensuite analysée et comparée à une base de données obtenue lors d'une phase d'apprentissage.

Le nez électronique diffère des autres instruments dédiés à la mesure des composés chimiques car il détecte et mesure une odeur, c'est-à-dire un mélange complexe de composés odorants. Les nez électroniques ne sont pas conçus pour déterminer la composition exacte du gaz étudié mais plutôt pour identifier la source de l'émission, l'impact à la réception, ou encore pour détecter et distinguer des gaz odorants spécifiques présents au sein d'un mélange (Alphus D Wilson 2013) (Figure 7).

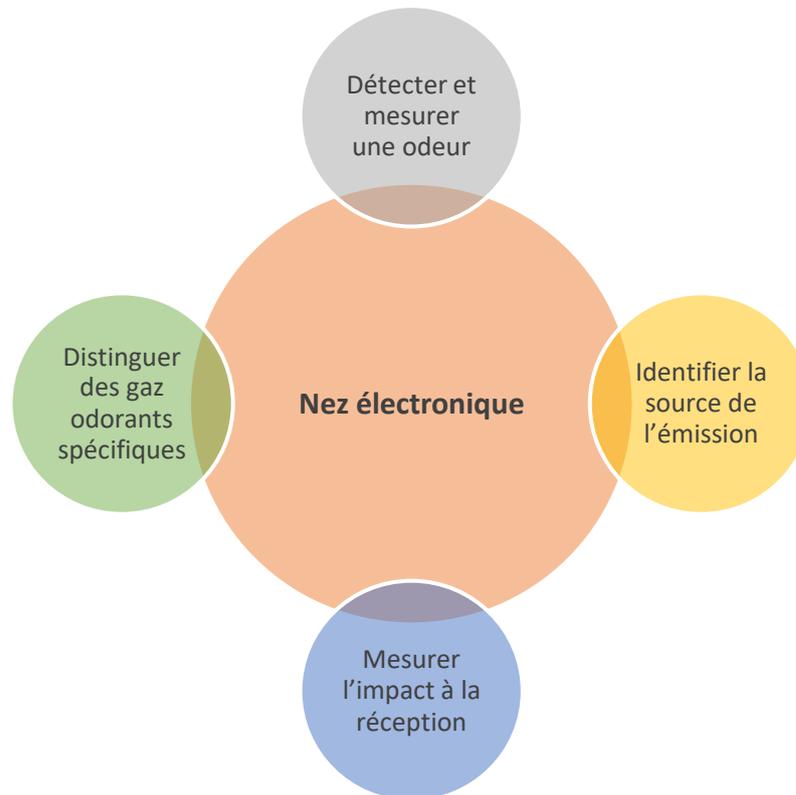


Figure 7 : Le nez électronique et ses fonctions (RECORD 2020)

SYNTHESE DE LA PARTIE 2.1.3

Le nez électronique : historique et définition

En 1982 à l'Université de Warwick, le nez électronique est pour la première fois envisagé. L'inspiration première vient du système d'olfaction des mammifères, un système sensoriel extrêmement complexe (cluster de gènes le plus important du génome) et peu connu. Bien qu'inspiré par ce dernier, le nez électronique n'est et ne sera certainement pas dans un futur proche, en mesure d'égaliser les performances du nez humain.

2.2 Règlementation et normes concernant la mesure des odeurs

2.2.1 Règlementation

2.2.1.1 Règlementation française

De nombreux **textes (lois, arrêtés et décrets) relatifs aux odeurs et aux nuisances olfactives** ont été promulgués en France, depuis 1810 (Annexe III). Ils sont à l'origine de la réglementation actuellement en vigueur, regroupée depuis 2005, dans le livre V (Prévention des pollutions, des risques, et des nuisances) du Code de l'environnement. Cette réglementation est le reflet de la préoccupation croissante de la société en matière d'odeur. En effet, depuis 1996, « *toute substance susceptible de provoquer des nuisances olfactives excessives* » est considérée comme une pollution à part entière (article L. 220-2 du code de l'environnement). De fait, de nombreuses activités industrielles doivent considérer leur impact olfactif au même titre que celui d'autres émissions dans le milieu naturel.

Concrètement, ces lois peuvent imposer différentes mesures :

- Des distances minimales à respecter entre la source de l'odeur et les habitations ou d'autres sites sensibles ;
- Des mesures d'atténuation comme la fermeture des bâtiments d'où est émise l'odeur ;
- L'obligation de réaliser un état des lieux initial et de mener une étude d'impact de l'activité industrielle.

Dans certains cas, elles fixent des valeurs limites pour le débit des odeurs émises dans l'environnement, une valeur seuil à l'émission et un rythme de surveillance (trimestriel, semestriel, annuel) du débit d'odeur dans l'environnement, en fonction de la concentration d'odeur émise par la source.

La figure 8 ci-après illustre l'organisation de la réglementation concernant les odeurs et les nuisances olfactives émises selon le type d'activité industrielle.

2.2.2 Règlementation européenne

La **Directive 2008/98/UE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets** prévoit que les déchets doivent être traités sans créer de risque pour l'eau, l'air, le sol, la faune ou la flore, sans provoquer de nuisance sonore ou olfactive, sans porter atteinte aux paysages et aux sites présentant un intérêt particulier.

D'autres directives concernent essentiellement la qualité de l'air, sans y associer les odeurs ni les nuisances olfactives :

- **Directive du 23 octobre 2001** fixant des plafonds d'émission nationaux pour certains polluants atmosphériques ;
- **Directive 2004/107/CE du 15 décembre 2004** du Parlement Européen et du Conseil **concernant l'arsenic, le cadmium, le mercure, le nickel et les hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'air ambiant** ;
- **Directive 2008/50/CE** du Parlement européen et du Conseil du 21 mai 2008 également appelée Directive pour la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe.

En revanche, les pollutions olfactives sont abordées dans la législation européenne à travers les directives sectorielles relatives aux déchets et aux émissions industrielles :

- **Directive 1999/31/CE du 26 avril 1999** du Conseil concernant la mise en décharge des déchets. Elle oblige les États membres à prendre des mesures afin de réduire les nuisances et les dangers pouvant résulter de la décharge, et notamment les émissions d'odeurs ;
- **Directive 2000/76/EC sur l'incinération des déchets** ;
- **Directive 2010/75/UE relative aux émissions industrielles (DEI)**. Cette directive impose aux autorités compétentes des États membres d'assortir les autorisations délivrées aux grandes installations industrielles de conditions relatives aux émissions de polluants dont les émissions odorantes comme défini dans la directive.

Les émissions d'odeurs sont également traitées dans les documents BREF (documents de référence relatifs aux meilleures techniques disponibles), établis par décisions de la Commission pour les différents secteurs d'activités industrielles couverts par la DEI. Brinkman et al. (2018) consacre bien un chapitre aux nez électroniques dans leur *JRC Reference Report on Monitoring of Emissions to Air and Water from IED Installations* mais les auteurs y précisent que l'usage des nez électroniques est généralement réservé à la mesure semi-qualitative ou semi-quantitative pour le contrôle qualité de matières premières ou de produits ou encore de systèmes d'abattement d'odeurs.

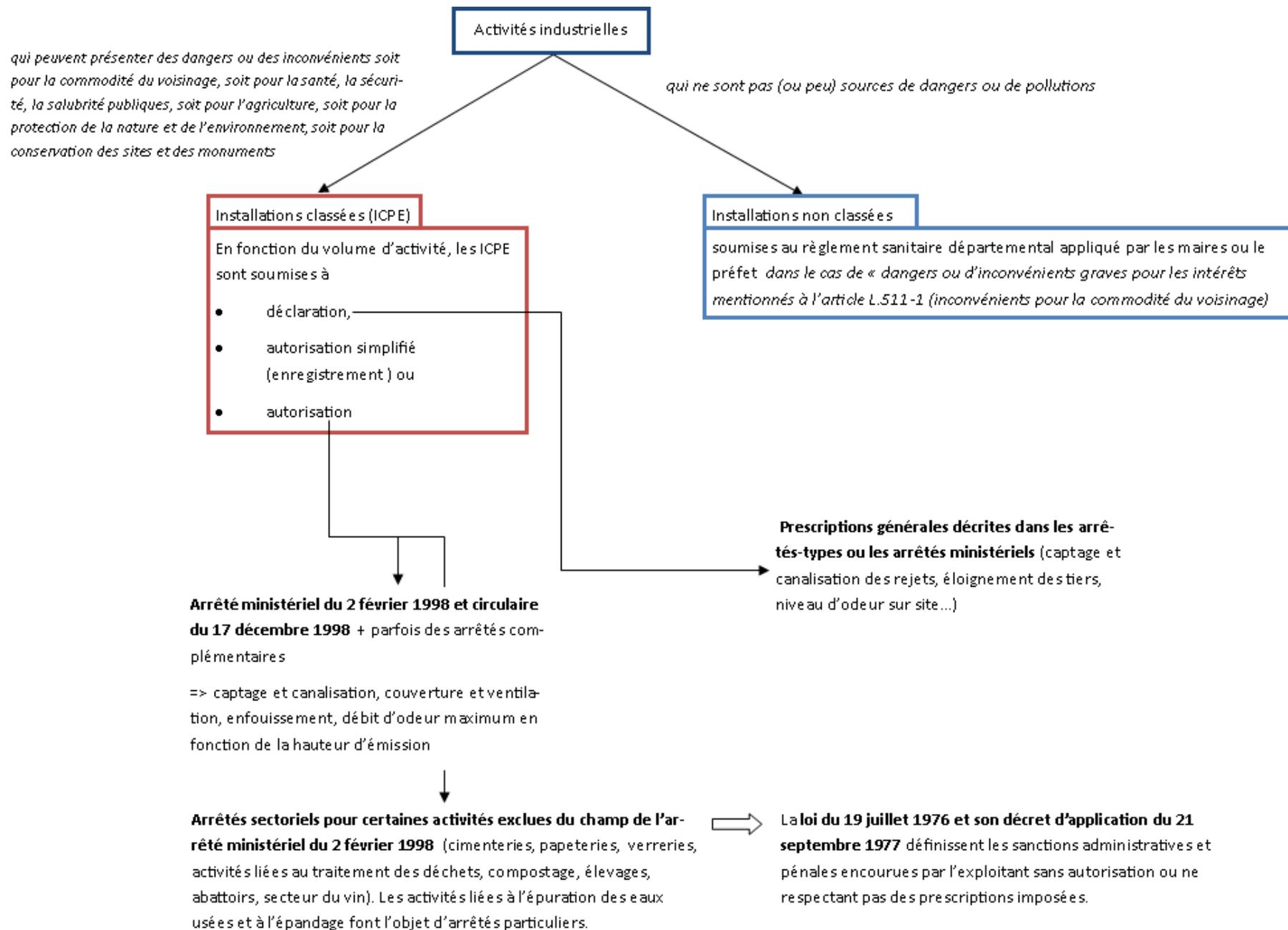


Figure 8 : Réglementation concernant les odeurs et nuisances olfactives, applicable aux activités industrielles (RECORD 2020)

2.2.3 Normes

Selon l'Organisation internationale de normalisation (ISO) ou la Commission électrotechnique internationale (CEI), une norme est « *un document établi par consensus et approuvé par un organisme reconnu (comme l'AFNOR pour la France ou le CEN à l'échelle européenne), qui fournit, pour des usages communs et répétés, des règles, des lignes directrices ou des caractéristiques, pour des activités ou leurs résultats, garantissant un niveau d'ordre optimal dans un contexte donné* ». ¹

Un standard (ou standard de facto) est un référentiel largement publié par une entité privée autre qu'un organisme de normalisation national ou international ou non approuvé par un de ces organismes pour un usage national ou international.

2.2.3.1 En France

En France, la mesure des odeurs est actuellement encadrée par plusieurs normes.

- La **norme européenne EN 13725**, émise par le Comité technique « Qualité de l'air » du CEN, en avril 2003 (CEN/TC264 2003), actuellement en cours de révision. Elle porte sur la détermination des odeurs par olfactométrie dynamique et le taux d'émission d'odeurs de sources fixes. Cette norme a été retranscrite par l'AFNOR en octobre 2003, sous la référence NF EN 13725 et a ainsi remplacé la norme française NF X 43-101 (mesurage de l'odeur d'un effluent gazeux) et la norme NF X 43-104 (définition des différents modes de prélèvement des atmosphères odorantes en fonction des types de sources et d'analyses, ainsi que les conditions de stockage et de transport des échantillons prélevés). Les essais comparatifs qui ont lieu chaque année entre les laboratoires d'olfactométrie sont réalisés en application de la norme européenne EN 13725. La participation à cet essai inter-laboratoire est indispensable au maintien de l'accréditation ISO 17025 qui spécifie les « *exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais* ».
- La **norme française NF X 43-103** (AFNOR 1996), concernant « la qualité de l'air, le mesurage olfactométrique, le mesurage de l'odeur d'un effluent gazeux et les méthodes supraliminaires », est toujours en application.

Ces normes considèrent l'olfactométrie comme méthode sensorielle de mesure des odeurs et précisent les différentes étapes qui aboutissent à la mesure d'une odeur, notamment :

¹ <https://eduscol.education.fr/numerique/dossier/archives/metadata/normes-et-standards>

- Les règles relatives à la constitution du jury de nez humain (nombre d'individus, critères de sélection, vérification de la sélection, règles de conduite des membres du jury, nombre et rythme des mesures) ainsi que leur capacité à détecter une substance de référence et à discriminer les intensités odorantes ;
- Les méthodes de mesures du facteur de dilution au seuil de perception qui donne la concentration d'odeur ;
- Les caractéristiques techniques de l'olfactomètre et son entretien ;
- Les conditions environnementales du laboratoire ;
- Les traitements statistiques à appliquer aux mesures.

Remarque : La norme européenne prévoit la sélection d'un jury composé d'individus ayant une sensibilité spécifique au butanol (molécule odorante de référence) alors que la norme française NF X 43-101 préconisait la sélection d'un jury représentatif de la population globale. En outre, il n'a pas été prouvé que la sensibilité spécifique au butanol est extrapolable aux autres odeurs. Ces points de divergence ont fait débat lors de l'élaboration de la norme européenne et illustrent les limites et les biais de l'olfactométrie dynamique.

La norme européenne EN 13725 et la norme française NF X 43-103 étant les deux seules normes applicables en France permettant de définir les conditions de mesure de la concentration d'odeurs, l'olfactométrie dynamique reste donc la seule méthode de référence.

- La **norme européenne EN 16841 (partie 1 et 2)** concerne la détermination des odeurs dans l'environnement par mesure de terrain, respectivement par la méthode de la grille et la méthode du panache (CEN/TC 264 2016a; 2016b). Elle décrit deux méthodologies qui permettent aux jurés d'aller sur une zone susceptible d'être odorante et de faire des relevés pour identifier la présence d'odeur(s) connue(s) ou pas. Les jurés sont sélectionnés sur le même principe que pour l'olfactométrie dynamique.
- La **norme européenne EN 15259**, retranscrite par l'AFNOR en novembre 2007 sous la référence **NF EN 15259**, a remplacé la norme française NF X43-377 (CEN/TC 264 2007). Elle concerne « Qualité de l'air - Mesurage des émissions de sources fixes - Exigences relatives aux sections et aux sites de mesurage et relatives à l'objectif, au plan et au rapport de mesurage ».

2.2.3.2 Dans le monde

Les normes européennes précédemment citées s'appliquent dans tous les pays européens.

En Allemagne, une norme nationale (**VDI/VDE 3518 Part 3**, *Multigas sensors - Odour-related measurements with electronic noses and their testing*) concernant la mesure des odeurs à l'aide de nez électroniques a été publiée en décembre 2018 (Beuth 2018). Cette norme aborde également les protocoles de test basés sur l'olfactométrie et d'autres techniques instrumentales. Elle s'appuie sur les 2 premiers volets de la norme 3518 (**VDI/VDE 3518**, *Multigas sensors - Terms, configuration, function*

and classification et **VDI/VDE 3518**, *Multigas sensors - Function, classification and assessment*) publiées respectivement en 2011 et 2014 (Beuth, 2011; Beuth, 2014).

Au Pays-Bas, un accord technique (**NTA-9055**, *Air quality - Electronic air monitoring - Odour (nuisance) and safety*) a été publié en 2012 par l'Institut de standardisation néerlandais (NEN 2012). Cet accord établit les préconisations pour l'utilisation d'un nez électronique dans le but de détecter les changements de composition de l'air ambiant et ainsi de surveiller les émissions d'odeurs.

Il existe des normes à portée internationale comme les **Normes ISO** et les normes publiées par **ASTM International**² :

- la **norme E544-99**, *Standard Practices for Referencing Suprathreshold Odor Intensity (ASTM International 1999)*
- la **norme E679-19**, *Standard Practice for Determination of Odor and Taste Thresholds By a Forced-Choice Ascending Concentration Series Method of Limits (ASTM International 2019)*
- la **norme ISO 13301**, *Sensory Analysis Methodology General Guidance for Measuring Odour, Flavour and Taste Detection Thresholds by a Three Alternative Forced Choice (3AFC) Procedure (ISO 13301 2018)*

La norme allemande, récemment publiée, est actuellement la seule norme parmi les normes européennes ou ISO à intégrer l'usage de nez électroniques parmi les méthodes de mesures des odeurs (Brinkman et al. 2018).

2.2.4 Évolution réglementaire et normative

L'accord national néerlandais, publié en 2012, est à l'origine des travaux initiés au sein du comité technique dédié à la qualité de l'air du Comité européen de normalisation (CEN/TC264 *Air Quality*). Les normes allemandes récemment publiées et précédemment citées ont également largement alimenté les discussions du groupe de travail 41 (WG41) pour l'élaboration d'une nouvelle norme européenne dédiée à la mesure instrumentale des odeurs.

2.2.4.1 Le CEN/TC 264 Air Quality

Ce comité technique a pour objectif la normalisation des méthodes d'évaluation de la qualité de l'air dans différentes situations : les émissions, l'air ambiant, l'air intérieur, les gaz du sol et émis par le sol,

² ASTM International est un organisme de normalisation qui rédige et produit des normes techniques concernant les matériaux, les produits, les systèmes et les services. Fondé en 1898 aux États-Unis, cet organisme portait alors le nom de *American society for testing material* (société américaine pour les essais des matériaux).

les dépôts. Sont concernées, les méthodes de mesure des polluants de l'air (particules, gaz, odeurs et micro-organismes) ainsi que les méthodes d'évaluation de l'efficacité des systèmes de nettoyage.

La détermination des valeurs admissibles pour les polluants de l'air, les espaces professionnels et chambres blanches ainsi que les substances radioactives ne sont pas concernés par les travaux de ce comité technique.

Vingt-sept groupes de travail ou sous-comités composent le CEN/TC 264 et effectuent un travail ciblé dans différents domaines (air ambiant-COV/SO₂/NO₂/O₃/CO ; air ambiant-PM10/PM2,5 ; air ambiant-pollen et spores ; etc.), préalablement à la rédaction des normes.

En 2015, un groupe de travail (CEN/TC 264/WG 41 - *Emissions air ambiant – Surveillance instrumentale des odeurs*) a été créé au sein du comité technique dédié à la qualité de l'air du Comité européen de normalisation (CEN/TC264 *Air Quality*) dont l'objectif est de produire une nouvelle norme européenne concernant les méthodes instrumentales de détection et de mesure des odeurs y compris les nez électroniques. Le WG41 est composé d'experts issus des organismes de normalisation des pays membres du CEN (Belgique, France, Allemagne, Italie, Pays-Bas, Espagne, UK). Il est animé par Mr Van Harreveld, lui-même assisté par Mr Ted Den Heijer.

Les travaux du CEN/TC 264/WG 41 sont répartis au sein de 5 sous-groupes dont les sujets sont :

- Les caractéristiques minimales requises pour les systèmes de surveillance des odeurs dans l'air ambiant, l'air intérieur et les émissions que ce soit directement à la source ou en sortie de système d'abattement. Ce groupe est chargé de définir les capacités et les limites des instruments notamment en fonction de leurs domaines d'application spécifiques ;
- L'établissement et la validation de la relation entre l'odeur mesurée et l'odeur perçue. Cette tâche est assurément la tâche la plus originale et aussi la plus difficile du WG41 ;
- Le vocabulaire et les définitions ;
- Une revue des technologies appropriées incluant la description des principaux types de capteurs utilisés pour la conception des nez électroniques ainsi que leurs avantages et inconvénients ;
- Une réflexion sur le système d'assurance qualité pouvant s'appliquer aux nez électroniques. Ce dernier sous-groupe a été créé dernièrement lors de la 12^{ème} réunion du WG41 à Milan.

En préambule aux travaux du WG41, il est admis que la concentration d'odeur (en UO_E/m³) ne pourra être obtenue que par corrélation entre le signal mesuré par un instrument et la concentration mesurée conformément à la norme EN13725 et que le caractère hédonique d'une odeur ne peut être appréciée par un instrument. En revanche, l'échantillonnage, les incertitudes de mesures ainsi que le stockage des données sont des points établis par la norme.

Date	Lieu	Sujet débattu
22 octobre 2015	Antwerp, Belgique	Elaboration du titre de la norme : « <i>Electronic sensors for odorant monitoring</i> »
11 février 2016	Nîmes, France	Remise en question du titre : « <i>Electronic sensors for odorant monitoring</i> » ou « <i>for odor monitoring</i> » Subdivision en 4 des tâches à mener
Décembre 2016	Bilbao, Espagne	Discussion concernant l'application d'un système d'assurance qualité aux nez électroniques
Février 2017	Barcelone, Espagne	
29-30 août 2017	Berlin, Allemagne	Méthode de calibration : la calibration doit-elle être faite sur site ? Quel doit être le matériel de référence utilisé ? Une distinction importante a été faite entre l'usage d'un réseau de nez électroniques conçu et installé sur un site et l'utilisation d'un nez électronique « multi-usage » qui n'a pas été conçu pour une application particulière.
19-20 juin 2018	Delft, Pays-Bas	
19-20 mars 2019	Milan, Italie	Discussions basées sur la récente norme allemande VDI/VDE 3518 publiée en décembre 2018.
13 Mai 2019		Vote des membres du TC264 autorisant la prolongation des travaux du WG41 pour 3 ans supplémentaires ce qui repousse la publication de la norme européenne à l'horizon 2020-2024 si les experts du WG41 mettent à profit tout le temps qui leur est imparti. Création d'un sous-groupe supplémentaire dédié à la question des niveaux d'assurance qualité.
3-4 juillet 2019	Bilbao, Espagne	Nouvelle proposition de procédure concernant la certification des nez électroniques.

Tableau 1 : Calendrier de certaines réunions du WG41 (RECORD 2020)

(d'après <https://www.olores.org/en/techniques/instrumental-odour-monitoring-o-sensors/>)

2.2.4.2 Les contours de la norme à venir concernant les nez électroniques

Les nez électroniques font appel à de nombreuses technologies en perpétuelle évolution, c'est la raison pour laquelle les caractéristiques techniques des appareils ne peuvent pas être établies par la norme. Seules les performances globales requises (leur définition et les moyens de les vérifier) seront définies.

La norme concernera les appareils qui ont la capacité de :

- Détecter la présence ou l'absence d'une odeur à partir d'un seuil donné (=seuil de détection) ;
- Identifier et classer des odeurs de différentes concentrations* ;
- Quantifier une odeur** (concentration d'odeur donnée en UO_E/m^3) ;
- Donner des réponses stables dans des conditions atmosphériques variées.

* La gamme de concentration d'odeur devra être précisée selon les 4 domaines d'application : Surveillance des odeurs dans l'air ambiant, l'air intérieur, à la source des émissions et en sortie de système d'abattement.

** Les appareils devront être capables de mesurer la concentration d'odeur (le résultat global d'un mélange de molécules odorantes) et non uniquement la concentration de molécules odorantes.

	Dans l'air ambiant et intérieur	À l'émission
Seuil pour la détection (présence/absence)	0,1-10 UO_E/m^3	Sans objet
Identification/classification des odeurs	1-100 UO_E/m^3	100-100 000 UO_E/m^3
Quantification des odeurs	1-200 UO_E/m^3	1-200 UO_E/m^3

Tableau 2 : Seuils proposés par le WG41 pour les différents domaines d'application de la mesure instrumentale (RECORD 2020)

Que ce soit pour la détection, la classification ou la quantification des odeurs, les appareils devront être capables de donner des résultats dans une gamme de valeurs fixée par la norme. Les seuils proposés sont donnés dans le tableau 2.

Les procédures d'assurance qualité appliquées au nez électronique sont aussi débattues au sein du WG41 (Cipriano 2018). En effet, cette question rejoint une préoccupation de la plupart des utilisateurs actuels de nez électroniques : quelle est la fiabilité des résultats ? Comment vérifier que toutes les étapes qui fournissent la donnée se sont déroulées correctement ? Comment évaluer et mesurer l'incertitude des données fournies ? Il apparaît alors indispensable que les nez électroniques puissent être intégrés à un système d'assurance qualité. Cette question a commencé à émerger dans les discussions du WG41 fin 2016 et a abouti à la création d'un sous-groupe de travail dédié et à la prolongation de trois ans des travaux du WG41 en mai 2019. Sans un volet concernant l'assurance

qualité et son application aux nez électroniques, la future norme serait rétrogradée au rang de standard technique.

La question reste néanmoins complexe. Les **normes EN 14181** (CEN/TC 264, 2014) et **EN 15267** (CEN/TC 264, 2007, 2009, 2014, 2017) concernent les systèmes d'assurance qualité des systèmes de mesurage automatiques (AMSs) utilisés pour l'échantillonnage et la mesure des polluants à l'émission de sources fixes (incinérateurs, usine pétrochimiques...) et dans l'air ambiant.

La **norme EN 14181** définit trois niveaux d'assurance qualité (QAL) ainsi que les procédures pour les établir pour les systèmes automatiques de mesurage installés sur les sites industriels :

- QAL1 concerne la certification de l'appareil c'est-à-dire son aptitude à remplir son usage avant son installation. Ce niveau de qualité doit également établir l'incertitude de l'appareil et vérifier qu'elle est en dessous d'un seuil établi ;
- QAL 2 concerne la vérification technique initiale de l'appareil et de ses logiciels ainsi que sa calibration avec la méthode de référence. Tous ces éléments définissent l'aptitude de l'appareil à remplir son usage après son installation et doivent également démontrer l'équivalence de l'appareil avec la méthode de référence ;
- QAL3 concerne la surveillance de l'aptitude de l'appareil durant son utilisation normale. Ce niveau de qualité est en général pris en charge par l'utilisateur au sein de son système qualité.

La **norme EN 15267** définit les principes, les procédures et les exigences de la certification des AMSs utilisés dans le cadre de la surveillance des émissions de sources fixes et de la qualité de l'air ambiant.

Ces 2 normes sont complétées par la **norme EN 17255** qui concerne l'acquisition des données, leur stockage et leur validation (CEN/TC264 2019).

Pour être considérés comme des AMSs, les nez électroniques devraient, en premier lieu, permettre de connaître les molécules cibles, leur limite de détection, les interférences, les phénomènes de dérive, la stabilité et la linéarité de chacun des capteurs et des composants analytiques. Ils devraient également être accompagnés d'appareils et de logiciels permettant de réaliser des tests périodiques des capteurs (QAL3) et de mesurer l'incertitude à chaque étape du processus de mesure de l'appareil. Pour se conformer aux exigences de la norme EN 14181, l'incrémentation de la base de données de référence ou l'amélioration continue des méthodes d'analyses de données (réseaux de neurones, *machine learning*) ne seront plus possibles après la phase de calibration.

Il apparait que les exigences du système d'assurance qualité des AMSs, bien que légitimes, seront à l'origine d'une complexification des nez électroniques et donc d'une augmentation de leur coût mais qu'elles risquent aussi de nuire à leurs performances. De plus, lorsque les données brutes produites par le(s) nez sont intégrées sur un serveur distant, les procédures d'assurance qualité n'en seront que plus complexes. Les choses ne seront pas plus simples si l'appareil traite toutes les données localement car il est alors considéré comme un système d'acquisition et de traitement des données qui, conformément à la **norme EN 17255**, doit être certifié par une organisation externe. Enfin, l'adhésion au système d'assurance qualité des AMSs implique qu'une vérification indépendante puisse être

effectuée, ce qui nécessite la définition d'un échantillon témoin (nature et concentration des molécules) et d'une méthode analytique de référence.

Toutes ces questions relatives à un système d'assurance qualité adapté aux nez électroniques justifient la prolongation des travaux votée en mai 2019 et doivent être étudiées au cours des trois années à venir.

2.2.4.3 La révision de la norme EN13725 (CEN/TC264 2003)

Les travaux menant à la révision de cette norme concernant l'olfactométrie dynamique ont été conduits au cours de 14 réunions du groupe 2 du comité technique 264 du CEN (composé de 26 experts). Ces travaux, débutés en 2012, se sont achevés fin 2018. La norme révisée devrait donc être publiée d'ici la fin 2019 (2021 pour la version française selon le site de l'AFNOR) (Guillot et Luillery 2017; Van Harreveld 2017).

Les principaux points sur lesquels les 26 experts du groupe 2 se sont penchés concernent :

- Le stockage des échantillons et le matériel d'olfactométrie (Tâche 1) ;
- Le matériel de référence pour la sélection des panelistes et les procédures de management du panel (Tâche 2) ;
- L'échantillonnage des sources passives (sans flux) (Tâche 3) ;
- L'échantillonnage des sources actives (Tâche 4) ;
- La dilution dynamique pendant l'échantillonnage des émissions de cheminées (Tâche 5),
- Les implications des normes concernant l'échantillonnage notamment la norme EN15259 Air Quality – Measurement of stationary source emissions (CEN/TC 264 2007) (Tâche 6) ;
- Le calcul des incertitudes (Tâche 7) ;
- La compatibilité de la norme EN13725 avec les méthodes oui/non et choix forcé (employées au sein des jurys de nez) (Tâche 8) ;
- La santé et la sécurité des intervenants (Tâche 9).

A titre d'exemple, la norme révisée prévoit une procédure de qualification des panélistes sur la base d'un autre composé que le n-butanol, afin de gagner en précision pour certaines applications (Guillot et Luillery 2017). Plus généralement, la révision de la norme doit permettre d'améliorer la précision des mesures en condition de répétabilité³ mais aussi, ce qui n'était pas le cas dans la version initiale de la

³ Condition de répétabilité : les mesures sont effectuées successivement dans des conditions parfaitement identiques

norme, en condition de reproductibilité⁴. Les autres principaux objectifs concernent la réduction des risques en termes de santé et de sécurité, la production d'une procédure pour l'échantillonnage des sources canalisées, passives et actives ainsi que d'une procédure ciblée sur le stockage des échantillons (Van Harreveld 2017).

SYNTHESE DE LA PARTIE 2.2

Règlementation et normes concernant la mesure des odeurs

Afin de répondre aux problématiques liées aux émissions d'odeurs et à la métrologie de ces dernières, de nombreux textes réglementaires et législatifs ont été promulgués en France. La métrologie des odeurs est encadrée par plusieurs normes telles que la norme européenne EN13725, et la norme NF X 43 103. Ces normes ne considèrent que l'olfactométrie comme méthode sensorielle de mesure des odeurs et précisent les différentes étapes qui aboutissent à la mesure d'une odeur. Une nouvelle norme dédiée à la mesure instrumentale des odeurs est actuellement en cours d'élaboration et devrait être publiée d'ici 2024. Parallèlement, la norme européenne EN13725 est en cours de révision et devrait permettre de préciser certaines procédures concernant l'olfactométrie dynamique. Elle devrait être publiée très prochainement.

⁴ Condition de reproductibilité : Les mesures sont effectuées en faisant varier une ou des conditions de mesure, le plus souvent, le laboratoire où sont effectuées les mesures, le même protocole étant par ailleurs respecté.

3 Principes technologiques d'un nez électronique

Les nez électroniques sont composés de trois briques technologiques majeures (Figure 9) :

- **Un réseau de capteurs** pour la détection et la transduction du signal. Pour faire une analogie avec le système olfactif, ce bloc représente la membrane olfactive.
- **Une unité de traitement du signal** : ce bloc vise à intégrer le signal reçu depuis les capteurs (filtrage, amplification, ...). De plus, cette unité comprend un convertisseur de signal analogique en signal numérique (unité de traitement de données). Pour poursuivre l'analogie avec le système olfactif, ce bloc représente le bulbe olfactif.
- **Une unité de traitement des données.** Ce bloc vise à analyser le signal par comparaison à une base de données. Les méthodes d'analyse statistique sont nombreuses (analyse factorielle discriminante, analyse en composante principale, ...).

Les paragraphes suivants s'attacheront à décrire ces briques technologiques qui font écho au système olfactif.

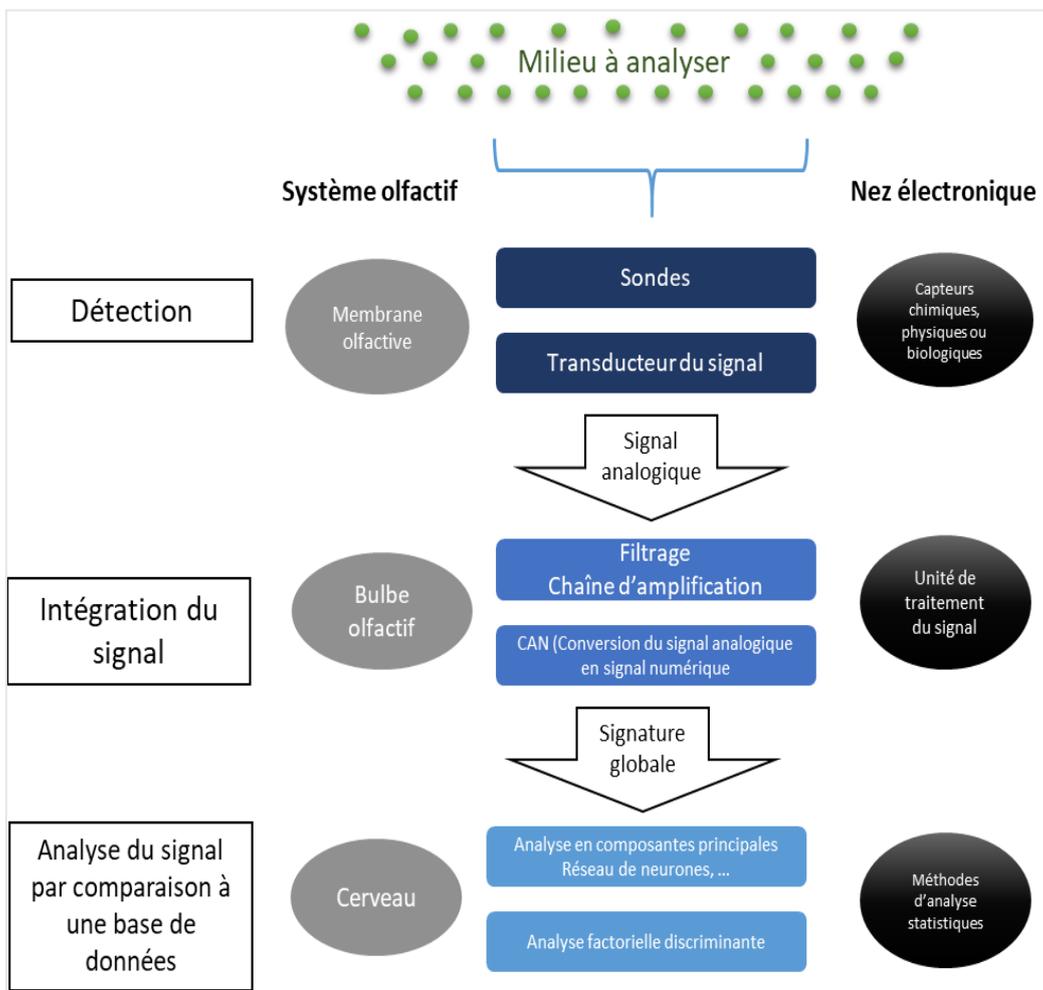


Figure 9 : Principe de fonctionnement d'un nez électronique comparé au fonctionnement du système olfactif (RECORD 2020)

3.1 Détection et transduction du signal : les réseaux de capteurs

La notion de capteurs est indissociable de celle de nez électroniques : un capteur transforme une grandeur physique en une grandeur normée, généralement électrique, qui peut être interprétée par un dispositif. Un capteur se caractérise par :

- L'étendue de mesure : valeurs extrêmes pouvant être mesurées par le capteur ;
- La résolution : plus petite valeur que le capteur est en mesure d'identifier ;
- La sensibilité : variation du signal de sortie par rapport à la variation du signal d'entrée ;
- La précision : aptitude du capteur à donner une mesure proche de la valeur vraie ;
- La rapidité : temps de réaction du capteur ;
- La linéarité : écart de sensibilité sur l'étendue de mesure ;
- La sélectivité : aptitude à détecter l'espèce cible à l'exclusion de toute autre.

Plusieurs types de capteurs chimiques et physiques peuvent être utilisés (Tableau 3). Toutefois, la plupart des nez électroniques emploient des capteurs à base d'oxydes métalliques semi-conducteurs, de polymères semi-conducteurs ou des capteurs acoustiques. Un nez électronique combine en général de 3 à 20 capteurs, parfois de technologies différentes, et choisis en fonction de l'application visée.

3.1.1 fs intégrés dans les nez électroniques

3.1.1.1 Oxydes métalliques semi-conducteurs (MOS)

Ces capteurs utilisent une couche d'oxydes métalliques semi-conducteurs. Il existe une grande quantité d'oxydes métalliques utilisés pour la détection de gaz (oxydes d'étain, de zinc, de titane...). Chaque matériau possède une sensibilité maximale pour un gaz à une température donnée (tableau 3).

La conduction des oxydes semi-conducteurs est due à un déficit en oxygène au sein de ces matériaux. En présence de certains gaz, des réactions ont lieu à la surface du matériau : 1) l'adsorption de l'oxygène puis 2) une réaction d'oxydoréduction entre une molécule d'hydrogène et l'oxygène adsorbé. Cette réaction libère de l'eau et un électron à l'origine de la modification de la conductivité de surface du matériau. L'information chimique est ainsi traduite à travers la structure électronique du matériau et de ses surfaces en un signal électrique mesurable. Pour que ce changement soit mesurable, il est nécessaire de chauffer la surface à des températures élevées (entre 300 et 500°C). Les capteurs de gaz à base d'oxydes métalliques sont composés de plusieurs éléments (Figure 10) :

- Un film sensible d'oxyde métallique semi-conducteur, constituant la partie qui va interagir avec l'ambiance gazeuse ;
- Des électrodes pour la mesure électrique de cette couche sensible ;

- Une partie chauffante pour amener la couche sensible en température. Cette partie doit bien entendu être isolée électriquement des électrodes de mesure ;
- Un substrat, le plus souvent constitué d'alumine (Al_2O_3).

Oxydes métalliques	Gaz ciblés	Température optimale
SnO_2	CO , NO_x , CH_4 , NH_3 , H_2 , SO_2 , $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$	300-500°C
ZnO	CO , NO_x , CH_4 , NH_3 , H_2 , $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$	200-400°C
WO	NO_x , SO_2 , H_2S	250-350°C
TiO_2	CO , NH_3 , SO_2 , H_2S	400-500°C
In_2O_3	CO , NO_x , CH_4 , NH_3	100-200°C
Fe_2O_3	CO , NO_x , CH_4	300-500°C
CuO	CO , CH_4 , $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$	300-500°C

Tableau 3 : Caractéristiques des matériaux sensibles utilisés pour les capteurs MOS

(d'après <https://qualite-air-interieur-tpe.weebly.com/les-capteurs-mos.html>)

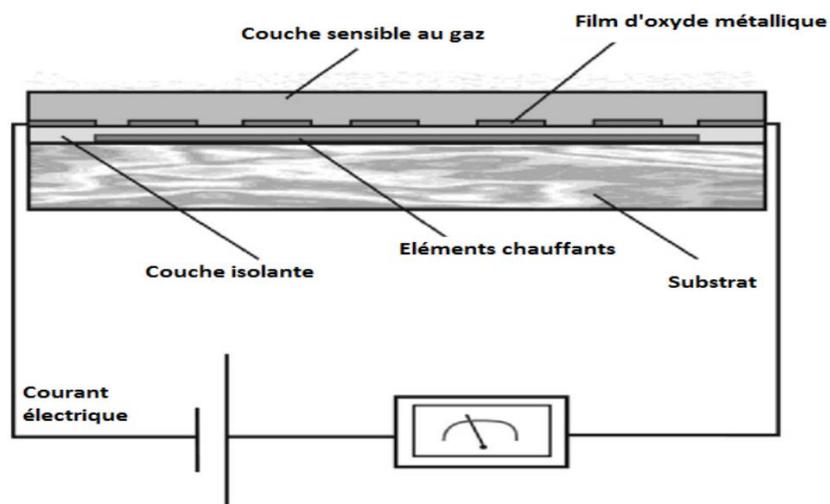


Figure 10 : Schéma simplifié du principe d'un capteur MOS (Adjadj et al. 2015)

LES POLYMERES SEMI-CONDUCTEURS

Les polymères semi-conducteurs sont des macromolécules générées par la polymérisation (chimique ou électrochimique) de monomères (pyrrole, aniline, thiophène) qui acquièrent alors des propriétés

semi-conductrices. L'interaction entre les molécules gazeuses et les chaînes polymériques produit un transfert d'électrons, entraînant ainsi un changement de conductivité.

3.1.1.2 Autres capteurs non spécifiques

Les capteurs acoustiques

Les capteurs acoustiques sont basés sur l'utilisation de matériaux piézo-électriques recouverts d'une mince couche de polymères. Les molécules volatiles sont adsorbées par le polymère, entraînant une variation de la masse du capteur. Ceci induit un changement mesurable de la fréquence de résonance du capteur.

Les microsystèmes électromécaniques

Les microsystèmes électromécaniques (**MEMS**) et, plus généralement, les nanotechnologies, constituent actuellement des technologies prometteuses. A titre d'exemple, des films nanostructures d'oxydes métalliques ont été développés et ont permis d'augmenter la sensibilité des nez électroniques vis-à-vis de certains composés ainsi que leur sélectivité.

Tous ces capteurs ont en commun d'être non spécifiques. Ils réagissent en présence de plusieurs gaz. Cette propriété est exploitée dans les nez électroniques en associant plusieurs capteurs, en général d'un même type, et en intégrant le signal émis par chacun d'eux en un signal unique caractéristique du mélange gazeux analysé, ce qui est la première étape de la détection d'une odeur.

3.1.1.3 Autres capteurs fréquemment associés aux capteurs non sélectifs

D'autres types de capteurs peuvent être utilisés dans le développement de nez électroniques. Ils n'émettent pas tous le même type de signal (Tableau 4) et leurs propriétés diffèrent des capteurs semi-conducteurs, notamment leur spécificité.

Types de capteur	Nature du signal émis
Calorimétriques	Conductivité thermique
Optiques	Fluorescence, chimioluminescence
Électrochimiques	Conductivité électrique, différence de potentiel électrique ou intensité du courant électrique
MOSFET (transistor à effet de champ)	Conductivité électrique
PID	Courant électrique

Tableau 4 : Autres types de capteurs utilisés dans les nez électroniques et la nature du signal émis (Sambemana 2012)

LES CAPTEURS ELECTROCHIMIQUES

Ces capteurs sont constitués d'une électrode sélective, d'une molécule et d'une électrode de référence. Les équilibres électrochimiques qui s'établissent entre les deux électrodes sont à l'origine d'un signal électrique mesurable, proportionnel à la concentration en molécules cibles dans le milieu. En fonction de leur mode de transduction, les capteurs électrochimiques sont dits potentiométriques, conductimétriques ou ampérométriques (Figure 11).

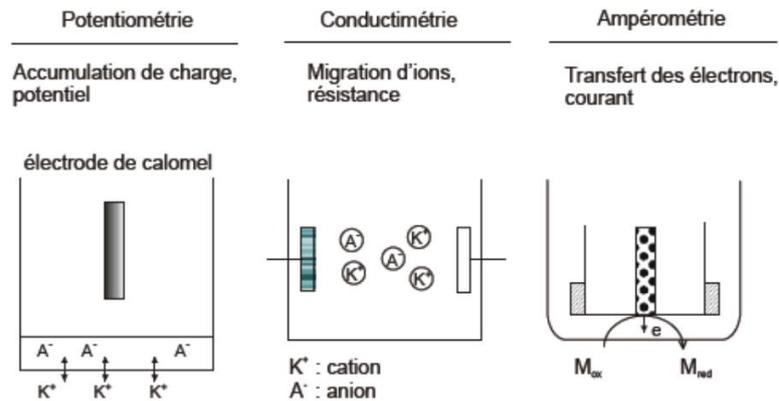


Figure 11 : Modes de détection électrochimique

LES DETECTEURS A PHOTO-IONISATION (PID)

Les détecteurs à photo-ionisation sont des capteurs relativement spécifiques généralement employés pour mesurer les COV, mais aussi d'autres gaz (ex : ammoniac ou dioxyde d'azote).

L'échantillon gazeux à analyser est introduit dans une chambre d'ionisation où un rayonnement ultraviolet (UV) provoque plusieurs réactions physico-chimiques, dont l'ionisation des molécules cibles. L'ionisation de ces molécules est à l'origine d'un courant électrique mesurable dont l'intensité est proportionnelle à la concentration des molécules cibles analysées (Figure 12).

Les PID peuvent être associés à des capteurs MOS dans des nez électroniques ou utilisés seuls en tant que capteurs spécifiques des COV.

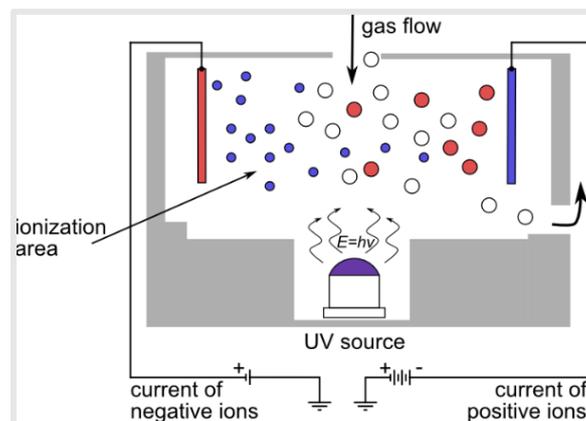


Figure 12 - Détecteurs à photo-ionisation (PID)

3.1.2 Critères de choix pour un capteur

De nombreux éléments doivent être pris en compte lors du choix d'un capteur et en premier lieu l'objectif visé : s'agit-il de la détection et la quantification d'une odeur ou d'une molécule odorante isolée et clairement identifiée ? S'il s'agit d'une odeur, sa nature et son niveau sont-ils constants ou variables ? Ainsi, pour des applications environnementales, les capteurs du nez électronique se doivent de ne pas être trop sélectifs, et d'être particulièrement sensibles. En effet, ils doivent être en mesure d'analyser un environnement souvent inconnu et de détecter des molécules odorantes dont on ne connaît pas la nature. Ils doivent par ailleurs être robustes, afin de pouvoir être opérationnels dans des conditions difficiles (humidité, vent, température élevée). Par conséquent, les capteurs les plus prisés pour ces applications sont les capteurs électrochimiques et les capteurs MOS. Ces derniers souvent pénalisés par leur faible sensibilité seront bien adaptés à la détection d'odeurs concentrées comme c'est le cas à proximité de la source d'émission.

A l'inverse, pour les applications de type contrôle de procédés industriels, les molécules ciblées sont souvent connues. Ainsi, la sélectivité est un atout, et permet d'éviter l'émergence de faux-négatif, un aspect indispensable dès lors que l'on cible des produits pouvant être toxiques. Les capteurs dotés d'une bonne sensibilité seront aussi privilégiés dans le domaine médical.

Selon Wilson (2013), les objectifs et conditions d'applications des nez électroniques diffèrent énormément d'une industrie à l'autre ou même au sein d'un même secteur d'activités, au point qu'il peut être préférable de concevoir un appareil dédié plutôt que d'utiliser un appareil qui aura été conçu pour s'adapter à une large gamme de situations. Un nez électronique conçu « à façon » ne sera pas forcément plus cher qu'un appareil grand public car il intègrera en général moins de capteurs. Le tableau 5 donne quelques exemples de réseau de capteurs et de méthodes d'analyse des données choisies en fonction des mélanges gazeux et des applications visées.

Type de polluants ou mélanges gazeux visés	Réseau de capteur ¹	Méthode d'analyse des données ²	Appareil commercialisé en 2012
Pesticides destinés à l'agriculture	8 MOS, 8 MPQ	ACP	
	Capteur à fluorescence	Analyse de signature optique	
Agents chimiques de combats	MEMS	RNA, ADL	
Usine de compostage	6 MOS	KNN	EOS3, EOS9
	7 MOS	ACP, ACC	
Toxines microbiennes	Capteur à fibre optique	ASO, RL ou RnL	
Mycotoxines alimentaires	6 MOS	ACP	EOS835
	10 MOS	ACP	PEN2
Molécules chimiques industrielles	MEMS	RNA, ADL	
Usine de traitement des déchets	10 MOS	ACP, AFD	PEN2
CO, H ₂ S, NH ₃ , NO ₂ , O ₃ , HCs, CH ₄	4 à 7 MOS	ACP	
CO, CH ₄ , éthanol, isobutane	4 MOS	ACP	
CO, Oxydes d'azote, NO ₂	5 MOS	Calibration multivariée	
Alcools, aldéhydes, Hydrates de carbone aliphatiques et aromatiques, acides chlorés, cétones, NH ₃ , composés soufrés	7 MOS	ACP, ACC	
Alcools, composés soufrés	6 MOS	KNN	EOS3, EOS9
H ₂ S, NO ₂ , SO ₂ ,	6 MOS	AFD	
Alcools, Hydrates de carbone aliphatiques, CH ₄ , H ₂	6 MOS	AFD	

Tableau 5 : Exemple de réseaux de capteurs et de méthode d'analyse des données en fonction des polluants à analyser (d'après Wilson 2012)

Liste des acronymes du tableau 5

¹ MOS = capteurs à oxydes métalliques semi-conducteurs ; MPQ = microbalance piézoélectrique à Quartz ; MEMS = microsystèmes électromécaniques

² ACP = Analyse en composantes principales ; ADL = analyse discriminante linéaire ; RNA = Analyse statistique par réseau artificiel de neurone ; KNN = Algorithme basé sur la méthode des K plus proches voisins ; ACC = Analyse canonique des correspondances ; ASO = Analyse de la signature optique ; RL = Régression linéaire ; RnL = Régression non linéaire ; AFD = Analyse factorielle discriminante

Les autres caractéristiques des capteurs à prendre en compte sont :

- La précision de mesure du capteur ;
- Les limites de mesure du capteur ou l'étendue de mesure du capteur, à savoir les valeurs extrêmes pouvant être mesurées par le capteur ;
- La résolution, à savoir la plus petite variation de grandeur mesurable par le capteur ;
- Le temps de récupération entre 2 mesures qui conditionne la résolution temporelle des mesures (Capelli et al. 2014)
- La fréquence de calibrage ;
- Le coût ;
- La répétabilité des signaux fournis par les capteurs ;
- Le contexte d'application. Certains capteurs seront ainsi plus à même d'être utilisés dans un environnement extérieur, du fait de leur robustesse et leur sensibilité. D'autres au contraire, auront besoin d'une sensibilité forte, comme c'est le cas généralement des capteurs utilisés dans le secteur médical. Les MEMS seront privilégiés lorsque que le besoin de miniaturisation et le faible coût économique des capteurs sont recherchés.

Le tableau 6 résume les principales caractéristiques des capteurs les plus souvent intégrés dans des nez électroniques.

Famille de capteurs Principales caractéristiques	Semi-conducteurs	Piézoélectrique	Électrochimique	PID
Sensibilité	++	+++	+	++
Précisions	+	++	+	++
Sélectivité	-	-	+	-
Temps de réponse	+++	+	--	+
Robustesse	++	-	-	--
Coût	++	-	+	-
Intégrabilité dans un système portable	++	+	-	++

Tableau 6 : Comparaison des différents capteurs intégrés dans des nez électroniques (d'après Menini 2012)

+++ : Très bonne, ++ : Bonne, + : Assez bonne, - : Assez faible, -- : Faible, --- : Très Faible

3.2 L'intégration du signal issu des capteurs

Cette seconde étape consiste à intégrer et filtrer les signaux émis par les capteurs (signaux de sortie) et à en extraire les principales caractéristiques (valeurs moyennes, valeurs au pic après stabilisation, valeurs efficaces). La sélection des valeurs retenues à ce stade conditionne l'efficacité et la précision de l'étape suivante (Jia et al. 2018).

Le circuit de conditionnement du signal optimise les caractéristiques du signal de sortie du capteur. Une conversion analogique/numérique du signal est également faite afin de permettre l'exploitation de la mesure par le système d'analyse des données.

Amplification du signal

Les signaux émis par les capteurs sont parfois de très faible amplitude et nécessitent une étape d'amplification. Les amplificateurs permettent d'augmenter le niveau du signal d'entrée pour correspondre à la plage du convertisseur analogique-numérique, augmentant ainsi la résolution et la sensibilité de la mesure.

L'amplification, du signal électrique est un phénomène « bruyant ». En effet, elle dégrade le rapport signal sur bruit. Ainsi, si l'amplitude du signal issue des capteurs est augmentée, les bruits le sont aussi mais dans des proportions plus importantes. Il est donc primordial de pouvoir maîtriser ces paramètres.

Filtrage

Le filtrage peut avoir différents objectifs. Il peut en particulier être pratiqué afin de réduire le bruit. Ainsi un filtrage passe-bas éliminera le bruit haute fréquence et produira un effet de lissage utile.

Conversion du signal analogique en numérique

La conversion analogique/numérique consiste à transformer le signal analogique en un signal numérique adapté à son exploitation par une unité de traitement de données. La conversion analogique/numérique comporte deux étapes, l'échantillonnage et la conversion à proprement dire.

L'association capteur-intégration du signal détermine les caractéristiques du signal de sortie.

La chaîne d'acquisition doit être considérée dans son ensemble, ses caractéristiques sont déterminées de manière à répondre à l'application visée. Les divers dispositifs constituant la chaîne d'acquisition et sa structure doivent permettre le mesurage, le traitement et la restitution de la mesure avec les caractéristiques nécessaires à l'application : résolution, précision, rapidité et peu de bruits.

3.3 La reconnaissance de la signature globale

La reconnaissance de la signature globale d'une odeur fait appel à de nombreuses méthodes d'analyses de données. On peut citer notamment l'analyse en composante principale (ACP), la régression des moindres carrés partiels ou régression PLS, l'analyse discriminante linéaire (ADL), la méthode dite « *des k plus proches voisins* » (KNN) ou l'analyse discriminante fonctionnelle, le partitionnement de données ou encore les méthodes basées sur les réseaux de neurones artificiels ou la logique floue (Tableau 5, p41) (Loutfi et al. 2015; Jia et al. 2018).

Tous ces systèmes de reconnaissance sont basés sur le même principe : la mesure d'un échantillon donnée par n capteurs peut être représentée par un point dans un espace à n dimensions. La distance entre 2 échantillons est inversement proportionnelle à la distance entre les 2 points qui les représentent. En d'autres termes, 2 échantillons ayant la même odeur seront représentés par des points proches dans l'espace à n dimensions (Capelli et al. 2014).

La signature ou empreinte olfactive mesurée doit donc être confrontée à un jeu de données de référence qui peut être préexistant et/ou incrémenté en conditions réelles au fur et à mesure de l'usage du nez électronique lors d'une période dite d'apprentissage.

Cette étape de reconnaissance est un point sensible de la technologie du fait de la réponse non linéaire des capteurs, des phénomènes de dérive et de la nécessité d'apprentissage. Elle a une forte influence sur la sélectivité des appareils.

Plusieurs techniques d'apprentissage automatique ou *machine Learning*⁵ se sont révélées pertinentes dans le développement des nez électroniques et l'augmentation de leur sélectivité. La principale difficulté réside encore dans la conception d'algorithmes permettant la mise en œuvre de ces techniques sans avoir besoin de la supervision par un expert (Loutfi et al. 2015).

La sélectivité du nez électronique est un enjeu majeur qui se joue à différents niveaux :

- Lors de la phase de détection

La première sélection est dépendante de la nature du capteur. En effet, les capteurs dits biologiques ont, par exemple, une sélectivité plus importante que les capteurs chimiques. Cependant, ils ne sont pas aussi robustes, ont une durée de vie moins importante et sont plus coûteux que les capteurs chimiques.

- Lors du traitement du signal

Les capteurs chimiques (par exemple les MOS) ont une sélectivité relativement faible et sont très réactifs. Cependant, lors du traitement du signal, la sélectivité des capteurs chimiques peut être augmentée de façon très importante grâce à des méthodes algorithmiques complexes (réseaux de neurones, ACP, etc.).

Ainsi le choix de la méthode d'analyse des données est en partie lié au choix du réseau de capteur (nature et nombre des capteurs).

3.4 La calibration

Lors de la conception d'un nez électronique, une première calibration a lieu au laboratoire où le nez est confronté à des mélanges gazeux étalon, en conditions contrôlées. Les méthodes d'intégration du signal et d'analyse des données choisies peuvent être ajustées pour optimiser les résultats.

Une deuxième calibration a lieu sur le terrain. Il s'agit de soumettre après installation puis périodiquement les appareils installés à des mélanges de gaz polluants préparés au préalable et connus avec précision. Les résultats fournis donnent lieu à de nouveaux ajustements permettant d'optimiser les performances des appareils.

La calibration périodique des appareils permet de prendre en compte les variations de température et d'humidité, qui peuvent générer des variations de réponses considérables. La calibration permet aussi de lutter contre les phénomènes de vieillissement des capteurs et de corriger les résultats par des algorithmes adaptés voire de procéder au remplacement individuel des capteurs lorsque cela est

⁵ Science moderne permettant de découvrir des patterns et d'effectuer des prédictions à partir de données en se basant sur des statistiques, sur du forage de données, sur la reconnaissance de brevets et sur les analyses prédictives (<https://www.lebigdata.fr/machine-learning-et-big-data>)

nécessaire (Wilson 2012). Le vieillissement des capteurs MOS est dû à des modifications structurelles (taille et forme) des grains d'oxydes métalliques, la séparation des oxydes métalliques des additifs avec lesquels ils sont associés ou encore la liaison de molécules « poison » (i.e. azote, phosphore, soufre) avec les oxydes métalliques. Toutes ces modifications peuvent apparaître au fil des utilisations et nuisent à la conductivité et aux propriétés catalytiques des oxydes métalliques. Le vieillissement des polymères conducteurs est lié à leur dépolymérisation et leur oxydation, ce qui nuit également à leur conductivité (Rudnitskaya 2018).

Les nez électroniques se distinguent aussi des appareils de mesure classiques pour leur calibration. En effet, si la calibration d'un nez électronique par un gaz étalon (par exemple l'ammoniac) est possible, sa calibration par un mélange gazeux est « une tâche sans fin » compte tenu du fait que, par définition, chaque capteur donne une réponse individuelle et que la réponse globale d'un réseau de capteurs non spécifiques à un mélange gazeux complexe est une des combinaisons possibles de ces réponses individuelles (Boeker 2014; Rudnitskaya 2018).

Plusieurs méthodes peuvent néanmoins être employées pour calibrer un nez électronique parmi lesquelles on peut citer :

- des méthodes de compensation de la dérive dont le principe repose sur le fait que tous les capteurs réagissent de manière identique au vieillissement. Ces méthodes font appel à des modèles basés sur des méthodes d'analyses de données classiques (ACP ou PLS) ;
- des méthodes de compensation de la dérive basées sur l'analyse en composantes indépendantes (ACI) qui permet de mieux prendre en compte la part des résultats liée à la dérive de ce qui doit être conservé.

Malheureusement ce genre de méthode est chronophage, coûteuse et nécessite une main d'œuvre qualifiée et de nombreux échantillons standard, qui ne sont pas toujours disponibles. D'autres méthodes de calibration multivariée ont été développées :

- Les méthodes de standardisation des données. Elles sont basées sur le calcul de la relation entre les résultats obtenus par un appareil sur une série d'échantillons étalon, soumis à 2 conditions expérimentales différentes. Cette relation est ensuite utilisée pour corriger les mesures obtenues dans d'autres conditions expérimentales. Ces méthodes diffèrent selon le mode de calcul de la relation entre les 2 jeux de données mais présentent toutes le gros avantage de nécessiter moins d'échantillon étalon.
- Les méthodes d'expansion du modèle ou de correction adaptative de la dérive prévoient d'incrémenter le jeu de données de calibration initial par les données obtenues lors de l'utilisation de l'appareil en routine et ainsi de faire évoluer le modèle initial.
- Les modèles globaux intègrent directement les sources de variations des résultats dans l'algorithme de calibration initial.

Actuellement, seules les méthodes de compensation de la dérive et les méthodes de standardisation des données sont couramment mises en œuvre (Rudnitskaya 2018). L'optimisation du matériel (i.e. le maintien constant de la température) ainsi que l'amélioration et le développement des méthodes de

calibration et de lutte contre les interférences constituent un domaine de recherche très dynamique dont l'objectif est d'améliorer la fiabilité et les performances des nez électroniques (Liang et al. 2018).

3.5 La phase d'apprentissage

Si le nez électronique n'est utilisé que pour détecter des modifications significatives du mélange gazeux environnant, cette étape n'est pas indispensable. En revanche, elle est indissociable de la conception d'un nez électronique si on souhaite que celui-ci procède à l'identification d'odeurs.

Cette période d'apprentissage peut démarrer au laboratoire sur un jeu d'entraînement le plus proche possible des conditions de terrain mais c'est en condition réelle qu'elle doit ensuite être poursuivie pendant un temps et à une fréquence qui dépendent de la variabilité des conditions environnementales et des mélanges gazeux à analyser. Afin d'optimiser la phase d'apprentissage, une stratégie multiparamétrique peut être adoptée : une fois l'appareil installé, un premier échantillon est prélevé et analysé par olfactométrie dynamique et une première régression (régression par les moindres carrés partiels, PLS) est obtenue. Ensuite, à chaque fois que la nature de la source change (par exemple de soufrée à aminée), un nouveau prélèvement est effectué de façon automatique par un échantillonneur sur site et analysé. Petit à petit on construit ainsi un modèle de PLS multiparamétrique qui couvre les différentes natures que peut prendre l'odeur. Cette méthode permet d'automatiser et de raccourcir la période d'apprentissage mais surtout d'améliorer la fiabilité des résultats (Mr Mifsud, RUBIX, comm. pers.).

En pratique, la phase d'apprentissage est parfois limitée à quelques échantillons car elle est chronophage et coûteuse. Or, il est évident que la complétude de la base de données de référence impacte fortement la précision et la fiabilité de la classification de la signature olfactive et *in fine* le résultat.

Cette phase d'apprentissage, et plus particulièrement l'analyse olfactométrique est aussi l'occasion de mesurer la concentration d'odeur et de calibrer l'intensité du signal avec la mesure obtenue afin de fournir des résultats en UO_E/m^3 .

Les phases de calibration et d'apprentissage font que les nez électroniques sont des appareils dont les performances sont évolutives, ce qui, d'une part, les rend difficilement compatibles avec un système qualité qui impose que les caractéristiques techniques soient fixées (Cipriano 2018) et d'autre part, nécessite une maintenance régulière et réalisée par du personnel qualifié.

SYNTHESE DE LA PARTIE 3

Principes technologiques d'un nez électronique

Le nez électronique est composé de trois blocs technologiques majeurs, que l'on peut décrire au travers d'une analogie avec le système d'olfaction humain :

- Un réseau de capteurs correspondant aux récepteurs olfactifs
- Un bloc d'intégration du signal correspondant au bulbe olfactif
- Un bloc de traitement du signal correspondant au cerveau

Chacun de ces blocs est critique pour que le dispositif soit performant.

Réseau de capteurs

Un capteur transforme une grandeur physique en une grandeur normée, généralement électrique, qui peut être interprétée par un dispositif. Il se caractérise par différents critères critiques pour le choix du nez électronique tels que la sensibilité, la sélectivité ou encore le prix. Parmi ceux-ci, les principaux utilisés sont les capteurs à oxydes métalliques, du fait de leur bonne sélectivité, de leur robustesse ou encore de leur prix relativement abordable.

Intégration du signal

L'intégration du signal est une étape cruciale au bon traitement de données, qui a pour étapes l'amplification du signal, le filtrage du signal ou encore la conversion du signal numérique en signal analogique.

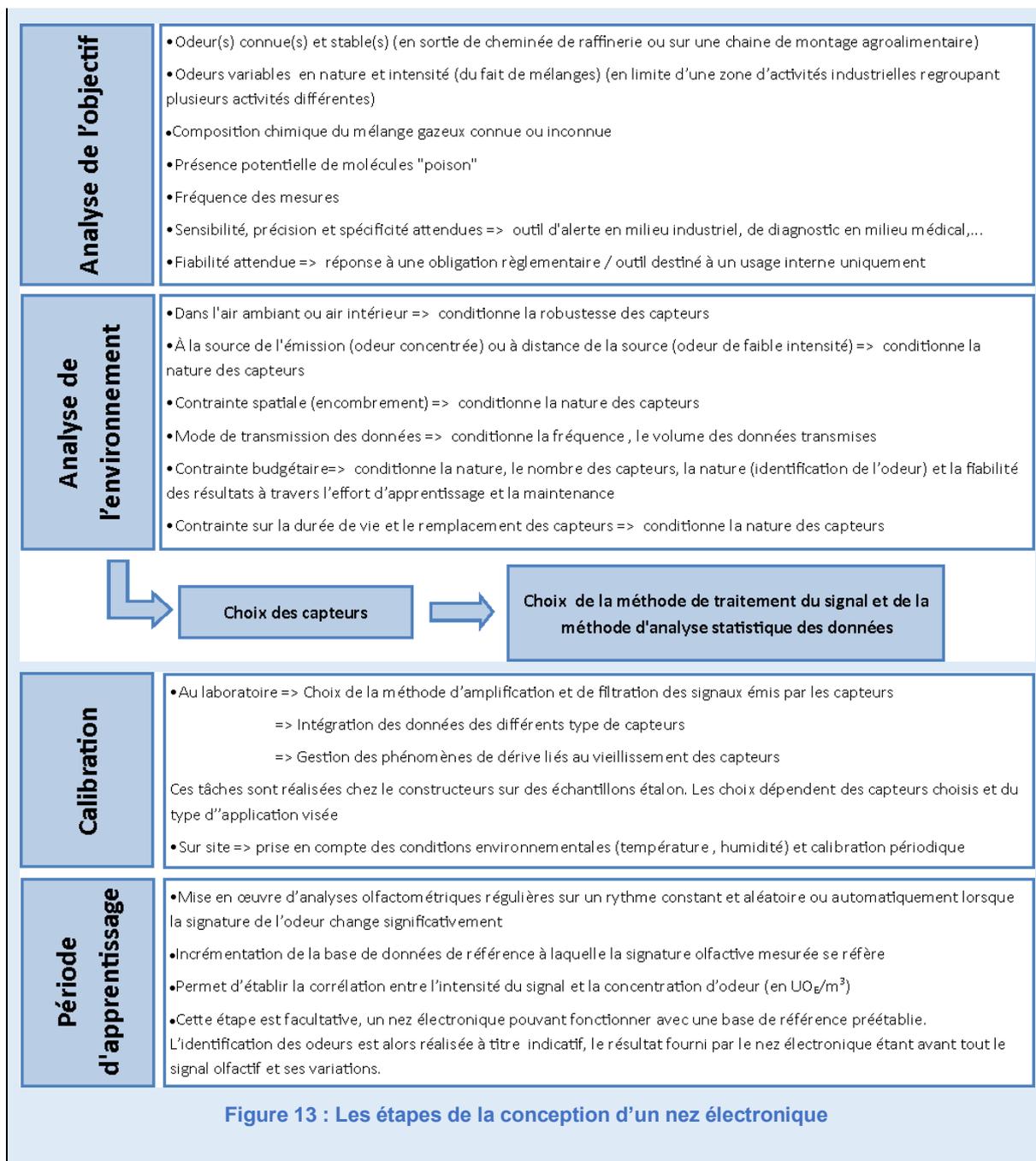
Traitement du signal

L'étape de traitement du signal vise à analyser le signal par comparaison à une base de données. Les méthodes d'analyse statistique sont nombreuses (analyse factorielle discriminante, analyse en composante principale...).

L'émergence de l'intelligence artificielle devrait mener à une amélioration importante des performances de cette étape.

Compte-tenu de la relation « flou » entre l'objet de l'analyse (un mélange gazeux) et le résultat fourni (l'empreinte olfactive), les étapes de **calibration** et d'**apprentissage** peuvent être considérées comme inhérentes à la conception d'un nez électronique (Boeker 2014).

La figure 13 ci-dessous schématise les étapes de conception d'un nez électronique et les principaux critères de choix des différents composants et méthodes qui y sont intégrés.



4 Dynamique de la recherche

4.1 Analyse bibliométrique

Les résultats affichés ci-dessous proviennent d'une analyse bibliométrique des données issues d'une recherche comprenant les mots clés « *electronic nose(s)* » sur Web of science, sur la période 2008-2019. Les résultats affichés sur cette base de données scientifique sont similaires à ceux obtenus à la suite d'une recherche sur SCOPUS.

4.1.1 Essor de la recherche depuis 1991

Une rapide analyse bibliométrique nous permet d'observer l'essor de la recherche sur les nez électroniques depuis les années 1990. Bien qu'apparue dès 1960, la recherche sur le sujet s'est accélérée depuis une vingtaine d'années, et continue sa progression, démontrant ainsi l'intérêt que porte la communauté scientifique vis-à-vis des nez électroniques (Figure 14).

L'essor de la recherche n'a démarré qu'au début des années 1990. Un événement fondateur de cette accélération de publication est un *workshop* organisé par l'Organisation du Traité de l'Atlantique Nord rassemblant les pionniers de la recherche sur les nez électroniques, en août 1991 à Reykjavik, et qui a suscité un intérêt certain pour ce domaine.

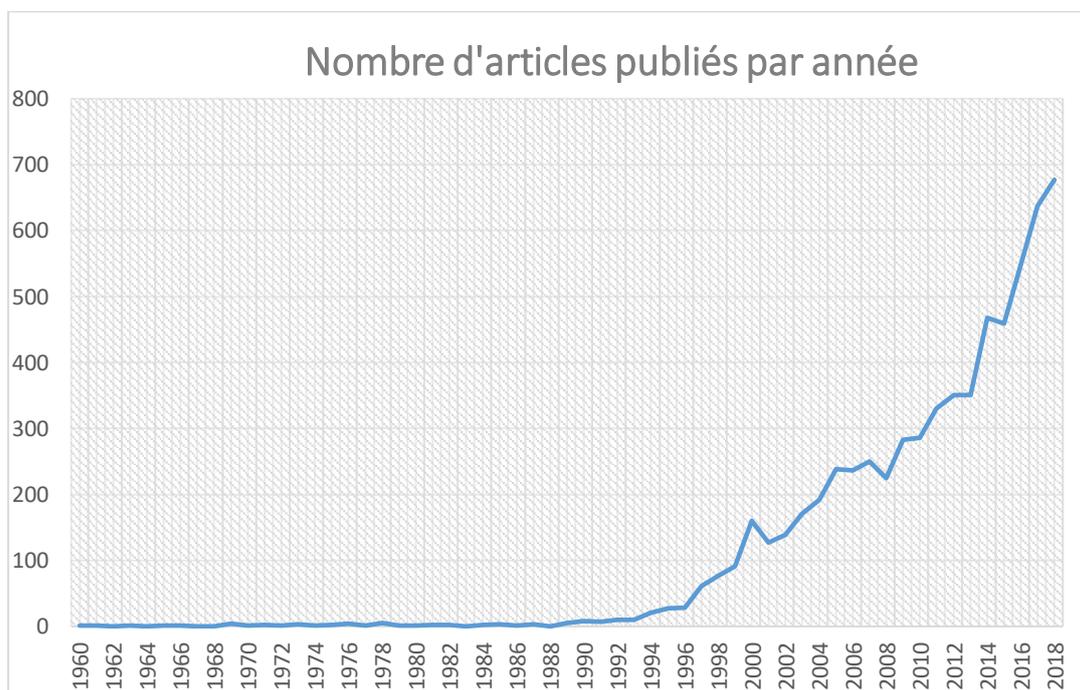


Figure 14 : Nombre d'articles publiés chaque depuis 1960 et répondant au mot clé « *electronic nose(s)* »
(Source : Web of science)

4.1.2 Secteur d'applications concernés

La figure 15 illustre les 10 catégories, définies par le moteur de recherche, les mieux représentées selon le nombre d'articles issus de notre recherche. On note que les articles concernent en premier lieu les technologies relatives à l'industrie agroalimentaire, puis différents domaines technologiques (instrumentation, chimie, électronique, physique, intelligence artificielle) et ensuite le domaine médical. Les articles concernant les domaines de l'agriculture, l'agronomie et l'environnement sont nettement moins nombreux (respectivement 23, 12 et 12/606).

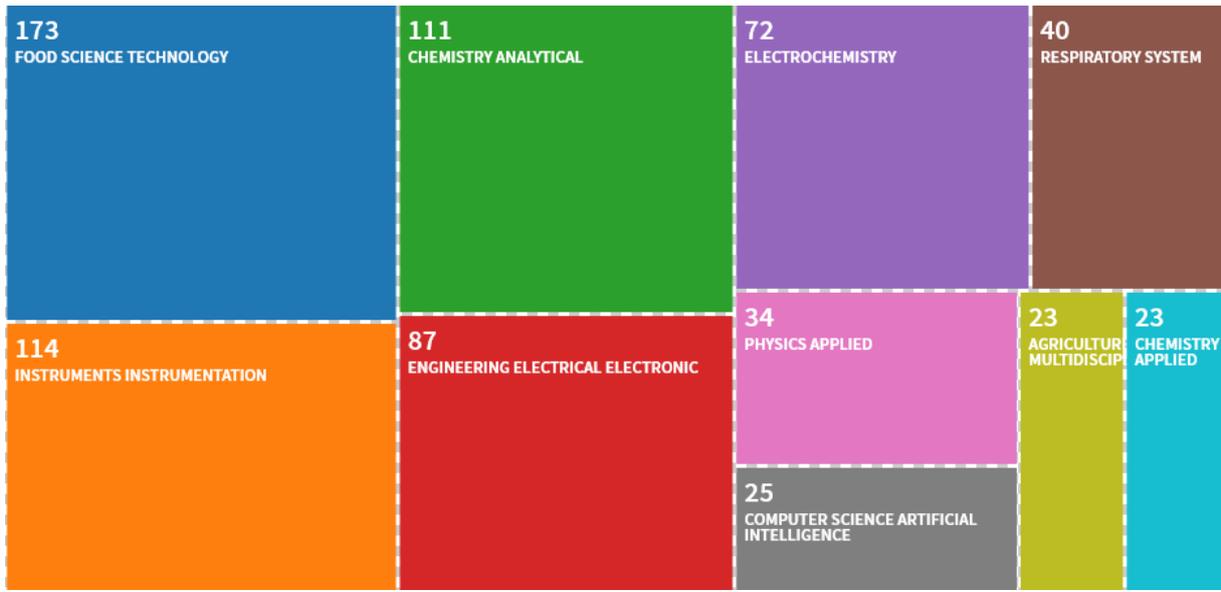


Figure 15 : Répartition des articles traitant des « *Electronic nose(s)* » identifiés par Web of science au sein des 10 catégories les mieux représentées

4.1.3 Pays moteurs

D'après notre recherche, les pays produisant le plus de publications scientifiques sont la Chine, les États-Unis, l'Italie et le Royaume-Uni (Figure 16). Le classement reste le même si l'on considère le nombre de publications depuis 1960. Aucun pays n'a donc renoncé à la recherche dans ce domaine.

La Chine et les États-Unis sont régulièrement les pays les plus représentés dans le nombre de publications de recherche, à l'inverse le cas de l'Italie et du Royaume-Uni peut étonner. L'Italie est active dans ce domaine essentiellement grâce à l'université de Rome (nous présenterons ci-après une équipe de cette université). La position du Royaume-Uni s'explique pour des raisons historiques. En effet, c'est à l'université de Warwick que le concept de nez électronique est apparu durant les années 1980.

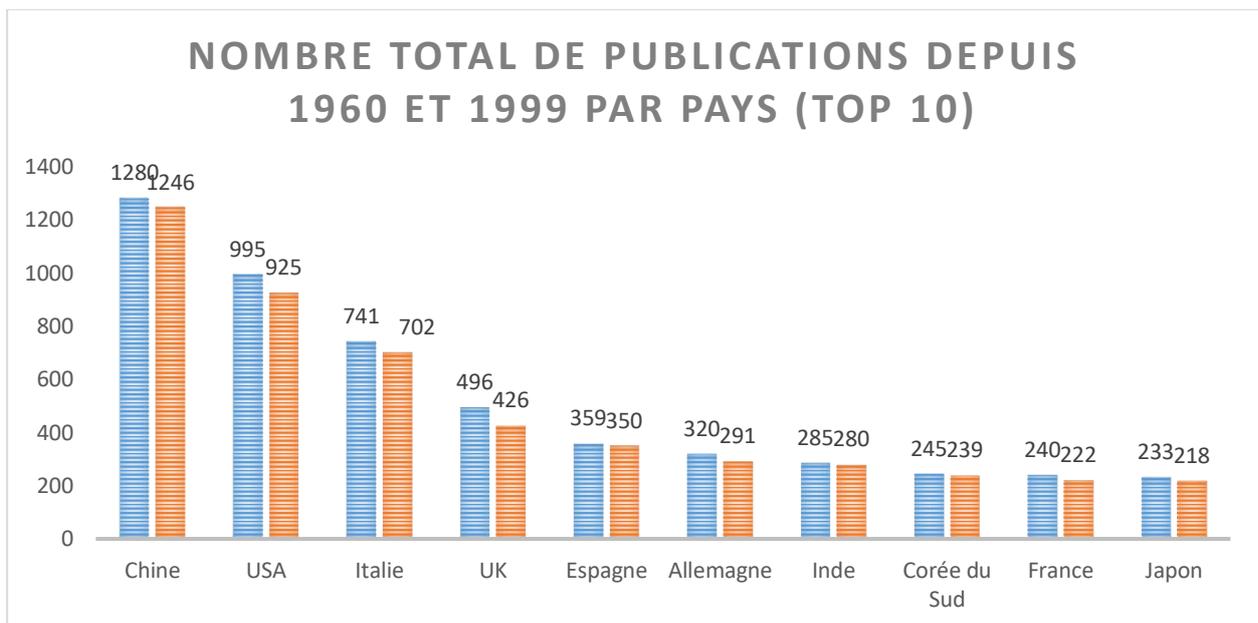


Figure 16 : Répartition des articles publiés par les 10 pays les plus productifs
(source Web of science)

4.2 Focus sur quelques équipes de recherche et exemples de projets de recherche collaboratifs

4.2.1 Équipes de recherche

Ce paragraphe s'attachera à décrire quelques équipes et laboratoires moteurs de la recherche relative aux nez électroniques. Ils sont représentatifs des projets de recherche menés à travers le monde, et représentent la diversité de projets menés dans ce domaine.

4.2.1.1 Dans le monde

<p>Département de Chimie et de Biologie</p> <p>Université de Séoul</p> <p>Pr. Tai Hyun Park</p>	
<p>Cette équipe de recherche a mis au point un nez électronique avec pour objectif la détection précoce du cancer. Son nez électronique utilise des récepteurs olfactifs du corps humain, ce qui en <i>fait de facto</i> un nez « bio-électronique ».</p> <p>Le Professeur Park et ses collaborateurs ont découvert une protéine odorante qui se combine avec l'heptanal, une substance que l'on ne trouve que chez les patients atteints d'un cancer du poumon, et l'a fixée à un nanotube de carbone. En utilisant une technologie similaire, le Professeur Park a déjà développé une langue bioélectronique.</p> <p>Le groupe de recherche utilise des protéines de récepteurs olfactifs humains et des protéines de récepteurs du goût, qui sont un type de récepteur couplé à la protéine G (GPCR), pour la détection de biomarqueurs de pathologies. Lorsque les protéines du récepteur lient des substances odorantes et gustatives spécifiques, le transducteur de signal les convertit en signaux électriques. Une production en masse de ces protéines réceptrices est en cours pour les associer à des nanocapteurs.</p>	

**Laboratoire pour les dispositifs à base de
nanomatériaux**

Technion

Haifa – Israël

Hossam Haick



Le laboratoire LNBD est un laboratoire de recherche multidisciplinaire situé au sein du Technion d'Haifa en Israël qui travaille sur les dispositifs à base de nanomatériaux. Différentes équipes de recherche développent de nouveaux capteurs innovants, tels que des nanocapteurs, de nouveaux semi-conducteurs, etc. Les applications visées par ces développements sont nombreuses, et comprennent l'intégration de ces capteurs dans des nez électroniques.

L'un des projets majeurs développé au sein de ce laboratoire est le NA-NOSE, un nez électronique qui consisterait en une série de nanocapteurs ayant pour but de détecter différents biomarqueurs dans l'haleine de patients, afin de diagnostiquer les cancers du poumon, colorectaux ou encore du sein.

Ce NA-NOSE permettrait par ailleurs d'identifier les groupes à risques de développement de maladies spécifiques, et ainsi d'éviter des traitements invasifs, lourds et coûteux. Testé sur un groupe de 53 volontaires, le NA-NOSE a présenté des résultats très prometteurs. (Pajot-Augy, 2019)



Figure 17 - Le NA-NOSE

4.2.1.2 En Europe

<p>Groupe Capteurs</p> <p>Université de Rome</p> <p>Via del Politecnico; 00133 Rome; Italie</p> <p>Pr. Di Natale</p>	
<p>Le groupe capteurs de l'Université de Rome Tor Vergata, associe les départements du génie électronique et des sciences et technologies chimiques, qui ont pour mission principale d'étudier et de développer des capteurs innovants ainsi que des systèmes de capteurs prêts à être utilisés.</p> <p>Des réseaux de capteurs <i>quartz microbalance</i> de métalloporphyrines sont développés au sein de cette Université depuis 1994. Leur première application était dédiée à l'étude de la fraîcheur des poissons. Les versions récentes du nez électronique de Rome Tor vergata comprennent un instrument portable alimenté par une batterie et un prototype spécial optimisé pour fonctionner en condition de microgravité, visant à mesurer la qualité de l'air dans le secteur spatial. L'instrument, nommé le Libranose, a été testé avec succès en 2005 et 2011 à bord de la station spatiale internationale.</p> <p>Au fil des années, les nez électroniques développés au sein de cette Université ont été appliqués à de nombreux secteurs, tels que la récolte du fruit dans des conditions optimales et la détection du cancer du poumon à travers l'analyse de l'haleine.</p>	

**Laboratoire de microcapteurs et de
biocapteurs**

Université de Warwick

Angleterre, Coventry CV4 7AL,

Pr. Gardner



Au sein de l'université de Warwick, une équipe de recherche a développé, au début des années 1990, le premier nez électronique commercial (collaboration avec Bass et Neotronics). Il comprenait un ensemble de capteurs MOS couplés à des algorithmes de prétraitement du signal ; ce dernier étant traité par différentes analyses statistiques mettant en œuvre le principe de la reconnaissance de formes.

Le Pr. Gardner, pionnier de la recherche sur les nez électroniques, est aujourd'hui à la tête du Laboratoire de microcapteurs et de biocapteurs de l'Université. Ce laboratoire continue à faire progresser la recherche et le développement de nez électroniques pour une vaste gamme d'applications commerciales.

Ce laboratoire de recherche est composé de près de 15 membres qui travaillent sur les thématiques suivantes :

- Le diagnostic infection ORL *via* un nez électrique ;
- La modélisation dynamique de nez électroniques ;
- Les langues électroniques ;
- Les capteurs de gaz ;
- Les capteurs MOS.

4.2.1.3 En France

<p>Equipe microcapteurs instrumentation (MCI)</p> <p>Institut Matériaux Microélectronique et Nanosciences de Provence (IM2NP, CNRS/ Aix-Marseille Université, Université de Toulon)</p> <p>Campus de Saint Jérôme - Case 142</p> <p>Avenue Escadrille Normandie Niemen - Marseille</p>	
<p>L'équipe microcapteurs et instrumentation (MCI) de l'IM2NP a axé sa politique de recherche autour de trois thématiques :</p> <ol style="list-style-type: none">1. Microsystèmes pour l'environnement et le bâtiment <p>Les travaux de cette thématique portent sur le développement de micro-capteurs, nomades, sélectifs, sensibles et fiables pour le suivi de la qualité de l'air extérieur et intérieur. Plus précisément, les études menées concernent la recherche de nouveaux matériaux sensibles en couches minces, la réalisation des microcapteurs, les tests de validations en présence de gaz ou de mélanges de gaz sous environnement contrôlé (température, humidité) ainsi que la modélisation des phénomènes d'adsorption. Cette activité se déroule en étroite collaboration avec de nombreux partenaires industriels et académiques.</p> <ol style="list-style-type: none">2. Microsystèmes thermiques pour le nucléaire <p>Cette thématique porte sur la conception de microsysteme thermique pour le nucléaire, « <i>plus précisément sur des capteurs calorimétriques dédiés à la mesure en ligne de l'énergie déposée par interactions rayonnements/matières</i> ».</p> <ol style="list-style-type: none">3. Microsystèmes pour la santé <p>Cette dernière thématique est en plein essor et correspond à la conception de microsystèmes dédiés à la santé en privilégiant les méthodes non invasives pour surveiller, mesurer en continu, pré-diagnostiquer et alerter (exemples de paramètres biomédicaux : température corporelle, pulsations cardiaques).</p> <p>Au sein de cette équipe, Nicolas Morati a développé un nez électronique spécialisé dans la détection de différents polluants atmosphériques avec pour objectif d'être véritablement utilisé dans le cadre d'une collaboration avec une entreprise qui commercialise des systèmes de suivi de la qualité de l'air.</p> <p>(source : https://www.im2np.fr/mci)</p>	

**EXHALOMICS/ PLATEFORME D'ANALYSE
DE L'AIR EXPIRÉ**

Université Paris Saclay

40, rue Worth

Service de pneumologie Hôpital Foch

92150 SURESNES

université
PARIS-SACLAY

Au sein du service de pneumologie de l'Hôpital Foch, des nez électroniques sont utilisés pour des essais cliniques dans deux cas d'application.

1. Cancer poumon opérable

Les cancers du poumon opérable posent un problème bien documenté : il est courant qu'il y ait un problème de récurrence, bien que la tumeur initiale soit enlevée. Dans ce cas d'application, les nez électroniques seraient utilisés pour un suivi au cours du temps des signaux mesurables de récurrence dans l'air expiré.

2. Cancer du poumon non-opérable

Les thérapies ciblées sont plus efficaces que la chimiothérapie face aux cancers du poumon non-opérable. Cependant, un délai de 3 à 6 mois est nécessaire pour savoir si le patient répond ou non au traitement. Le nez électronique serait utilisé pour observer les variations de biomarqueurs émis par la tumeur et ainsi déterminer si le traitement est efficace ou non bien avant ce délai de 3 à 6 mois.

Les nez électroniques testés au sein de ce service sont : le Cyranose de Sensigent, le Libranose de l'Université de Rome.

4.2.2 Exemples de projets européens

Nous avons mené une analyse sur CORDIS (*COmmunity Research and Development Information Service*), un service d'information permettant d'accéder aux différents projets de recherche et de développement promus par l'Union Européenne. Nous avons identifié 13 projets de recherche intégrant des travaux sur des nez électroniques, ces derniers mobilisant près de 80 acteurs. Nous présentons ci-dessous 3 projets européens, particulièrement illustratifs des possibilités de collaboration au sein de programmes de recherche relatifs à des secteurs d'applications différents.

PROJET NANO-ZONICS (2016 – 2021)
<p>Acteurs du projet : Institut de Biologie Structurale de Grenoble (IBS, CEA/ CNRS/ Université Grenoble Alpes), Université de Séoul (Département vu précédemment)</p> <p>Ce projet nommé NANO-ZONIC a pour objectif de développer un biocapteur innovant pour la détection non-invasive et en temps réel de biomarqueurs dans l'haleine de patients. Ces biomarqueurs volatils ont été identifiés dans de nombreuses maladies telles que certains cancers, le diabète, la fibrose kystique et la neurodégénérescence.</p> <p>Un système miniaturisé permettant une analyse rapide et simple de l'haleine a montré sa capacité à améliorer le diagnostic précoce de ces pathologies. Il permettrait également de surveiller les patients sur le lieu de traitement, dans des établissements médicaux ou à domicile. Différents nez électroniques dans le secteur médical sont en cours de développement, mais leur manque de polyvalence nuit à leur généralisation dans des dispositifs de diagnostics médicaux fiables.</p> <p>Le principal défi consiste à détecter de manière quantitative et simultanée plusieurs biomarqueurs volatils présentant une spécificité et une sélectivité élevées. La technologie idéale serait une technologie imitant les systèmes olfactifs naturels qui reconnaissent les odeurs par une analyse combinatoire des réponses des récepteurs.</p> <p>Inspiré par cet exemple biologique, ce projet vise à intégrer les récepteurs olfactifs biologiques dans deux technologies de pointe : les récepteurs couplés à des canaux ioniques (ICCR) et les transistors à effet de champ à nanotubes de carbone à paroi unique (swCNT-FET). Les ICCR sont des biocapteurs originaux créés par la fusion de récepteurs membranaires couplés à la protéine G (GPCR) avec un canal ionique. La reconnaissance d'un composé chimique par le GPCR est transduite en un signal électrique par le canal ionique. L'objectif de ce projet d'une durée de cinq ans est de mettre au point une bibliothèque originale d'ICCR olfactifs pour la détection multiplexe de biomarqueurs volatils. Pour détecter le signal électrique avec une très grande sensibilité et à l'échelle nanométrique, les ICCR seront interfacés avec des transistors à effet de champ utilisant des nanotubes de carbone simple paroi (swCNT-FET) en recouvrant ces derniers par des nano-vésicules contenant de l'ICCR. La détection récente d'un biomarqueur avec un dispositif ICCR-swCNT-FET par les membres du projet démontre la faisabilité de cette approche.</p>

PROJET OMNISCIENTIS

(Octobre 2012 – octobre 2014)

Acteurs du projet : Spacebel S.A.(coordinateur), Odometric (5.1.2), KTT IMA SARL, Université de Liège, Burgo Ardenne S.A, Centre de Recherches Public Henry Tudor, APS Technology, Inter-environnement Wallonie ASBL

Ce projet avait pour objectif de développer des outils de suivi des émissions d'odeur. Afin de répondre à cet objectif, deux études ont été menées, une en Autriche dans une porcherie et une en Belgique dans une usine de papeterie. Jusqu'à présent, afin de connaître les nuisances occasionnées par diverses activités, des enquêtes étaient régulièrement menées afin de collecter des données. Ces collectes ont lieu en deux étapes : manuellement grâce à des données fournies par la population et par des nez électroniques.

Le projet OMNISCIENTIS visait à utiliser les technologies de l'information comme support à l'innovation dans le cadre de la collecte et du traitement de données. Ce projet a documenté les spécifications idéales pour la mesure des odeurs, la modélisation de la dispersion des odeurs (voir 5.4.6) et les technologies de l'information. Parallèlement, les besoins et les attentes des citoyens, des autorités de régulation et des industriels ont été pris en compte. Les citoyens ont fourni des informations sur les niveaux d'acceptabilité des odeurs *via* leurs smartphones. Plus de 5 000 réponses ont été recueillies et ces informations ont été combinées avec les mesures de modèles de nez électroniques et de dispersion des odeurs. Deux capteurs de nez électroniques *in situ* et une station météorologique ont été installés à titre de pilote sur un site industriel en Belgique. Dix-huit paramètres industriels ont été collectés en temps réel et 15 enquêtes de terrain sur les odeurs ont été menées pour comprendre les sources et les caractéristiques des odeurs. Sur la base de ces données, les membres du projet ont développé un prototype de système d'information sur les odeurs qui produit des statistiques et des niveaux d'impact (cartographie des nuisances olfactives) pour les autorités locales et permet aux citoyens de donner leur avis. L'application mobile est maintenant opérationnelle et utilisée par une vingtaine de gardiens sur le site de test belge. Les chercheurs ont adapté un modèle de dispersion de polluants existant pour développer un système de modélisation de la dispersion des odeurs rapide utilisant des données d'émissions météorologiques et industrielles en temps réel. Le modèle a été validé avec les taux d'émission d'odeurs, ainsi que des observations électroniques et citoyennes.

PROJET BOND

(2009 – 2012)

Acteurs du projet : Unité Neurobiologie de l'Olfaction - INRA, Université Lyon 1, AGENCIA ESTATAL Université du Salento, Ecole Polytechnique de Milan, L'Université de Crok, Biologic science instruments ltd.

Ce projet, mené entre 2009 et 2012, avait pour objectif de développer des nano-biocapteurs basés sur des récepteurs olfactifs, pour la détection d'odeurs. L'enjeu était d'avoir des capteurs d'une sensibilité extrêmement élevée, une répétabilité maximale, une grande spécificité, un temps de réponse ultra-rapide, afin de pouvoir être implantés dans un système portatif, d'être faciles d'utilisation et peu chers.

Le projet BOND se base sur les propriétés du nez de mammifères. L'un des objectifs de ce projet était de remplacer les éléments de détection physiques ou chimiques utilisés actuellement dans les nez électroniques par des récepteurs olfactifs, qui fourniront une nouvelle technologie capable de surmonter les faiblesses existantes, ce qui conduira à une nouvelle génération de dispositifs à nez bioélectronique.

Les acteurs du projet ont commencé par développer et intégrer les principaux composants et technologies du nouveau système analytique bioélectronique, puis assemblé le premier prototype. Ensuite, ils ont conduit les premiers tests du prototype pour valider la nouvelle technologie en vue d'une utilisation dans le suivi de la qualité des aliments. Le projet a réussi à concevoir et fabriquer un nanobiocapteur, capable de surveiller la présence d'odeurs données et d'en mesurer la concentration.

SYNTHESE DE LA PARTIE 4

Dynamique de la recherche

La recherche sur les nez électroniques est en pleine expansion depuis le début des années 1990. Cet essor que l'on peut dater de la conférence de 1991 à Helsinki n'a cessé de croître. Les secteurs où la recherche est active sont variés et vont des technologies agro-alimentaires, à la santé, en passant par des questions purement technologiques.

Certaines équipes de recherches sont motrices pour la recherche dans ce domaine. Nous avons décidé de présenter cinq laboratoires ou équipes de recherche qui font partis de cette catégorie

- Groupe capteurs de l'Université de Rome ;
- Laboratoire de micro-capteurs de l'Université de Warwick ;
- L'équipe du Pr. Tai Hyun Park de l'Université de Séoul ;
- L'équipe micro-capteurs et instrumentation de l'Institut des Matériaux, de Micro-électronique et des Nanosciences de Provence (IM2NP, CNRS/ Aix-Marseille Université, Université de Toulon) ;
- EXHALOMICS, une équipe menant des essais cliniques au service de pneumologie de l'Hôpital FOCH.

Par ailleurs, des projets de recherche collaboratifs ont été menés, et ont abouti à des résultats très intéressants (BOND, OMNISCIENTIS), ou sont toujours en cours comme le projet NANOZ-ONICS coordonné par le CNRS.

Ces équipes et projets aboutiront peut-être à des innovations de rupture sur le marché des nez électroniques.

5 Marché des nez électroniques

5.1 Organisation de la filière

Le marché des nez électronique est gouverné par cinq types d'acteurs principaux : les laboratoires de recherche publics et privés qui conçoivent les technologies, les start-up et entreprises qui industrialisent les produits, les bureaux d'étude, les organismes inter-professionnels qui peuvent conduire des études R&D et les utilisateurs (Figures 18 et 19).

On peut observer que deux modèles économiques se font face : le modèle basé sur la vente de produits, et le modèle basé sur la vente d'un service. Les nez électroniques nécessitant d'être adaptés à chaque contexte, et à chaque situation, la prestation de service semble être un modèle plus prometteur pour l'utilisation des nez électroniques. Par ailleurs, et comme nous le verrons plus tard, les nez électroniques ne sont pas des outils que l'on peut utiliser efficacement seuls : ils doivent être intégrés dans un processus et une méthodologie globale de gestion des odeurs.

5.1.1 Les concepteurs de nez électroniques

Les concepteurs de nez électroniques sont nombreux et la concurrence importante. Cependant, ces dernières années, la tendance tend à transformer une activité purement orientée « vente de produits », en une activité basée sur des prestations de service jugé plus efficaces.

Par ailleurs, les marchés initialement importants qu'étaient la surveillance des émissions d'odeurs ou à la limite de site industriels, sont aujourd'hui moins ciblés. En effet, l'utilisation de nez électroniques dans ce type de contexte nécessite un accompagnement important pour la mise en place, la maintenance et l'utilisation du nez électronique. Par conséquent, les industriels et les autorités publiques confrontés à des problèmes d'odeur dans un contexte environnemental ont, désormais, tendance à privilégier les bureaux d'étude ou des méthodes et technologies plus fiables pour évaluer les émissions d'odeurs. D'autres marchés sont désormais privilégiés, et certains concepteurs ont axé leurs politiques de développement autour d'applications relatives au secteur médical et agro-alimentaire.

Les trajectoires d'Odometric et Alpha MOS, anciens leaders du marché des nez électroniques, sont particulièrement illustratives de la transformation de ce marché (cf fiches p66 et 67).

Les noms des entreprises impliquées dans la conception et la commercialisation de nez électroniques, ainsi que les noms des produits qu'elles ont développés sont fournis en annexe V.



LABORATOIRE DE RECHERCHE

- Publics travaillant dans tous les domaines technologiques relatifs aux nez électroniques
- Privés travaillant à l'amélioration ou au développement de nouvelles technologies

START-UP/ENTREPRISE

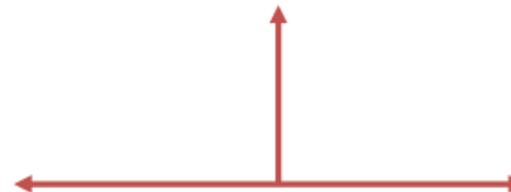
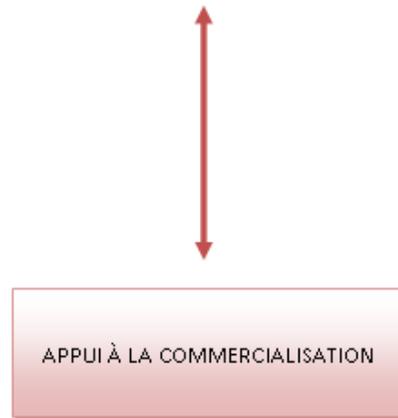
- Spin-off d'un laboratoire de recherche travaillant à l'industrialisation d'un produit de recherche
- Entreprise commercialisant des instruments de mesure des odeurs

ORGANISMES POUVANT PROPOSER/
RECOMMANDER L'USAGE DE NEZ
ÉLECTRONIQUES DANS LE CADRE DE LEUR
PRESTATIONS

- Bureaux d'étude spécialisés dans la métrologie et la gestion de la qualité de l'air et ou des odeurs
- Entreprise multinationale ayant développé une expertise et une activité de prestation de service dans le domaine de la gestion des odeurs

UTILISATEURS FINAUX (ACTUELS ET
POTENTIELS)

- Entreprises dont l'activité génère des odeurs, dans le cadre d'une démarche volontaire ou par obligation réglementaire
 - ⇒ Raffinerie, Industrie pétrochimique
 - ⇒ Installations de stockage des déchets non dangereux (ISDND), incinérateur, Centre de compostage
- Organismes de gestion de la qualité de l'air
- Collectivités
- Entreprises du secteur de l'automobile ou de l'électroménager dont les produits intègrent des dispositifs de mesure des odeurs
- Entreprises du secteur HoReCa (l'hôtellerie, de la restauration et des cafés)
- Entreprise de transport de voyageurs
- Entreprises agroalimentaires
- Entreprises du secteur de la parfumerie et de la cosmétique
- Laboratoires médicaux, hôpitaux



ORGANISMES POUVANT RECOMMANDER
L'USAGE DE NEZ ÉLECTRONIQUES SUITE À
DES ETUDES R&D

- Associations interprofessionnelles, écoles ayant une activité R&D dans le domaine de l'analyse sensorielle, de la qualité de l'air ou des secteurs industriels concernés par les odeurs
- Pôles de compétitivité



Figure 19 : Quelques exemples d'acteurs (RECORD 2020)

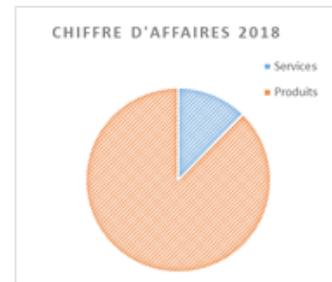
Historique et positionnement

Depuis 25 ans, Alpha MOS déploie des solutions d'analyse olfactive, gustative et visuelle et plus particulièrement d'identification et d'analyse des COV (Composés Organiques Volatiles) sur de multiples marchés et applications. Ces composants organiques sont des indicateurs pertinents tant pour l'assurance qualité des produits agroalimentaires que pour la mesure non invasive de l'évolution de maladies chroniques

Business-model

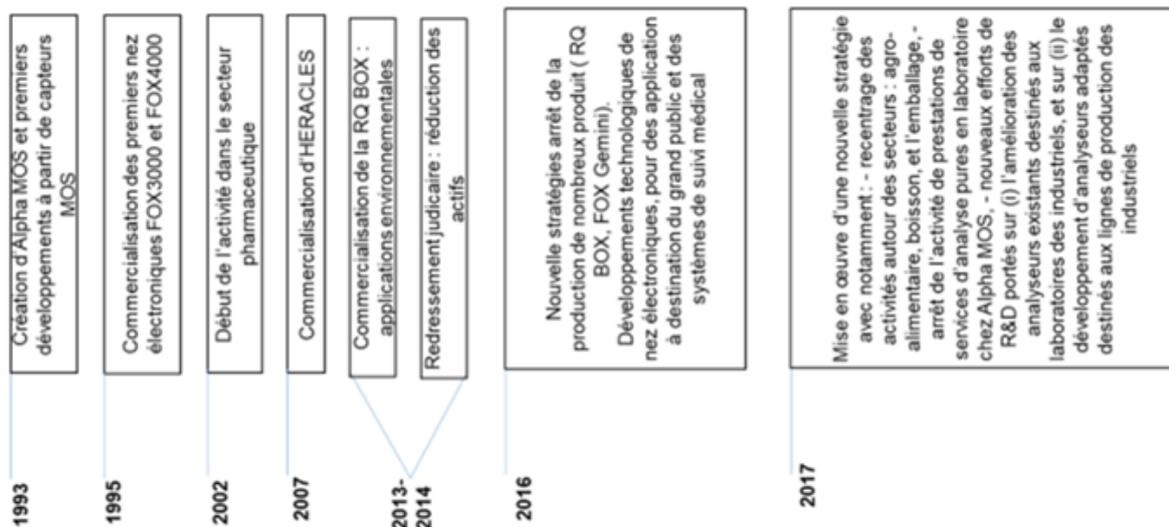
En 2018, AlphaMOS a réalisé la majorité de son chiffre d'affaire en vente de produits. Cependant, AlphaMOS indique vouloir changer ce modèle pour se diriger vers des prestations de service.

Par ailleurs, les marchés médical et environnemental initialement visés, sont délaissés au profit du secteur de l'agroalimentaire.



Produits commercialisés

Nez électroniques : HERACLES, HERACLES NEO et HERACLES QA, langues électroniques, chromatographie en phase gazeuse ultrarapide



Ce que nous apprend la trajectoire d'Alpha MOS

Ancien leader mondial de la vente de nez électroniques, AlphaMOS a dû repenser ses activités à la suite de difficultés. En effet, les nez électroniques, pour être performants pour des applications environnementales, se doivent d'être calibrés par du personnel qualifié. Ainsi le modèle de type « Service » semble s'être imposé aux différents concepteurs de nez électroniques. AlphaMOS cible donc désormais de nouveaux marchés (agroalimentaire, analyses en laboratoire)

- **Exemple de client** : Coca Cola



Belgique (siège technique)

577 Route de Longwy
6700 Arlon—Tél : +32 63 33 90 50

France

36 rue Léonard de Vinci
91090 Lisses —Tél : +33 9 72 23 46 20

Historique et positionnement

ODOMETRIC est une spin-off de l'Université de Liège. C'est au sein de l'unité de Surveillance de l'Environnement que Julien Delva, fondateur et président d'ODOMETRIC, a approvoisé et développé les techniques et outils de gestion, et de suivi des odeurs.

ODOMETRIC propose ses services à des acteurs du secteur privé mais aussi aux collectivités. Odometric propose une solution globale de gestion et de suivi des émissions d'odeurs, et son activité se divise en 4 pôles

Pôle laboratoire

Compréhension de l'activité et définition des sources (analyse des plaintes, visite du site, identification des sources d'émission, etc.)

Prélèvements et mesures sur site (prélèvement d'odeur, mesure d'étendue de panache, cartographie des odeurs)

Mesure et caractérisation des odeurs (olfactométrie dynamique, analyse de la qualité de l'air)

Pôle impact

Evaluer l'impact olfactif d'une activité (analyse météorologique, modélisation de dispersion atmosphérique).

Mesurer les nuisances en temps réel avec les riverains (observation des perceptions, identification des sources de gênes, gestion des conflits)

Etude de risque sanitaire (biosurveillance végétale, surveillance des milieux, constat d'impact).

Pôle process

Optimiser les débits d'air à traiter (diagnostic, captage à la source, gestion des entrées d'air)

Améliorer l'efficiences des systèmes de traitement d'air (définition des besoins, recherche de solutions).

Pôle process

Equiper le site pour le suivi en continu des odeurs (réseaux de capteurs, nez électroniques, stations météo)

Sensibilisation et formation du personnel à la problématique odeur (réglementation, techniques de suivi, traitement des odeurs, etc.)

Pilotage des installation par un système expert (compilation de données de capteurs, nez électroniques, observatoire de riverains, modélisation)

ODOMETRIC a développé un nez électronique, Fidor, qui permet un monitoring en temps réel des nuisances olfactives sur site industriel. Ce nez électronique n'est jamais utilisé seul, mais fait parti d'une méthodologie globale d'évaluation des nuisances olfactives.

ODOMETRIC a développé une plateforme qui a pour objectif de traiter des données issues du processus industriel, des relevés d'odeur et de données de différents instruments de mesure.

5.2 Les secteurs d'application des nez électroniques

Les usages des nez électroniques sont divers et touchent à des secteurs d'applications aussi variés que l'industrie agroalimentaire, l'agriculture, l'environnement, le secteur médical, la sécurité civile ou encore la surveillance des fraudes (Figure 20). Cependant, beaucoup de ces applications restent encore à l'état de recherche ou de développements en lien avec les utilisateurs, et n'ont pas encore abouti à un produit fiable sur le marché. (Wasilewski, 2016). Nous avons essayé de distinguer les applications réellement observées à ce jour de celles qui ne sont pour le moment que des projections bien qu'elles soient déjà testées en laboratoire.

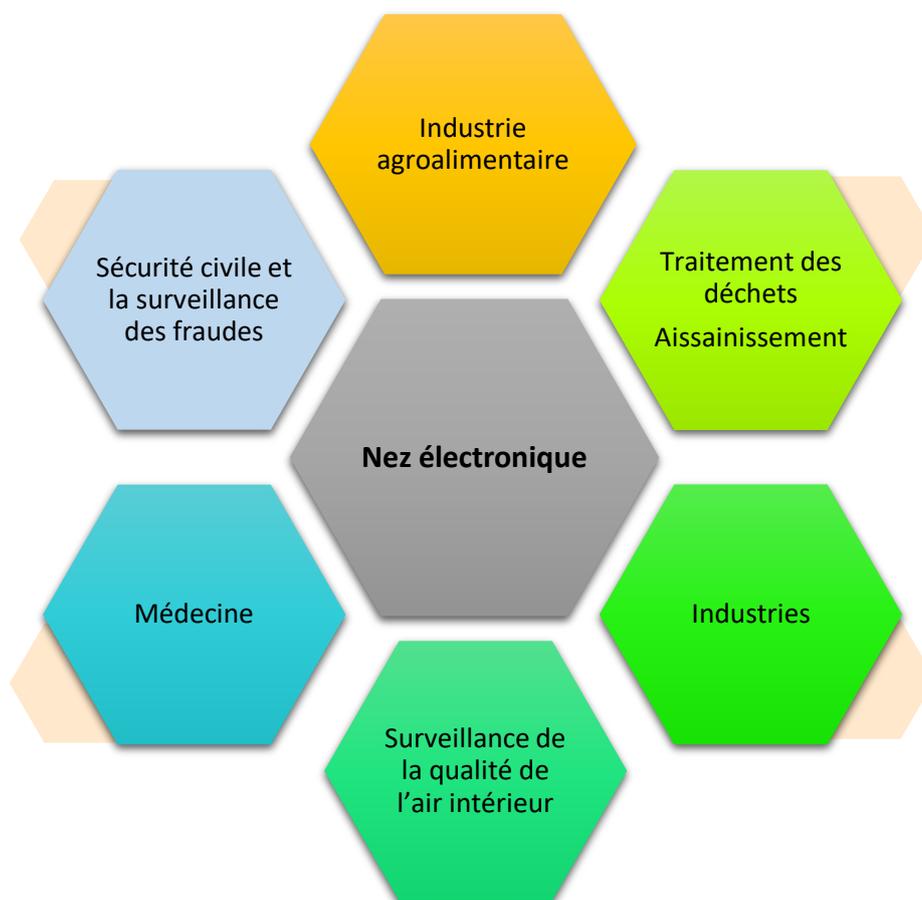


Figure 20 - Secteurs d'applications des nez électroniques (RECORD 2020)

5.2.1 Applications actuelles

5.2.1.1 *La surveillance de l'environnement*

Détection et mesure des odeurs à distance de la source d'émission

Les nez électroniques ont souvent été employés pour le monitoring des odeurs à proximité des sites industriels. Les activités suivantes sont particulièrement concernées :

- Usines de traitement des déchets ;
- Centres d'enfouissement des déchets ;
- Stations de traitement des eaux usées, des eaux industrielles ;
- Bassins de décantation de sucrerie ;
- Centres de compostage ;
- Élevages (porcheries, poulaillers...) ;
- Industries chimique et pétrochimique ;
- Papeteries ;
- Industries minières.

Pour toutes ces applications, les nez électroniques permettent de mesurer les odeurs en temps réel et en continu et donc, potentiellement, d'adapter l'activité ou de mettre en œuvre des mesures d'atténuation lorsque les seuils d'alerte (réglementaires ou non) sont atteints. Cependant, actuellement, les nez électroniques ne sont pas les outils les plus pertinents pour les mesures en limite de sites industriels ni les outils de référence pour de telles applications, et ceci pour plusieurs raisons :

- Le manque de précision et de sensibilité : il est communément admis que les nez électroniques sont capables de détecter des odeurs dont la concentration est supérieure à 200~300 UO_E/m³. Des valeurs de 1000 UO_E/m³ sont parfois avancées pour certains composés comme les composés soufrés auxquels l'odorat humain est très sensible. Ainsi, les très faibles concentrations de la molécule odorante (de l'ordre du ppb) ne sont pas mesurés par les nez électroniques. Pour cette raison, l'usage des nez électroniques n'est pas adapté à certaines odeurs et est rarement adapté à un usage dans l'air ambiant dans lequel les odeurs sont variables et à faibles concentrations. Leur usage est plus pertinent à proximité des sources d'émission.
- Les nez électroniques souffrent de problèmes de dérive et d'empoisonnement à certains gaz ;
- Ils sont sensibles aux variations de température et à l'humidité ;
- Bien que considérés comme des instruments « *low cost* », leurs coûts peuvent être importants surtout lorsqu'ils sont installés en réseau dense ;
- Les nez électroniques ne peuvent fournir une concentration d'odeur au sens de la norme EN 13725 ((CEN/TC264 2003) sans avoir été préalablement calibrés au moyen de mesures olfactométriques réalisées par un jury de nez. Lorsqu'une valeur en UO_E/m³ est fournie, il s'agit d'une valeur issue d'une corrélation.

L'utilisation des nez électroniques doit donc être réservée à des situations particulières pour lesquelles le niveau d'odeur, même à distance du site d'émission, est élevé et pour lesquelles les budgets alloués permettent un entretien et un suivi optimal de ces dispositifs. Plusieurs auteurs (Capelli, Sironi, et Del Rosso 2014; Boeker 2014) soulignent que les nez électroniques, doivent être développés et finement calibrés de manière spécifique aux odeurs émises, aux conditions environnementales et aux objectifs (détection, mesure de la concentration), lorsqu'ils sont utilisés pour la surveillance des nuisances olfactives dans l'environnement, où les conditions sont très variées.

Détection et mesure des odeurs à la source d'émission

Compte-tenu des limites de la sensibilité des nez électroniques, cette application est bien celle pour laquelle ils sont particulièrement indiqués. Dans la plupart des cas, les flux à l'émission doivent être préalablement refroidis, dépoussiérés et l'humidité contrôlée avant que le nez ne soit exposé à l'échantillon. L'usage des nez électroniques n'est actuellement pas la méthode de référence pour ces mesures. Cependant, les résultats fournis permettent de gérer précocement les émissions et peuvent ainsi limiter les nuisances olfactives dans l'air ambiant en périphérie des sites. La bonne gestion des phénomènes de dérive, d'empoisonnement et l'entretien rigoureux du matériel restent des points de vigilance essentiels pour garantir la fiabilité des résultats.

Contrôle des systèmes d'abattement des odeurs

L'efficacité des systèmes de désodorisation installés avant l'émission de gaz polluants ou odorants doit être contrôlée régulièrement. Dans ce contexte, les nez électroniques sont potentiellement de bonnes alternatives aux méthodes traditionnelles de mesure des molécules odorantes et des odeurs. Cependant, peu d'études ont été conduites dans ce domaine, freinées par plusieurs difficultés majeures : la forte teneur en humidité des gaz émis après leur passage à travers les filtres, la présence de poussière, la grande variabilité des conditions en fonction des activités concernées et la sensibilité du nez électronique qui doit permettre de mettre en évidence les dysfonctionnements du système d'abattement.

Une entreprise spécialisée dans la désodorisation industrielle par mise en œuvre de neutralisants (Westrand⁶) que nous avons contactée indique ne pas utiliser ni recommander de nez électroniques. Les techniciens interrogés précisent que la plupart de leurs clients ont cessés d'utiliser des nez électroniques pour le monitoring de leurs odeurs au profit des prestations proposées par les bureaux d'études spécialisés.

⁶ <https://www.westrand.com/fr/>

5.2.1.2 Sécurité civile et surveillance des fraudes

Au cours de ces dernières années, le nombre d'attaques terroristes a augmenté de façon importante, faisant de la détection d'explosifs un enjeu de sécurité majeur. Traditionnellement, la détection des explosifs se fait à l'aide de chiens. Malheureusement, cette méthode n'est pas toujours efficace et les alternatives mettent en œuvre des dispositifs de laboratoire très coûteux et nécessitant un personnel hautement qualifié.

Ainsi, les nez électroniques semblent être des candidats idéaux pour devenir des dispositifs de choix pour la détection des explosifs. De nombreuses équipes de recherche se concentrent sur la détection des composés aromatique nitrés (TNT) (Yinon, 2000). Les résultats issus de ces recherches démontrent l'efficacité des nez électroniques pour la détection d'explosifs artisanaux.

Le Z-Nose est le nez électronique de référence pour ce genre d'application. Il est commercialisé par Electronic Sensor Technology, une entreprise américaine fondée le 11 juillet 2000. Le Z-Nose cible l'identification des explosifs artisanaux et des matériaux inflammables. C'est un appareil mobile aujourd'hui utilisé pour des applications de sécurité intérieure, telles que la sécurité des ports, des aéroports et des bâtiments. C'est un instrument basé sur la chromatographie gazeuse ultra-rapide : l'échantillon à tester est aspiré par une pompe et entraîné par un flux d'hélium à travers une colonne chauffée. Les différentes molécules sont séparées et se déposent séquentiellement sur le détecteur du résonateur à quartz (SAW) en sortie de colonne. Les variations de fréquence alors mesurées sont proportionnelles à la masse de chaque composé. Pour que les composés soient identifiés, l'appareil doit être préalablement calibré avec des échantillons de référence.

Bien que commercialisé comme un nez électronique, cet appareil n'est pas un nez électronique tel que nous l'avons défini dans cette étude : en effet, il n'intègre pas de capteurs non spécifiques et il est capable de détecter et de mesurer la quantité de certaines molécules volatiles mais il ne mesure pas une odeur en tant que telle.

5.2.2 Futures applications des nez électroniques ?

Les applications décrites ci-dessous sont issues de différents articles de recherche. Elles concernent des nez électroniques qui n'ont pas fait l'objet de développement industriel à ce jour ou des nez électroniques commercialisés et testés pour de nouveaux usages. Cette partie reflète néanmoins l'ensemble des applications potentielles futures des nez électroniques.

5.2.2.1 Surveillance de la qualité de l'eau

Des nez électroniques ont été conçus pour évaluer la Demande Biologique en Oxygène (DBO) à partir de la mesure de l'odeur de l'air à la surface de l'eau des stations de traitement des eaux usées (STEU). Les résultats obtenus se sont montrés satisfaisants pour une station donnée et sur le court terme. Toutefois ils ont montré leur incapacité à donner un résultat fiable sur plusieurs stations ou au-delà d'un mois d'utilisation environ. Ce phénomène de dérive temporelle très marqué a pu être atténué en recalibrant l'appareil tous les mois ou en normalisant les données obtenues. Le chauffage de l'eau à

des températures voisines de 90°C améliorerait aussi la détection des odeurs. Ces difficultés compromettent cependant à l'heure actuelle l'usage de nez électroniques en routine pour la mesure de la DBO.

Des résultats prometteurs ont également été obtenus pour la détection de sulfures et de nitrates ou encore de métaux lourds dans des eaux superficielles, grâce à un nez électronique commercialisé (Cyrano 320, Sensigent, Baldwin Park, USA). La détection de pesticides comme le lindane, la détection précoce du développement de micro-organismes dans l'eau ou encore la détection d'anomalies liées à la présence de polluants s'est également avérée possible par l'usage de nez électroniques, alors employés comme outils d'alerte (Capelli et al., 2014).

5.2.2.2 Surveillance des pollutions en milieu marin

Les nez électroniques, y compris ceux qui ont déjà été commercialisés (Karlsruhe Micronose KAMINA, Thermo Fisher Scientific, USA ; Héraclès, Alpha MOS, France) ont montré qu'ils pouvaient être employés dans le cadre de la surveillance des pollutions en milieu marin. Il semblerait que les appareils développés ou testés soient pour l'instant capables de détecter et/ou de mesurer des composés organiques volatils ciblés (hydrocarbures, benzène, sulfures, chloroforme...) ou des molécules odorantes produites par des bactéries. Si ces appareils peuvent donc être utiles pour la surveillance de rejet d'hydrocarbures (naufages, fuites au niveau des plates-formes pétrolières ou des pipelines, dégazages frauduleux) ou d'eaux usées, ils ne sont pas employés ici pour la détection d'une odeur au sens strict (Tonacci et al. 2018).

5.2.2.3 Surveillance de la qualité de l'air intérieur

La qualité de l'air est devenue un enjeu majeur ces dernières années : son influence sur la santé et sur le confort des individus n'est plus à prouver, et une prise de conscience de l'importance de cette problématique a eu lieu au sein de la population d'autant que les odeurs agréables ou nauséabondes constituent les facteurs principaux de la perception de l'environnement par les individus. (Cellini et al. 2017). Actuellement, la ventilation est la technique employée pour réguler la qualité de l'air intérieur, et la concentration en CO₂ est utilisée comme valeur de référence pour calculer le taux de circulation d'air des espaces intérieurs.

De nombreux projets de recherche visent à développer un nez électronique bon marché, permettant la détection et la quantification des polluants intérieurs. Les composés organiques volatils (COV) produits par les processus métaboliques humains représentent la principale classe de substances responsables des odeurs perçues par les individus. Des recherches ont été effectuées afin de développer un nez électronique utilisant des capteurs de gaz de type MOS pour l'identification et la quantification de certains de ces COV tels que l'acétone, l'éthanol, l'isopène et l' α -pinène rejetés par la transpiration de la peau et l'air expiré. Différentes expériences ont été mises en œuvre afin de montrer l'influence de ces composés dans une cuisine, une salle de réunion, un espace partagé ou un gymnase. Il a été

démontré que les nez électroniques utilisés sont en mesure de détecter et de quantifier, avec une sélectivité et une sensibilité importantes, les COV ciblés (Cellini et al. 2017).

Le RUBIX POD, commercialisé par RUBIX S&I, est dédié à cet usage.

Par ailleurs, ces dernières années, d'autres « nez électroniques » sont commercialisés pour surveiller l'air ambiant. La plupart du temps, ils sont utilisés pour détecter des composés chimiques spécifiques de la qualité de l'air. Ce sont des capteurs multi-gaz qui souvent n'ont pas d'algorithmes de reconnaissance de formes car ils se concentrent sur la détection de gaz spécifiques. Le résultat est souvent rapporté sous la forme d'un indice de qualité de l'air, fonction de la concentration des gaz mesurés selon leurs critères de qualité de l'air ambiant respectifs. L'expression « nez électronique » est ainsi utilisée pour des raisons de *marketing*, plutôt que pour décrire véritablement la technologie mise en œuvre.

Les polluants provenant de matériaux de construction constituent une autre variété de contaminants de l'air intérieur pouvant être analysés au moyen de nez électroniques. En effet, l'ensemble de l'ameublement résidentiel est caractérisé par une odeur dont la perception peut être très variable en fonction des individus. De plus, certains des composants de ces objets peuvent être toxiques voire cancérigènes (le formaldéhyde par exemple). Des études ont montré la capacité des nez électroniques à percevoir les émissions d'odeurs de plusieurs produits de construction tels que le mastic acrylique, le silicone, la colle à plancher ou encore les peintures murales, avec une bonne sensibilité (Bitter, 2010)(Cellini et al. 2017).

Les dommages causés par l'humidité et par les contaminations fongiques sont susceptibles de provoquer des allergies, des irritations et des nuisances olfactives qui doivent être contrôlées pour garantir des conditions intérieures saines. Plusieurs travaux de recherche ont été conduits dans le but de tester des nez électroniques à détecter et classer les différentes espèces de champignons, initialement dans le domaine de l'industrie alimentaire mais aussi dans les bâtiments (Cellini et al. 2017).

Une autre application intéressante des nez électroniques dans la surveillance de la qualité de l'air intérieur concerne la sécurité environnementale. Plusieurs études se sont concentrées sur la capacité d'un nez électronique à quantifier plusieurs sous-produits toxiques de combustions tels que le monoxyde de carbone et le dioxyde d'azote (S. Zampolli, 2014).

La NASA a développé un nez électronique, le JPL E-nose, avec pour objectif de détecter les contaminants potentiels dans la station spatiale internationale. Le JPL E-nose est composé de 32 capteurs et est en mesure de détecter diverses odeurs et de déterminer si celles-ci proviennent de substances dangereuses pour l'Homme ou non. Un test de 6 mois a démontré qu'il était en mesure de détecter du formaldéhyde, du Fréon 218, du méthanol et de l'éthanol avec une bonne sensibilité. À l'avenir, ce nez électronique pourrait être utilisé pour surveiller les cabines d'équipages des véhicules menant à la lune ou à d'autres destinations.

5.2.2.4 La surveillance et le monitoring des procédés industriels ; détection d'anomalies de fonctionnement.

Les nez électroniques ont un fort potentiel d'usage dans des centres de compostages, les stations d'épuration et de traitement des eaux usées (STEU) ou les sites de méthanisation, essentiellement parce qu'ils sont capables de produire des données en continu et ainsi permettre d'optimiser la gestion du *process* et y détecter des anomalies. Les résultats obtenus ont été encourageants même si les variations d'humidité et de température nuisent à la fiabilité et la répétabilité des résultats. Pour y remédier, les appareils doivent être finement calibrés et adaptés à chaque situation (Capelli *et al.*, 2014).

5.2.2.5 Industrie agroalimentaire

La surveillance de la qualité et de la fraîcheur des matières premières et des produits frais, comme la viande, est un enjeu important pour les producteurs comme pour les consommateurs car elle conditionne les qualités organoleptiques et nutritives des produits, ainsi que le risque sanitaire (Jia *et al.* 2018; Loutfi *et al.* 2015; Alphas D Wilson 2013). C'est ce secteur d'activité qui offre actuellement le plus d'opportunités pour l'usage des nez électroniques. C'est aussi dans ce secteur que les recherches et les publications scientifiques sont les plus nombreuses (173 des 606 articles de synthèse publiés ces 10 dernières années et compilés par la base de données *Web of Science*).

La dégradation des denrées alimentaires comme la viande est liée à l'oxydation par des micro-organismes et des enzymes, des protéines, des graisses et des hydrates de carbone, responsables de l'émission de gaz volatils comme les amines. Les méthodes traditionnelles d'évaluation de la fraîcheur des denrées font appel à l'inspection et à des méthodes de laboratoire fiables mais longues et coûteuses (analyses bactériologiques, GC-MS). Les nez électroniques, en tant que méthode rapide, efficace, non-destructive et en temps réel, semblent particulièrement adaptés à l'évaluation de la qualité, la fraîcheur et la durée de conservation des produits. Ils peuvent également être employés pour authentifier la nature et/ou l'origine des produits, et ainsi lutter contre les fraudes.

De fait, plusieurs études ont montré que des nez électroniques commercialisés (PEN3 et PEN4, Aisense, Allemagne ; FOX4000, Alpha-MOS, France) sont très efficaces pour détecter en temps réel la fraîcheur et évaluer la durée de conservation de la viande de bœuf, de porc ou du poisson. Ces mêmes appareils se sont montrés également performants pour distinguer des viandes fraîches ou des produits préparés en fonction des différents traitements subis ou méthodes de fabrication affectant la qualité des denrées (Jia *et al.* 2018).

Des nez électroniques peuvent être employés comme outil d'alerte en cas de contamination bactérienne, et, le cas échéant, identifier la souche bactérienne en cause (Loutfi *et al.* 2015).

La surveillance de la qualité du lait se fait à travers l'examen de caractéristiques physiques, d'analyses bactériologiques et de la détection de composés organiques volatils (COV) générés par les micro-organismes. La nature et la quantité des COV sont modifiées en fonction de facteurs variés comme le métabolisme des micro-organismes, la photo-oxydation, la présence de métaux pro-oxydants (Cu, Fe, Ni). Ce sont ces modifications qui peuvent être détectées par des nez électroniques (Loutfi *et al.* 2015).

La fraîcheur du poisson est bien corrélée à la libération de certains composés aromatiques considérés comme des biomarqueurs de dégradation du produit (profil des acides gras, aldéhydes (hexanal, 2-méthyl-1-butanol, nonanal, 2,4-heptadienal), cétones (2-octanone, 2-decanone, 2-propanone), triméthylamine (TMA), COV (1-butanol, 1-penten-3-ol)) qui peuvent être mesurés par des nez électroniques (Loutfi et al. 2015).

Les nez électroniques étant capables de détecter des aliments contaminés ainsi que des moisissures, il paraît intéressant d'en équiper les appareils électroménagers comme les réfrigérateurs, ce qui rejoint la stratégie de développement commercial adoptée par Aryballe.

Un entretien conduit avec le responsable du département d'analyse sensorielle d'une grande entreprise agroalimentaire française a révélé que l'usage des nez électroniques dans le secteur de l'agroalimentaire est loin d'être généralisé. Des essais conduits au sein de ce département avec 2 nez électroniques de marques différentes (Alpha MOS, Aryballe) ont montré qu'ils n'étaient pas adaptés aux besoins de l'entreprise que ce soit en matière de R&D ou pour le suivi de *process* sur les lignes de production. Les défauts cités sont :

- La faible sensibilité, incompatible avec les niveaux d'odeurs rencontrés dans l'activité ;
- La faible spécificité (impossibilité à distinguer des arômes différents pourtant très perceptibles au nez humain et dus à des molécules très différentes) ;
- Les phénomènes de dérive important notamment du fait de l'humidité des produits analysés ;
- La faible reproductibilité des résultats obtenus par des appareils différents qui compromet leur usage dans le contrôle qualité ;
- Plus globalement, la mauvaise représentativité des résultats obtenus ;
- Le fait que les résultats nécessitent une calibration et une interprétation que seul du personnel dédié peut réaliser ce qui n'est pas possible en contrôle de routine sur les chaînes de production ;
- Le fait que la durée de vie des capteurs est limitée et que le changement de capteur remet en cause tous les acquis de la calibration

Pour ces raisons, l'analyse sensorielle que ce soit dans le cadre de la R&D ou le contrôle de production est réalisée avec des méthodes traditionnelles (jury de nez humains non experts ou, au contraire, entraînés spécifiquement pour les produits à tester, GC-MS, GC couplée à l'olfactométrie).

Les personnes interrogées ne connaissent aucune autre entreprise agroalimentaire utilisant des nez électroniques.

5.2.2.6 Estimation de la qualité du produit (Loutfi et al., 2015)

Dans le cas du thé et du café mais aussi du vin et de la bière, l'odeur est un critère essentiel dans la définition de la qualité du produit dont dépend son prix. L'enjeu est donc principalement d'ordre économique mais l'analyse olfactive du vin a aussi son intérêt pour étudier et comparer les techniques de vieillissement, identifier l'origine géographique ou décrire les arômes.

Dans le cas du thé, ce sont les phénomènes d'oxydation enzymatiques liés à des processus de fermentation qui définissent les arômes et le goût du thé. Ces phénomènes sont influencés par les méthodes de cueillette, de conditionnement, de transformation (blanchiment, fermentation, séchage) qui permettent de produire différentes sortes et qualité de thé. Les nez électroniques servent à différencier des thés selon leurs processus de transformation ou pour suivre en temps réel la durée de fermentation.

L'arôme et le goût du café dépendent de l'espèce et de la variété, des techniques agricoles employées et des traitements post-récolte mis en œuvre. L'arôme et le goût varient également selon la forme du café (en grains verts ou grillés ou moulu). Les nez électroniques sont essentiellement employés pour identifier les arômes et ainsi définir la qualité du café dans le cadre du contrôle des fraudes.

5.2.2.7 Contrôle de la maturité des fruits

L'une des principales préoccupations de l'industrie alimentaire est la détermination systématique du contrôle de la maturité des fruits au cours de la récolte et après la récolte. En effet, la variabilité de la maturité est identifiée par les consommateurs comme un manque de qualité. Des nez électroniques basés sur des capteurs de gaz éthylène sont utilisés pour déterminer la maturité des fruits. Une bonne corrélation entre les signaux des capteurs et certains indicateurs de qualité du fruit a également été trouvée. De nombreux nez électroniques ont été utilisés dans la littérature scientifique pour de telles applications, parmi lesquels des nez électroniques développés par : Alpha MOS, Sacmi, Aisense Analytics et Electronic Sensor Technology (M. Baietto, 2015).

5.2.2.8 Secteurs de l'agriculture et de la sylviculture

Dans ces secteurs, c'est encore la capacité des nez électroniques à délivrer des résultats en continu et en temps réel qui les rend attrayants. Les principaux usages en agriculture et foresterie sont les suivants :

- La détection des maladies des cultures ou la présence de ravageurs (termites,...) ;
- La surveillance des processus physiologiques des plantes cultivées (à travers la mesure des composés organiques volatils émis), à des fins de recherche agronomique ou de gestion des cultures ;
- L'identification et la classification des espèces ou variétés végétales basées, par exemple, sur leur production d'huiles essentielles ;
- La détection des résidus de pesticides dans l'environnement et les récoltes ;

- La surveillance de la qualité des récoltes au cours de leur stockage ;
- La protection des cultures contre le bioterrorisme (Alphus D Wilson 2013) ;
- La qualité de l'eau.

Plus spécifiquement, dans le secteur de la sylviculture, l'identification des types de bois et de leurs caractéristiques par un nez électronique permet une meilleure gestion de la forêt, de la coupe du bois et de la valorisation du bois produit en fonction de ses caractéristiques. Le diagnostic précoce de certaines maladies fragilisant les arbres en milieu urbain relève de la gestion du risque et de la sécurité des personnes. Les nez électroniques permettraient aussi de mieux comprendre le fonctionnement des écosystèmes forestiers et les interactions entre les espèces végétales et les micro-organismes ou les invertébrés. La signature olfactive (COV émis) des espèces végétales est très informative et vient en complément des données génétiques dans le secteur de la taxonomie.

5.2.2.9 Secteur médical

Le principe de l'utilisation des nez électroniques dans le secteur médical repose sur le fait que l'activité métabolique du corps humain en bonne santé est responsable de la présence de biomarqueurs dans l'air expiré comme dans l'air au contact des fluides corporels ou des tissus. Certains de ces biomarqueurs sont des COV détectables par les nez électroniques (Wilson 2018). En cas de développement d'une pathologie infectieuse, des COV particuliers sont émis. Ils proviennent de l'activité métabolique des pathogènes et de l'activité métabolique perturbée de l'organisme infecté. Dans le cas des pathologies non infectieuses, seules les COV provenant de l'activité métabolique du patient sont présents. Ces COV constituent une signature ou empreinte caractéristique de la maladie que même la présence de COV liés à l'environnement du patient (lieu de vie, activité professionnelle, mode de vie, etc.) n'impacte pas ou peu. Néanmoins, il a été montré que pour optimiser la capacité de discrimination des nez électroniques dans le secteur médical, il est important que la base de référence soit constituée sur la base d'échantillons prélevés localement afin de minimiser les effets géographiques, ethniques et culturels (Wilson 2018).

L'usage de nez électroniques présente donc un intérêt indéniable dans le diagnostic médical, en permettant un diagnostic précoce, rapide, économique, réalisable au chevet du patient ou à son domicile, par du personnel médical non formé aux techniques analytiques complexes. De plus, les nez électroniques permettent d'établir un diagnostic de manière non invasive, ce qui est particulièrement appréciable chez les jeunes patients ainsi que pour réaliser un dépistage de première intention. Une équipe de recherche thaïlandaise a montré qu'il était possible de distinguer des patients diabétiques de patients sains et de patients sains ayant consommé de l'alcool grâce à un nez électronique équipant les toilettes (Choden et al. 2017). Les nez électroniques permettent en théorie de rechercher plusieurs maladies à partir d'une même analyse (Schuermans et al. 2018). Cependant la performance des nez électroniques conçus pour diagnostiquer une seule maladie ou des maladies très proches est généralement supérieure à celle des nez électroniques « généralistes » car il est plus facile de choisir les critères de discrimination entre les échantillons sains et pathologiques.

La fiabilité des nez électroniques dépend essentiellement de la richesse des bases de références qui ont permis de les mettre au point : plus l'appareil aura été confronté à des signatures olfactives de personnes malades, plus robuste sera sa réponse. La sensibilité de l'appareil dépend, quant à elle, du choix des matériaux et des capteurs qui sont plus ou moins sensibles aux COV recherchés. C'est donc la connaissance de la composition spécifique en COV induite par une maladie, acquise par analyse métabolomique qui permet de faire un choix éclairé lors de la conception du nez électronique (Wilson 2017).

L'Aeronose (The eNose Company, Pays Bas) est un nez électronique intégrant des capteurs MOS. Il est portable, utilisable au chevet du patient, directement à partir de l'air expiré par le patient et peu coûteux. Avec une sensibilité et une spécificité de respectivement 88% et 92% par rapport aux résultats confirmés par rétro-culture, il permet de différencier efficacement, les personnes en bonne santé de celles atteintes de tuberculose. L'Aeronose est réutilisable après désorption des COV par le passage d'air propre filtré sur charbon actif jusqu'à stabilisation.

À l'avenir, les recherches dans ce domaine devraient augmenter en raison des résultats prometteurs démontrés dans des études antérieures, notamment dans les maladies obstructives des voies respiratoires. L'objectif principal est de parvenir à une méthodologie universelle, avec une reproductibilité et une répétabilité adéquate, afin de permettre des comparaisons entre les études. Une validation externe doit être effectuée pour augmenter la robustesse des résultats. Par la suite, des études sur des populations plus importantes, représentatives seront nécessaires pour évaluer cette technologie dans un contexte clinique réel en présence de plusieurs facteurs de confusion (Pajot-Augy, 2019).

SYNTHESE DE LA PARTIE 5.2.2.9

Secteur médical

Il existe un besoin pour une technique simple, non invasive, peu coûteuse et facile à mettre en œuvre pour évaluer des échantillons biologiques complexes. Des études par GC-MS ont déjà prouvé que l'analyse de l'air, en particulier de l'haleine exhalée, pouvait être un outil d'évaluation du statut métabolique d'un individu (normal ou associé à une maladie). Ces dernières années, plusieurs études utilisant les nez électroniques pour analyser des échantillons de gaz ont montré des résultats prometteurs pour diagnostiquer différentes maladies, non seulement respiratoires mais également infectieuses et inflammatoires et divers types de cancers (Pajot-Augy, 2019).

L'analyse électronique du nez pourrait être utile en milieu clinique car ils sont portables, faciles à réaliser, peu coûteux, rapides et ne nécessitent pas de technicien spécialisé. De nombreuses études précédentes ont montré que la précision de cette technologie, de modérée à bonne, permet de différencier plusieurs affections des contrôles, en particulier les maladies obstructives des voies respiratoires. Cependant, il est prioritaire de créer des lignes directrices pour l'échantillonnage de l'haleine, l'analyse et l'interprétation des résultats normalisés. De plus, il est nécessaire de valider les résultats de manière externe dans des ensembles de données indépendants des patients nouvellement recrutés pour les renforcer. Enfin, des études sur des populations plus importantes et représentatives sont nécessaires pour tester cette technologie dans un contexte clinique réel. La reproductibilité et la répétabilité des mesures utilisant les nez électroniques doivent également être étudiées et optimisées pour garantir des résultats comparables (Pajot-Augy, 2019)

5.2.2.10 Détection de drogues et surveillance des fraudes

Une autre application possible des nez électroniques est la détection de drogue. Une étude a montré la capacité d'un nez électronique, peu coûteux et basé sur des capteurs de gaz à oxydes métalliques, à détecter cinq variétés de cannabis avec une sensibilité et une sélectivité importante (Zouhair Haddi, 2011).

La contrefaçon des produits alimentaires est l'une des problématiques importantes à laquelle sont confrontés les producteurs, les distributeurs, les consommateurs et les gouvernements. Les troubles résultant d'une telle fraude peuvent être d'ordre économique (prix) ou sanitaire (allergènes). L'odeur émise par les produits alimentaires est parfois suffisamment spécifique pour être en mesure de distinguer un produit original de son homologue frauduleux. Des nez électroniques ont été utilisés afin de tester l'authenticité des produits alimentaires, avec succès (Anna Gliszczyńska-Świgło, 2016).

5.2.2.11 Nez électroniques à destination du grand public

Ces dernières années, des nez électroniques sont développés à destination du grand public. On voit apparaître des dispositifs tels que le RUBIX WEAR, (objet connecté de suivi médical par l'haleine ou par la sueur), ou encore le BOYD SENSE, un nez électronique de suivi médical à destination du grand public dont la commercialisation était prévue fin 2018 par la société Alpha MOS.

Par ailleurs, Aryballe technologie développe des nez électroniques qui seront peut-être intégrés dans des équipements électroménagers de technologies avancées visant à automatiser la cuisson d'aliment (détection des odeurs de cuisson, personnalisation de la cuisson en fonction des odeurs), ou bien à suivre le stockage de nourriture (frigos intelligents : détection de produits périmés).

Ces technologies s'intègrent pleinement dans l'expansion forte du marché des objets connectés, comme le montre la figure 21 ci-dessous.

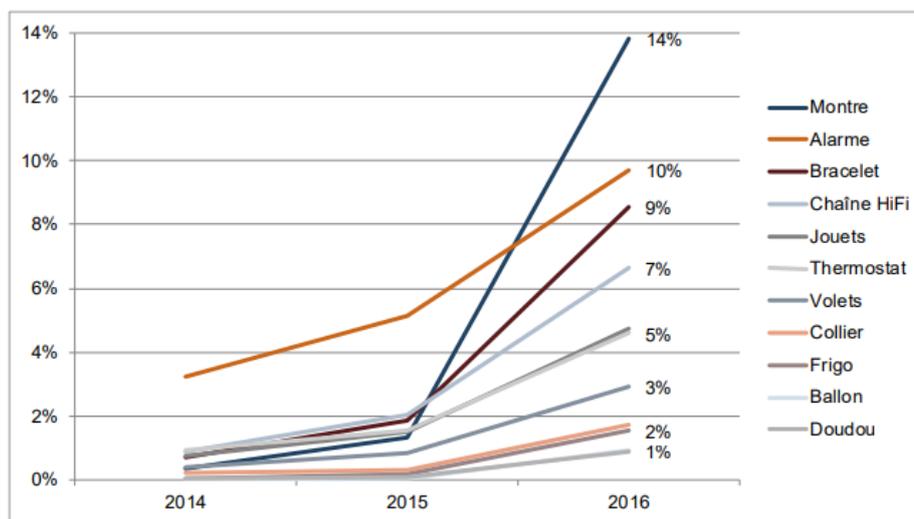


Figure 21 - Évolution du taux d'équipement d'objets connectés en France (Marché des objets connectés à destination du grand public, PIPAME 2018).

Cependant, la pertinence de ces technologies pose question, et les freins sur le marché des objets connectés sont nombreux (manque de besoin, prix)(Figure 22). Aussi, il n'est pas évident que les nez électroniques grands publics seront adoptés par ce dernier.

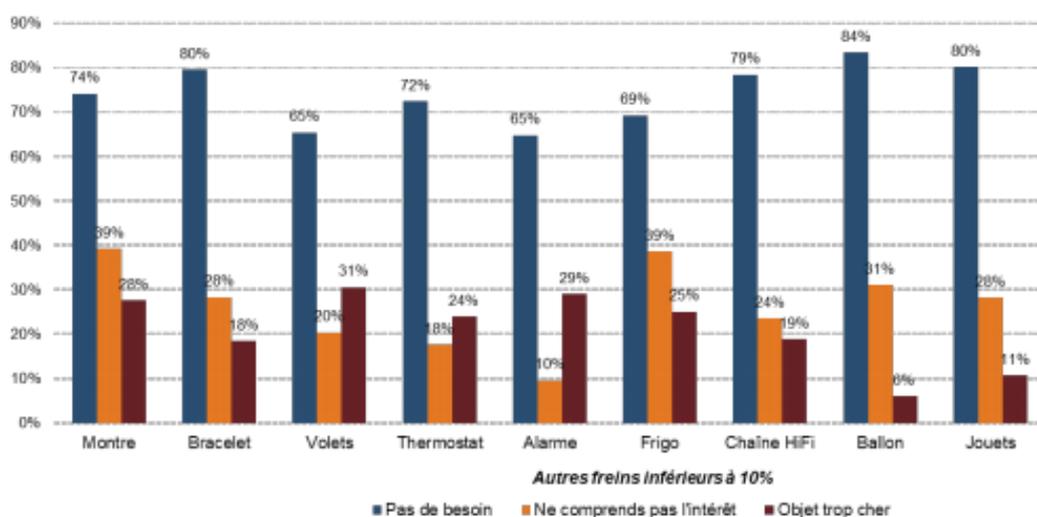


Figure 22 - Freins à l'équipement d'objets connectés (PIPAME, 2018)

5.3 Principaux produits du marché

Nos recherches ont permis d'identifier une douzaine de nez électroniques commercialisés (Tableau 7). Notons que les premiers nez électroniques d'Alpha MOS (FOX 2000, 3000 et 4000), dont il est question dans plusieurs publications, n'existent plus, Alpha MOS ayant recentré son activité sur l'analyse sensorielle basée sur un nez électronique par chromatographie en phase gazeuse rapide (HERACLES).

Nom commercial du nez électronique	Société	Adresse	Pays
OdorCheckerOutdoor (OCO)	3S	Saar-Lor-Lux Str. 11 66115 Saarbrücken	Allemagne
OdorCheckerSpot (OCS)			
Cyranose 320	Sensigent	1438 Arrow Hwy Baldwin Park CA 91706	USA
Enose® QA (Version portable de l'Enose®Aqua)			
RUBIX POD	RubiX S&I SAS	3 Avenue Didier Daurat 31400 Toulouse	France
RUBIX WATCHTOWER I			
EOS Aroma	Sacmi Imola S.C.	Via Selice Prov.le , 17/A - 40026 Imola (BO)	Italie
EOS Ambiente			
eNose	Comon Invent	PO BOX 39 NL-2600AA Delft	Pays-Bas
Odor Catch (Modèles fixe et portable)	Sciented Lab Center	Yuseong Gu, Daejeon, 34016	Corée du sud
Aeronose	The eNose Company	Industrieweg 85 7202 CA Zutphen	Pays-Bas
PEN 3	AIRSENSE Analytics GmbH	Hagenower Straße 73 19061 Schwerin	Allemagne
FIDOR	Odometric	577 Route de Longwy 6700 Arlon –	Belgique

Tableau 7 : Principaux nez électroniques commercialisés

Neuf de ces produits ont fait l'objet d'une fiche détaillée présentée ci-après, reprenant les caractéristiques techniques disponibles sur internet ou transmises par le constructeur ainsi que des informations fournies par des utilisateurs quand cela a été possible.

OdorCheckerOutdoor (OCO)



3S GmbH
Saar-Lor-Lux-Str. 11
66115 Saarbrücken

<http://www.3s-ing.de/?L=1>



Dimension : 40x 50 x 20 cm

Applications :

Surveillance et monitoring de la qualité de l'air ambiant sur les sites industriels, les sites de revalorisation des déchets, des centres de compostage...

Composants :

5 capteurs MOS : COV, NO₂, NH₃, O₃, H₂

5 cellules électrochimiques : NO₂, NH₃, O₃, H₂S, SO₂

PID : COV

+/- Capteurs additionnels : Station météorologique compacte, capteur laser pour les particules, capteur infrarouge non dispersif (non dispersive infrared sensor- NDIR) pour la mesure du CO₂

Logiciel en mode SaaS (Software as a Service) et intégré à l'appareil

Transmission des données par Ethernet, LTE (Long Term Evolution - 4G)

Fonctionnalités :

Détection et quantification des odeurs (après période d'apprentissage et corrélation avec données olfactométriques) et des COV

Mesure de gaz spécifiques en fonction des capteurs choisis

Alerte en cas de dépassement des seuils

Prélèvement automatique en cas d'alerte

Mesure des conditions météorologiques, des particules et du CO₂

Remarques et points de vigilance concernant le module de mesure des odeurs.

- Chaque capteur MOS est constitué d'une couche de métal semi-conducteur déposée à la surface d'une source de chaleur. Le signal est émis suite à la modification de la résistance du métal semi-conducteur en présence d'un gaz ou d'un mélange gazeux. Cette réponse est non spécifique mais le devient lorsqu'on fait varier la température du capteur. Cette technologie permet en outre de compenser les phénomènes de dérive. Le produit gagne globalement en sélectivité et fiabilité sans que son coût ni sa complexité ne soit augmentés.
- La gamme de détection varie de 1 ppb-1000ppm (très variable en fonction des capteurs et des molécules visées).
- La détection des odeurs nécessite la mise en œuvre de méthodes d'apprentissage supervisées (arbre de décision, LDA, PCA). La quantification des odeurs se fait par des méthodes de régression à partir des données olfactométriques (sur le terrain (EN16841) ou au laboratoire (EN13725)).
- Le seuil de détection des odeurs n'est pas fourni par le constructeur. Ce qui est normal car ce seuil sera très variable en fonction des odeurs considérées et des conditions environnementales.
- Le temps de vie des capteurs (données constructeur) est de plus de 2 ans pour les capteurs MOS (en l'absence d'empoisonnement), 1 an pour les cellules électrochimiques et 6 mois pour le PID.
- Une calibration annuelle est conseillée. La maintenance doit être réalisée 2 fois par an.

Exemple de partenaires :

- n.c.

Cyranose® 320



1438 Arrow Hwy Baldwin Park,
CA 91706,
USA

<http://www.sensigent.com/>



Dimension :
10 x 22 x 5 cm

Applications :

Détection, identification et analyse quantitative de gaz isolés ou en mélange, à l'origine d'odeurs, pour la sécurité civile et militaire, l'industrie pétrochimique, agroalimentaire, le packaging et la fabrication des plastiques, la recherche médicale...

Composants :

Pompe à air

Puce électronique NoseChip® composée de 32 capteurs nanocomposites dont le changement de résistance en présence d'un gaz est analysé et intégré par un algorithme.

Logiciel d'analyse et d'interprétation des données : PCnose™

Transmission des données filaire ou par WIFI

Connexion avec d'autres appareils pour la notification des alarmes et la visualisation des résultats

Fonctionnalités :

Détection et identification des gaz

Intégration des résultats sous la forme d'une empreinte olfactive (smellprints™) par la mise en œuvre d'algorithmes (PCA, KNN, Kmeans, CDA, SVM...)

Quantification des odeurs (après période d'apprentissage et corrélation avec des mesures olfactométriques)

Visualisation 2D et 3D des données

Apprentissage continu et incrémentation de la base de référence au fur et à mesure des utilisations

Intégration au sein d'un réseau de surveillance avec d'autres nez électroniques et ordinateurs

Remarques et points de vigilance concernant le module de mesure des odeurs.

- Appareil low-cost (1-10 \$)
- La limite de détection est de l'ordre du ppm pour les composés volatiles et certains gaz. La gamme de détection va de 0 à 1000 ppm (donnés constructeur)
- Le seuil de détection des odeurs n'est pas fourni par le constructeur. Ce qui est normal car ce seuil sera très variable en fonction des odeurs considérées et des conditions environnementales
- Plusieurs études ont montré l'intérêt du Cyranose 320 dans le domaine médical (dépistage du cancer du poumon parmi une population à risque d'ancien fumeur, dépistage de l'asthme, identification des souches bactériennes responsables d'infections urinaires, distinction des sinusites bactériennes des sinusites virales...). Des études complémentaires sont encore en cours pour déterminer la capacité du nez électronique à établir un diagnostic précoce et préciser son rapport coût/bénéfice (Primary Care Diagnostic Horizon Scanning Centre Oxford 2009)
- Le Cyranose 320 est un outil d'alerte

Exemple de partenaires et/ou de clients :

- n.c.

EOS Aroma



Sacmi Imola S.C.
Via Selice Prov.le , 17/A <https://www.sacmi.com/>
40026 Imola (BO)
Italie



Dimension : 49 x 27 x 40 cm

Applications :

Mesure des odeurs dans le cadre du contrôle qualité (au laboratoire ou sur ligne de production) et la surveillance des processus industriels sur les lignes de production (Secteur agroalimentaire, packaging, R&D...)

Composants :

Échantillonneur pneumatique

6 capteurs MOS (Métal-Oxyde-Semiconducteur) placés dans une cellule thermostatique (technologie brevetée). Chaque MOS est constitué d'un oxyde métallique différent.

Microprocesseur et logiciel de contrôle des mesures

Fonctionnalité :

Détection et identification des odeurs

Quantification des odeurs après corrélation avec des mesures effectuées conformément à la norme EN13725 (résultats fournis en UO₂/m³)

Stockage interne des données

Communication filaire, USB ou Ethernet

Remarques et points de vigilance concernant le module de mesure des odeurs.

- Aucune spécification technique n'est fournie sur la documentation technique en ligne ou sur le site du constructeur qui n'a, par ailleurs, pas répondu à nos demandes d'entretien

Exemple de partenaires :

- n.c.

NeOse Pro



Aryballe
7 rue des Arts et Métiers
38000 Grenoble
France

<https://aryballe.com/>



Dimension : 24,5 x 9,8 x 4,8 cm

Applications :

Détection et identification d'odeurs dans le domaine de l'agroalimentaire, des produits cosmétiques aussi bien dans le cadre de la R&D que de l'assurance qualité. NeOse Pro est aussi employé pour les patients anosmiques.

Composants :

Technologie O-Cell constituée de 67 biocapteurs*
Logiciel pour l'analyse et la visualisation des données
Base de référence d'odeur

Fonctionnalité :

Détection des COV
Identification des odeurs par comparaison à une base de référence (analyses MDS, PCA...). Les résultats sont présentés sous la forme « odeur de plastique » ou « odeur de cigarette »
Visualisation des résultats
Correction des résultats en cas de présence d'humidité

Communication filaire ou Bluetooth

Compatible avec technologie USB 2.0, Windows 10 - 64 bits (version 1709 et suivante)

Remarques et points de vigilance concernant le module de mesure des odeurs.

*Les biocapteurs sont composés de petites molécules peptidiques, fixées sur les électrodes en or et capables d'interagir avec des molécules gazeuses par des liaisons électrostatiques. Grâce à un prisme, éclairé par des lampes LED, un signal optique est alors détecté par la technologie de résonance des plasmons de surface (SPR) et enregistré en temps réel par une caméra. L'intégration des 67 signaux donne naissance à une empreinte olfactive. Aryballe développe actuellement des nez électroniques basés sur les MOEMs (Optical Microelectromechanical systems) et non plus des molécules peptidiques (prototype disponible fin 2019). Cette évolution de la technologie devrait permettre d'améliorer la durée de vie des capteurs, de favoriser leur miniaturisation et d'en baisser le coût, ouvrant ainsi les marchés de l'automobile et de l'électroménager.

- La gamme de détection des gaz va de 100 ppb (H_2S) à 1 ppm (NH_3) (formaldéhydes = 5 ppm).
- Le seuil de détection des odeurs n'est pas fourni par le constructeur. Ce qui est normal car ce seuil sera très variable en fonction des odeurs considérées et des conditions environnementales.
- L'appareil nécessite une période d'apprentissage pour la quantification des odeurs. Trois échantillons sont recommandés.
- Le temps de vie des capteurs est de 1000 mesures ou 3 à 6 mois et devrait être augmenté avec les MOEMs.
- Coût du NeOse Pro : 12 500\$. Les nez électroniques basés sur les MOEMs seront vendus autour de 10\$

Exemple de partenaires :

- DOAC (Digital Olfaction Automotive Consortium),
 - IFF (International Flavors and Fragrances), IPSICA (La spécificité du NeOse Pro s'est montrée satisfaisante
 - RENAULT
- pour la distinction des parfums même très proches). Il pourrait être employé pour identifier les contre façons ou dans le contrôle qualité des matières premières

comon — invent

Burgemeestersrand 198a
2625 NZ Delft
Pays-Bas

<https://www.common-invent.com/>



Dimension : 12 x 16 cm

Applications :

Surveillance et monitoring de la qualité de l'air ambiant sur les sites industriels, essentiellement zone portuaire et industrie pétrochimique mais d'autres industries peuvent être concernées ainsi que la surveillance de sols pollués.

Composants :

4 capteurs MOS (Métal-Oxyde-Semiconducteur), parfois 8.

1 capteur de température et d'humidité relative

Visualisation des résultats par un logiciel dédié (Common Invent websuite)

Un anémomètre (vitesse et direction des vents) peut être associé

Les données sont transmises à un serveur distant par une connexion sans fil GPRS.

Elles y sont stockées et analysées pour fournir une empreinte olfactive.

Celle-ci est transmise par Internet sur différents appareils distants (smartphone, ordinateurs individuels, salle de contrôle).

En cas de modification du signal, une alerte est automatiquement transmise par sms et/ou email.

Fonctionnalités :

Détection d'un changement de la composition de l'air.

La mise en réseau de plusieurs nez électroniques permet de détecter précocement l'émission de gaz et de rechercher la source d'émission.

Transmission des données sur appareils distants et/ou mobiles et alertes en temps réel.

Identification de la nature de l'odeur par analyse du signal et comparaison à une base de données de référence. Cette donnée est fournie à titre indicatif, avec un pourcentage de fiabilité.

Remarques et points de vigilance concernant le module de mesure des odeurs.

- La technologie mise en œuvre, basée sur 4 capteurs MOS, est simple, robuste et low-cost. L'appareil est compacte.
- La base de référence est fournie par le constructeur (et continuellement améliorée) mais peut également être personnalisée. Dans ce cas, des échantillons sont prélevés et analysés par le nez électronique et par un jury de nez pour incrémenter de nouvelles odeurs.
- Ce nez électronique est compatible avec la norme NTA 9055: Netherlands Technical Agreement for Air Quality- Electronic Air Monitoring- Odeur (nuisance) & Safety.
- Une période d'apprentissage est nécessaire pour calibrer les nez électroniques avant leur installation puis dans leur environnement mais aussi pour former le personnel à l'interprétation des données, configurer et optimiser le réseau (notamment pour améliorer la triangulation des données et l'identification des sources). Dans le cas du Port de Rotterdam où 100 nez ont été installés initialement à l'initiative de la DCRM (*Rijkswaterstaat Environmental Protection Agency*), cette période de test a duré environ 2 ans (diminution progressive des fausses alertes) à l'issue desquels 150 nez supplémentaires ont été installés. Le réseau a également été acquis par le Port de Rotterdam, qui en assure désormais les frais. L'utilisateur final (DCRM) admet que c'est cette longue période d'apprentissage, essentiellement due à la sensibilité des appareils aux conditions environnementales et atmosphériques, qui est jugée la plus pénible.
- La maintenance est réalisée par des partenaires locaux pour les installations à l'étranger.

Exemple de clients :

- Plus de 75 réseaux opérationnels dans 20 pays différents, essentiellement dans les zones portuaires et les sites pétrochimiques
- Actuellement la DCRM travaille avec Common Invent à la mise au point d'un réseau de surveillance et de quantification des odeurs de restaurant dans les villes de la région. Dans les conditions environnementales des villes (odeurs complexes et variables), les capteurs ne sont pas assez sensibles et spécifiques pour cet usage. Les prélèvements d'air se feront donc à proximité des restaurants et les analyses seront réalisées par les nez électroniques Common Invent au laboratoire. Une solide base de référence a été conçue grâce à des analyses par nez électronique doublée d'analyses olfactométriques.
- Le bureau d'études Tauw a réalisé une étude comparative entre le nez électronique Common Invent et la WatchTower (WT1) de Rubix. Les résultats du produit Common Invent se sont révélés cohérents avec les odeurs perceptibles au nez humain. Le produit a été facile à installer et directement fonctionnel. Le résultat global était conforme aux promesses du constructeur.

RUBIX POD



Rubix S&I
3 Avenue Didier Daurat
31400 Toulouse
France

<https://www.rubixsi.com/>



Dimension : 14 x 14 x 7 cm

Applications :

Surveillance et monitoring de la qualité de l'environnement intérieur des espaces partagés (Bureaux en open space, centres commerciaux, ateliers de production, hôtels, restaurants, aéroports)

Composants :

4 capteurs MOS (Métal-Oxyde-Semiconducteur allié à un microsystème électromécanique (MEMS))
3 capteurs électrochimiques de gaz au choix (H₂S, NH₃, FA, NO₂, ...)
1 capteur laser de particules
1 capteur optique (CO₂)
Capteurs température, humidité, pression
Capteurs bruits et vibrations
Capteur lumière (intensité, couleur, scintillement)

Fonctionnalité :

Mesure des odeurs (fourni avec une base de référence contenant 200 profils d'odeurs) et des COV
Mesures de gaz spécifiques en fonction des capteurs choisis
Mesure de la taille et de la quantité de particules
Mesure de la température, de l'hygrométrie et de la pression
Mesure de la lumière (intensité, couleur, scintillement)
Mesure du bruit et des vibrations
Intégration des perceptions par une application sur smartphone, cartographie de la qualité de l'environnement intérieur, alertes en temps réel et déclenchement automatique de processus (ventilation...)

Logiciel en mode SaaS (Software as a Service)

Communication Wifi ou LoRa (longues portées à bas coût et basse consommation)

Remarques et points de vigilance concernant le module de mesure des odeurs.

- Les 4 capteurs MOS sont mis en oscillation ce qui augmente leur capacité à réagir différemment aux stimuli, la fréquence des mesures étant de 1 mesure / 28 milliseconde. Cette technologie brevetée permet d'augmenter la diversité des signaux émis et donc la spécificité de l'appareil.
- La précision de la mesure de l'intensité de l'odeur est de l'ordre de 2 à 2,5 UO selon le constructeur.
- L'appareil nécessite une période d'apprentissage pour la quantification des odeurs et/ou pour enrichir et personnaliser la base de référence. Du soin et du budget consacrés à cette période d'apprentissage dépendra la fiabilité des résultats. En effet, la période d'apprentissage peut être optimisée par l'identification des moments où l'empreinte olfactive change et qu'un prélèvement en vue d'une mesure olfactométrique est opportun. Petit à petit, à la faveur des analyses olfactométriques, un modèle de PLS multiparamétrique qui couvre les différentes natures que peut prendre l'odeur est construit.
- Le seuil de détection des odeurs n'est pas fourni par le constructeur. Ce qui est normal car ce seuil sera très variable en fonction des odeurs considérées et des conditions environnementales.
- Le temps de vie des capteurs est relativement court (de 1 à 3 ans) ce qui nécessite i) la prise en charge des phénomènes de dérive (environ 30% à 3 ans) par les algorithmes d'analyse des données, ii) une maintenance efficace, iii) une nouvelle phase d'apprentissage lors du changement de capteurs (celle-ci étant simplifiée par rapport à la phase d'apprentissage initiale)

Exemple de partenaires : ENGIE Lab Cylergie : Mise en service de 3 RUBIX POD dans des bureaux en open-space à l'occasion de travaux de rénovation : le signal varie bien lors d'épisodes odorants mais l'appareil ne fournit aucune reconnaissance ni quantification de l'odeur. Il n'a pas été connecté avec la ventilation. N'ayant pas de demande commerciale pour ce type de produit, Cylergie n'a pas poursuivi le test.

Autres exemples : domaine de l'automobile, Air France

WATCHTOWER 1



Rubix S&I
3 Avenue Didier Daurat
31400 Toulouse
France

<https://www.rubixsi.com/>



Dimension : 26 x 16 x 18 cm

Applications :

Surveillance et monitoring de la qualité de l'air ambiant sur les sites industriels, les sites de revalorisation des déchets ou dans les villes (smart city). Surveillance et monitoring de la qualité des émissions de gaz.

Composants :

4 capteurs MOS (Métal-Oxyde-Semiconducteur allié à un microsystème électromécanique (MEMS))
6 capteurs électrochimiques de gaz au choix (H_2S , NH_3 , FA, NO_2 , ...)
1 capteur PID pour BTX et alcanes
1 capteur laser de particules
1 capteur optique NDIR (CO_2 et CH_4)
Capteurs température, humidité, bruits

Logiciel en mode SaaS (Software as a Service)

Communication Wifi ou LoRa (longues portées à bas coût et basse consommation)

Fonctionnalités :

Mesure des odeurs (fourni avec une base de référence contenant 200 profils d'odeurs) et des COV

Mesures de gaz spécifiques en fonction des capteurs choisis

Mesure du bruit et de la taille et de la quantité de particules

Alertes en temps réel et déclenchement automatique de processus de contrôle

Intégration des perceptions sensorielles du voisinage grâce à une application sur smartphone

Visualisation des impacts sur le voisinage grâce à un logiciel de dispersion intégrant les données météorologiques

Remarques et points de vigilance concernant le module de mesure des odeurs.

- Les 4 capteurs MOS sont mis en oscillation ce qui augmente leur capacité à réagir différemment aux stimuli, la fréquence des mesures étant de 1 mesure / 28 milliseconde. Cette technologie brevetée permet d'augmenter la diversité des signaux émis et donc la spécificité de l'appareil.
- La précision de la mesure de l'intensité de l'odeur est de l'ordre de 2 à 2,5 UO selon le constructeur.
- L'appareil nécessite une période d'apprentissage pour la quantification des odeurs et/ou pour enrichir et personnaliser la base de référence. Du soin et du budget consacrés à cette période d'apprentissage dépendra la fiabilité des résultats. En effet, la période d'apprentissage peut être optimisée par l'identification des moments où l'empreinte olfactive change et qu'un prélèvement en vue d'une mesure olfactométrique est opportun. Cet échantillonnage peut être automatisé et complété par des mesures olfactométriques de terrain. Petit à petit, à la faveur des analyses olfactométriques, un modèle de PLS multiparamétrique qui couvre les différentes natures que peut prendre l'odeur est construit.
- Le seuil de détection des odeurs n'est pas fourni par le constructeur. Ce qui est normal car ce seuil sera très variable en fonction des odeurs considérées et des conditions environnementales.
- Le temps de vie des capteurs est relativement court (de 1 à 3 ans) ce qui nécessite i) la prise en charge des phénomènes de dérive (environ 30% à 3 ans) par les algorithmes d'analyse des données, ii) une maintenance efficace, iii) une nouvelle phase d'apprentissage lors du changement de capteurs (celle-ci étant simplifiée par rapport à la phase d'apprentissage initiale)

Exemple de partenaires :

- Véolia, Bouygues, JCDecaux, CMI environnement, Tauw
- Aussi Air France, filiale de TOTAL

En partenariat avec RUBIX S&I, la société Lab Service Analytica (Anzola Emilia, Italie) a développé un produit (OdorPrep®) associant la WT1 (RUBIX) et un échantillonneur (Figure ci-contre). L'échantillonnage se déclenche lorsque le signal fourni par la WT1 dépasse un certain seuil mais il peut aussi être commandé à distance, en cas de plainte signalée grâce à une application mobile, également fournie par les concepteurs d'OdorPrep®.



Figure 23 - OdorPrep® présenté lors de la 6th International Conference on Environmental

EOS Ambiente



Sacmi Imola S.C.
Via Selice Prov.le , 17/A
40026 Imola (BO)
Italie

<https://www.sacmi.com/>



Dimension :
86 x 115 x 45 cm

Applications :

Surveillance et monitoring en continu des odeurs sur sites industriels (Usine de traitement des eaux usées et des déchets, compostage, incinérateurs, fabrication de biogaz, distilleries, élevages, industrie pétrochimique...)

Composants :

Échantillonneur pneumatique

6 capteurs MOS (Métal-Oxyde-Semiconducteur) placés dans une cellule thermostatique (technologie brevetée). Chaque MOS est constitué d'un oxyde métallique différent.

1 station météorologique (température, humidité, vitesse et direction des vents +/- baromètre et pluviomètre)

Microprocesseur et un logiciel de contrôle des mesures

Fonctionnalité :

Détection et identification des odeurs

Quantification des odeurs après corrélation avec des mesures effectuées conformément à la norme EN13725 (résultats fournis en UO_v/m³)

Stockage interne des données

Communication filaire, USB ou Ethernet

Remarques et points de vigilance concernant le module de mesure des odeurs.

- La gamme de détection va de 0 à 1000 UO_v/m³

Exemple de partenaires :

- n.c.

ODOR CATCH



Scientec Lab Center Co., LTD
Suite N° B121, Hanshin S Meca,
65, Techno 3-ro
Yuseong Gu, Daejeon, 34016
Korea

<http://www.sclab.co.kr/eng/>

Dimension :
42 x 33 x 66 cm



Dimension :
35 x 35,8 x 10,8 cm



Applications : Surveillance et monitoring de la qualité de l'air ambiant (usines de traitement des eaux usées, des déchets, sites industriels, élevages...). Prévion des nuisances olfactives en fonction de données météorologiques (température, humidité, vitesse et direction des vents).

Composants :

2 capteurs MOS (Métal-Oxyde-Semiconducteur) : Odeurs et COVs
2 capteurs électrochimiques de gaz au choix (H₂S, NH₃)
En option :
1 capteur laser de particules
1 PID (COV)
1 station météorologique (température, humidité, vitesse et direction des vents)
Capteurs MOS additionnels
Jusqu'à 20 capteurs peuvent être intégrés

Fonctionnalité :

Mesure des odeurs et des COV
Mesures de gaz spécifiques (H₂S, NH₃) et en fonction des capteurs MOS optionnels (CO, CO₂, O₃, NOx et gaz toxiques)
Mesure de la taille et de la quantité des particules (PM2,5 et PM10)
Intégration des données météorologiques pour une prévion des nuisances olfactives

Stockage des données sur une carte 4GBSD et sur un disque dur interne Communication filaire ou Wifi

Remarques et points de vigilance concernant le module de mesure des odeurs.

Type de capteur	MOS	Cellule électrochimique		MOS	PID (capteur optionnel)
Gaz mesuré	Odeur	H ₂ S	NH ₃	COV	COV
Gamme de mesure	1-50 UO	0-5ppm	0-25ppm	1-20ppm	0-20ppm

- La calibration se fait entièrement en usine avec une base de données de référence interne
- Coût de l'appareil fixe de l'ordre de 15000€

Exemple de partenaires :

- VEDLIA Innovation : résultats satisfaisants lors d'un test comparatif avec plusieurs nez électroniques

SYNTHESE DE LA PARTIE 5.3

Principaux produits du marché

En dépit de l'enthousiasme initial pour les nez électroniques et leurs potentielles applications dans divers secteurs, et des nombreux résultats prometteurs visibles au travers de la bibliographie scientifique, des critiques émergent. En effet, l'utilisation réelle des nez électroniques est encore marginale, et les développements décrits dans la bibliographie scientifique n'ont débouché que sur une faible quantité d'applications réelles ou de technologies réellement développées (Boeker, 2016).

Selon certains auteurs (Boeker, 2016), les applications actuelles les plus importantes des nez électroniques concernent l'industrie agro-alimentaire telles que la surveillance des processus industriels, l'évaluation de la fraîcheur et l'authenticité des matières premières, ce que nous n'avons pas pu confirmer au cours de nos entretiens, ou la gestion des odeurs autour des sites industriels.

De nombreuses autres applications existent mais peinent à se concrétiser. Pour cela, les nez électroniques devraient répondre aux critères suivants :

- Donner des résultats de manière simple et rapide à l'issue de la période d'apprentissage ;
- Avoir une grande plage de mesure (seuil-saturation) ;
- **Résister aux différentes interférences possibles (humidité, température, vent, molécules interférentes) ;**
- Fournir des résultats stables et répétables (reproductibilité intra-machine) ;
- **Fournir des résultats reproductibles (reproductibilité inter-machine) ;**
- Offrir la possibilité de corriger la dérive temporelle ;
- Être facile à manipuler, portable et **robuste**.

Chacun de ces critères peut présenter une limite aux nez électroniques, mais cette ou ces limite(s) doit(vent) être minimisée(s). Elles dépendent essentiellement de 3 facteurs :

- Les conditions environnementales de l'analyse ;
- Les propriétés des capteurs ;
- L'efficacité du traitement du signal.

Ces limites sont observables pour l'ensemble des produits disponibles sur le marché, et freinent leur utilisation en routine. De plus, l'apprentissage est une étape longue et fastidieuse qui doit être renouvelée régulièrement du fait de la durée de vie limitée des capteurs.

Une des difficultés concerne également la relation entre l'odeur et les composés chimiques qui en sont à l'origine. Il est ainsi difficile de corréler un signal électrique avec les composés odorants et des odeurs perçues par le nez humain. Ainsi, un réseau de capteurs ne peut pas fournir des données intéressantes pour des composants inconnus (Shankaran et al., 2012).

5.4 Les technologies dites concurrentes et leurs applications

Face à une nuisance olfactive, plusieurs approches (sensorielle, instrumentale ou senso-instrumentale) peuvent être employées pour caractériser des situations parfois complexes. Les outils de surveillances des nuisances olfactives sont, aujourd'hui encore, essentiellement basés sur des observations « humaines » (Merlen, 2017). Ces méthodes permettent de déterminer un niveau et une fréquence de gêne ainsi qu'une concentration d'odeur ou encore une description parfois partagée des odeurs perçues.

Les paragraphes suivants décrivent les différentes approches concurrentes des nez électroniques qui peuvent être mises en œuvre face à une nuisance olfactive.

5.4.1 Méthodes *online* (de laboratoire)

Elle est fondée sur la séparation des constituants présents dans un mélange odorant. Elle fournit deux informations : d'une part, quantitative, car une séparation préalable des produits facilite la détermination de leur concentration et, d'autre part, qualitative en identifiant chaque composé à partir de son spectre de masse spécifique. Son emploi depuis les années 1980 a révolutionné le monde de la chimie analytique et en particulier les secteurs dédiés à l'étude des arômes. Actuellement, cette méthode continue à faire ses preuves dans le domaine de l'agroalimentaire mais aussi dans bien d'autres domaines tels que l'environnement, la pétrochimie, la cosmétique etc. Cependant, cette approche présente une limite majeure en dehors même de considérations économiques et de sa longueur de mise en œuvre. Cette technique ne permet pas de déterminer la nature de l'odeur globale telle qu'elle est perçue lors d'une analyse sensorielle. En effet, elle ne tient pas compte des synergies ou des antagonismes qui peuvent exister entre les composés présents dans le mélange odorant. Par ailleurs, l'intensité d'une odeur n'est pas toujours proportionnelle à la concentration d'un ou de plusieurs composés. Il est courant qu'une molécule présente en très faible quantité soit responsable d'une odeur très intense et très caractéristique comme c'est le cas du 2,4,6-trichloroanisole dans le vin. A l'inverse, il arrive souvent qu'une molécule ayant un pic chromatographique intense ne soit responsable d'aucune odeur.

5.4.1.1 La spectrométrie de masse

La spectrométrie de masse (MS) est un concurrent direct du nez électronique. Elle permet en effet d'identifier et de quantifier les COVs, de manière rapide, avec une résolution temporelle fine et une sensibilité élevée. C'est la seule méthode permettant de définir la composition chimique d'un mélange gazeux odorant ou non. En revanche, elle ne permet pas d'extrapoler l'odeur véhiculée par ce mélange.

Cette technique comporte grossièrement 4 étapes :

- L'ionisation chimique des molécules gazeuses par des ions précurseurs ;
- La séparation des ions émis en fonction de leur rapport masse/charge ;
- Leur quantification, (le signal électrique est proportionnel à leur abondance relative) ;

- L'amplification du signal et son traitement informatique pour fournir un résultat : le spectre de masse. L'identification des molécules analysées se fait par comparaison du spectre obtenu à des spectres enregistrés dans des banques de spectre de référence.

La MS nécessite certaines conditions d'affinité entre les ions précurseurs et les objets d'analyses. Cette technique est coûteuse et est généralement mise en œuvre au laboratoire. Elle est fréquemment couplée à la chromatographie en phase gazeuse (GC). Cette dernière permet de séparer les composés d'un échantillon en fonction de leur temps de rétention dans une colonne capillaire, la spectrométrie de masse étant ensuite mise en œuvre pour détecter et identifier ces molécules en fonction de leur rapport masse sur charge.

5.4.1.2 La spectrométrie par mobilité ionique (FAIMS)

La spectrométrie de mobilité ionique asymétrique sur site (FAIMS) est une variante de la spectrométrie de mobilité ionique - une méthode permettant de distinguer les molécules gazeuses chargées en fonction de la vitesse de défilement des molécules dans un gaz tampon sous l'influence d'un champ électrique oscillant.

La figure 24 montre trois ions présentant tous des comportements de mobilité différents sous l'influence du champ électrique. La trajectoire de deux ions entre en collision avec des parois. Toutefois, la tension continue appropriée est appliquée sur la trajectoire du troisième ion, ce qui signifie qu'elle traverse le dispositif. Le dispositif FAIMS analyse ces tensions continues, produisant un spectre de champ de compensation pour la transmission de tous les ions.

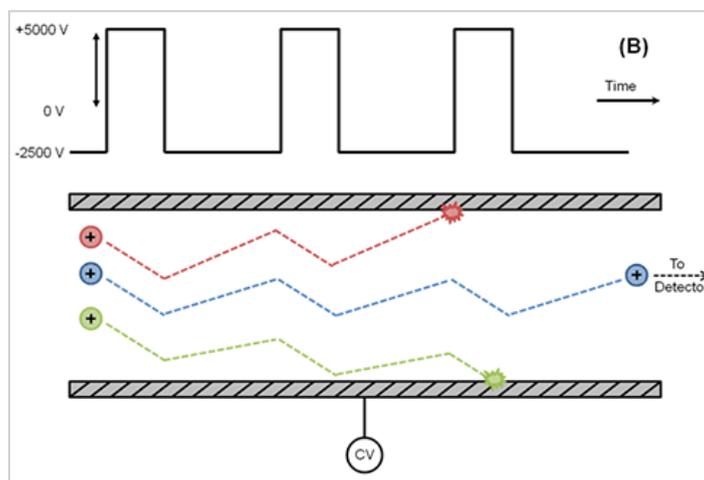


Figure 24 – Représentation schématique du principe de la spectrométrie par mobilité ionique

La sensibilité du FAIMS lui permet de détecter les COVs à des concentrations inférieures au ppb (partie par milliard). La FAIMS est une technique sélective, ce qui lui permet d'ignorer le bruit, et de détecter les COV d'intérêt avec une faible incidence de faux positifs.

Cette méthode peut être intégrée dans des appareils portables. Idéalement, il s'agit de dispositifs simples et robustes pouvant être utilisés par du personnel non professionnel. De plus, le dispositif FAIMS peut être utilisé en laboratoire et couplé à un spectromètre de masse classique pour permettre

l'identification de COV de manière plus précise. Cependant, elle ne reconnaît pas l'ensemble des molécules odorantes et est très coûteuse.

5.4.2 Les réseaux de capteurs spécifiques

5.4.2.1 **Combinaison de capteurs spécifiques**

L'utilisation de capteurs spécifiques ou de réseaux de capteurs spécifiques (électrochimiques, PID, procédés infrarouges non-dispersifs) permet de suivre l'évolution temporelle des concentrations d'un gaz spécifique (H_2S , NH_3 , O_3 , NO_2 , CO , SO_2 ...), ou d'un ensemble de COVs en temps réel.

Les limites de détection de ces capteurs sont globalement bien plus basses que celles des nez électroniques (de l'ordre du ppb ou ppm en fonction des gaz). La détection des composés cibles est réalisée grâce à la résistivité, au potentiel, à la conductivité ou la couleur. Ils sont peu onéreux. Cependant, étant spécifiques, ces capteurs nécessitent d'avoir une connaissance extrêmement précise de l'environnement de mesure et des molécules recherchées. Enfin ils ne détectent ni ne mesurent des odeurs mais des gaz odorants. Ils peuvent être employés seuls (comme c'est le cas dans l'exemple ci-dessous) ou être associés à des capteurs non spécifiques.

L'association chargée de la surveillance de la qualité de l'air en Martinique, Madinin'Air, a mis en place, depuis janvier 2016, 12 capteurs de marque CAIRPOL à proximité du littoral. Ces capteurs sont spécifiques et associent des PID et des cellules électrochimiques. L'objectif est de mesurer et d'informer les habitants en temps réel des teneurs en sulfure d'hydrogène en réponse aux nuisances causées par l'échouage des sargasses sur les côtes.

5.4.2.2 **Les procédés infrarouges non-dispersifs (NDIR)**

Le principe de cette technologie repose sur le fait qu'un gaz a des caractéristiques d'absorption de la lumière infrarouge (IR) qui lui sont propres. Un rayonnement infrarouge est émis à travers une cellule d'échantillonnage dans laquelle le gaz à analyser est introduit. Le gaz absorbe certaines longueurs d'onde en fonction de sa composition. La lumière émise en sortie de cellule d'échantillonnage est filtrée de manière à ce que seules les longueurs d'onde qui ont été absorbées par le gaz d'intérêt soient émises. Un détecteur IR mesure ensuite la quantité d'énergie transmise et émet un signal électronique proportionnel à la quantité d'énergie IR absorbée et donc à la concentration du gaz (Figure 25).

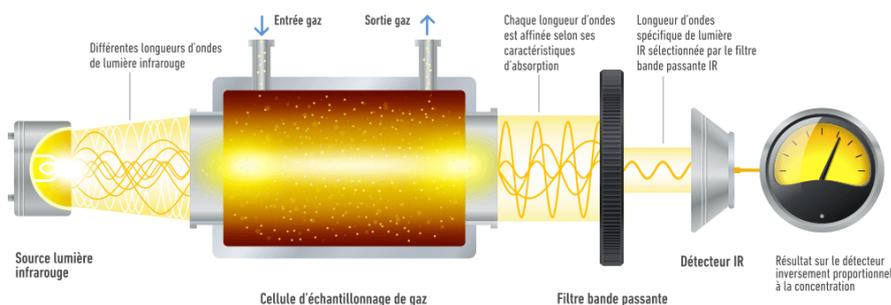


Figure 25 – Principe technique des NDIR

Les principales caractéristiques des NDIR sont résumées dans le tableau 8.

Application(s)	Détection de COV : suivi de la qualité de l'air intérieur
Avantage(s)	Précis, sensible, peu sensible aux interférences, durée de vie longue
Inconvénient(s)	Cette technique ne permet pas de déterminer la quantité exacte de molécules volatiles. Peu d'application possible : détection des COVs uniquement Imprécis avec les COVs de faible poids moléculaire
Prix	Environ 1000€

Tableau 8 - Principales caractéristiques des NDIR

5.4.3 Méthodes sensorielles

5.4.3.1 *Olfactométrie dynamique*

L'olfactométrie dynamique est une méthode dite normée (norme NF EN 13725), et donc de référence. Elle mobilise un jury d'observateurs appelé jury de nez. Chaque membre du jury est mis en présence d'une atmosphère odorante et note l'intensité perçue. Cette intensité est déterminée par comparaison avec une gamme de références ; Les réponses de l'ensemble du jury sont regroupées, et analysées (traitement statistique) pour donner une valeur à l'intensité odorante.

Cette technique permet aussi la mesure du seuil olfactif, à savoir le facteur de dilution à appliquer à un effluent pour que ce dernier soit détecté comme odorant par 50% des membres du jury. Cette méthode est onéreuse, nécessite de réaliser un échantillonnage sur site puis des analyses au laboratoire (mobilisation d'une équipe de panélistes formés, équipements (Figure 26) et ne fournit que des résultats ponctuels. En outre, on observe des écarts importants entre les réponses des différents panélistes, qui, même s'ils sont intégrés lors des traitements statistiques, engendrent une incertitude non négligeable.

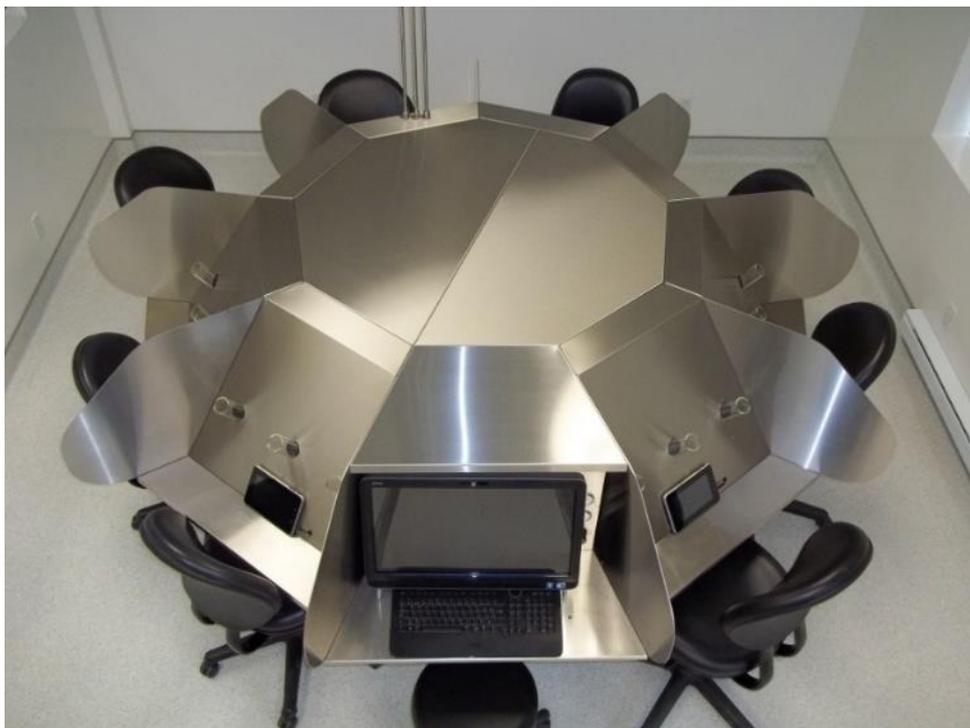


Figure 26 – Laboratoire d’olfactométrie

L’olfactométrie dynamique permet de mesurer des odeurs « moyennes » (issues d’un échantillon prélevé pendant quelques minutes sur site). Ces odeurs peuvent être inférieures au seuil de perception alors que des pics odorants sont bien perceptibles (Otte and Nicolas, 2005).

En revanche l’olfactométrie a l’avantage de prendre en compte les phénomènes d’inhibition et d’exacerbation des odeurs dus aux interactions entre molécules odorantes et la muqueuse olfactive et bénéficie de la sensibilité du nez humain.

Le bureau d’étude et laboratoire OLENTICA a développé une méthode permettant d’évaluer l’acceptabilité des odeurs sur la base de la concentration d’odeur mesurée conformément à la norme EN 13725. Cette notion d’acceptabilité permet ensuite de déterminer le potentiel de nuisance des sources odorantes pour une gestion plus précise des pollutions olfactives.

5.4.3.2 Olfactométrie de terrain

L’olfactométrie de terrain permet de déterminer l’étendue du panache odorant, donnée primordiale pour l’évaluation des nuisances olfactives. La variation de la source d’émission, les conditions météorologiques et topologiques impactent directement la dispersion des composés odorants. Deux méthodes normées encadrent l’olfactométrie de terrain depuis 2016 :

- Méthodologie de maillage (NF EN 16841-1)(CEN/TC 264 2016a)
- Méthodologie de panache (NF EN 16841-2)(CEN/TC 264 2016b)

Ces deux méthodes font appels à un jury de nez formés, et dont les critères de sélection se basent sur la sensibilité des membres du jury au n-butanol.

La méthode de maillage est une méthode statistique qui détermine la distribution de la fréquence d'heures odorantes, dans une zone d'évaluation et pour des conditions météorologiques locales. Sur le long terme, cette méthode permet de déterminer l'exposition des habitants à une odeur identifiée sur une zone d'évaluation précise fixée avant le début de la mesure (Merlen, 2017). Cette opération se fait soit de manière statique avec des jurés qui se positionnent sur des perpendiculaires à la direction du vent depuis la source odorante étudiée (Figure 27), soit de manière dynamique en se déplaçant en zigzag de façon à rentrer puis à sortir de la zone du panache odorant (Figure 28). Cette méthode permet d'avoir des éléments rapidement et pour un coût nettement plus abordable que l'olfactométrie dynamique. Elle nécessite néanmoins l'installation d'une station météo au niveau de la source pour vérifier notamment les conditions de vent (vitesse, direction, variation de la direction) pendant les heures de mesure. Les jurés qui interviennent dans l'environnement sont sélectionnés comme pour l'olfactométrie (sensibilité dite normale vis-à-vis du n-butanol) et sur la capacité à distinguer l'odeur étudiée (reconnaissance de l'odeur). Cette nouvelle méthode permet de cartographier la présence d'odeurs sous certaines conditions météorologiques, et représente un réel complément par rapport aux observations de terrain faites sans une approche aussi rationnelle (J-M Guillot, s.d.).

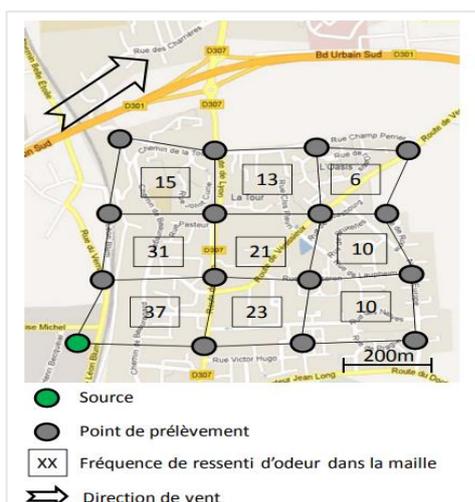


Figure 27 : Olfactométrie de terrain par maillage
(Merlen, 2017)

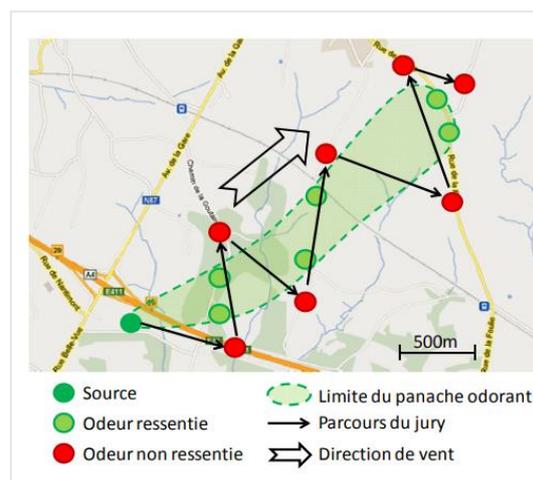


Figure 28 : Olfactométrie de terrain par recherche de panache odorant

Application(s)	Surveillance des nuisances olfactives autour des zones industrielles, sur site.
Avantage(s)	Performance, modélisation, reproductibilité
Inconvénient(s)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Problèmes si appliqués aux substances toxiques, ou émanant une odeur nauséabonde (contrôle qualité) ; ➤ Coûteux ; ➤ Demande une compétence technique importante ; ➤ Compliqué dans la mise en place ; ➤ Problème de résolution temporelle ; ➤ Disponibilité des nez humains.
Prix	Relativement élevé

Tableau 9 - Principales caractéristiques de l'olfactométrie (RECORD 2020)

5.4.4 Méthode senso-instrumentale

5.4.4.1 Chromatographie en phase gazeuse couplée à l'olfactométrie

La chromatographie en phase gazeuse (GC) couplée à l'olfactométrie met en œuvre à la fois un instrument (le chromatographe) et un détecteur humain. En effet, le flux sortant de la colonne du chromatographe est divisé en deux courants :

- Le premier est dirigé vers un détecteur physique (détecteur à ionisation de flamme, spectromètre de masse ou autre) et génère un chromatogramme ;
- Le second courant est amené vers le nez d'un évaluateur qui décrit ses perceptions olfactives en fonction du temps, et produit ainsi un olfactogramme.
-

En superposant les deux résultats, on peut repérer les signaux du chromatogramme correspondant à des composés odorants.

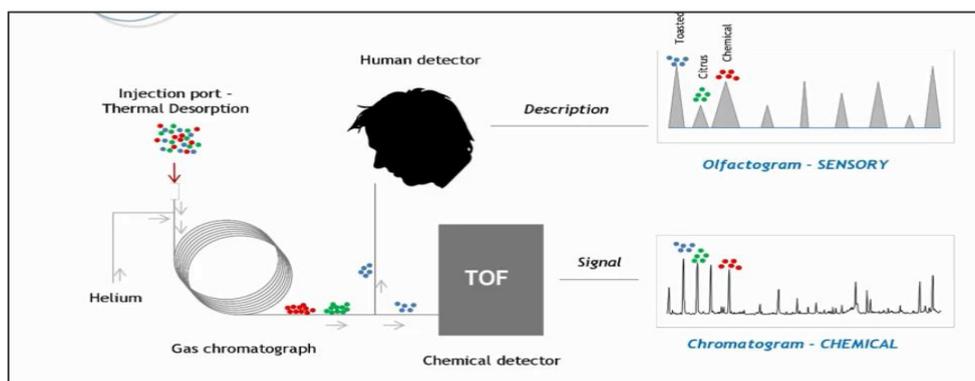


Figure 29 - Principe du couplage de la chromatographie en phase gazeuse et de l'olfactométrie (source : Sensigent)

Application(s)	Identification de molécules odorantes Quantification de molécules odorantes
Avantage(s)	Précision, répétabilité, sensibilité
Inconvénient(s)	Coûteux, non portable

Tableau 10 - Principales caractéristiques de la chromatographie en phase gazeuse couplée à l'olfactométrie

5.4.5 Implication des riverains

5.4.5.1 Le principe

Une manière d'apprécier l'exposition et la nuisance olfactive est d'impliquer les riverains. Si l'enquête ponctuelle ou le relevé des plaintes s'avèrent être des outils précieux, l'approche la plus fiable est probablement celle des riverains-vigies. Les vigies constituent un panel de personnes choisies dans la population, en général des bénévoles, qui s'engagent à porter des jugements sur la nuisance odorante à intervalles réguliers et étalés sur de longues périodes, de quelques mois à une année voire plus. Il s'agit d'utiliser les habitants d'une région concernée, dans leur environnement, et de leur poser une série de questions simples sur la perception de l'odeur, par exemple deux fois par jour et tous les jours sur l'année. Si les réponses sont suffisamment objectives, exhaustives et fiables, cette méthode a l'avantage de collecter non seulement les épisodes-odeur, mais également tous les cas où l'odeur n'était pas perceptible.

Sans devoir participer à une formation poussée tel que les jurys de nez d'experts, les volontaires issus des riverains ou employés par l'entreprise polluante peuvent, après avoir reçu une information détaillée sur les nuisances olfactives et une formation courte sur l'évaluation des odeurs ressenties, participer à des mesures sensorielles. Les informations ainsi recueillies concernent le caractère hédonique de l'odeur, la gêne ressentie, l'intensité de l'odeur et sa nature. Le vocabulaire des riverains sur la nature des odeurs spécifiquement ressentie dans leur zone est souvent assez consensuel par le fait qu'ils y

5.4.5.2 L'exemple du Havre

Le Havre est entouré d'une zone industrielle active depuis les années 1970. Cette zone comprend une usine Renault, une raffinerie Total, un grand port etc. La ville du Havre et les villes environnantes ont connu une activité portuaire et industrielle croissante. Cependant, comme pour beaucoup de villes adjacentes à des zones industrielles (cf. Rotterdam), cette croissance s'accompagne de l'émission d'odeurs nauséabondes qui perturbent la vie des citoyens, et qui constituent un frein important tant au niveau de la qualité de vie, qu'au niveau du développement économique.

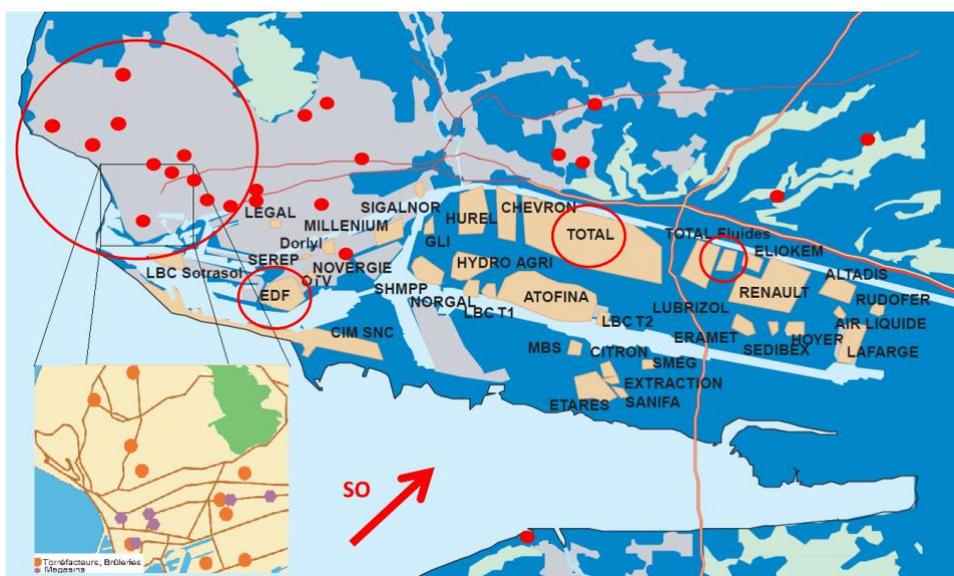


Figure 31 - Carte de la zone industrielle du Havre (Merlen, 2017)

Il n'est pas possible de mener des analyses chimiques en permanence. Ainsi, un réseau de nez s'est développé grâce à Atmo Normandie. Ce réseau est composé de près de 200 riverains et experts industriels qui étudient et rapportent la nature, l'intensité et le caractère hédonique des odeurs présentes dans l'air ambiant grâce au langage des nez®. La figure ci-dessous illustre le portrait olfactif universel de Notre Dame de Gravenchon, en Normandie, en France, montrant l'évolution du caractère de l'odeur de 2001 à 2012.

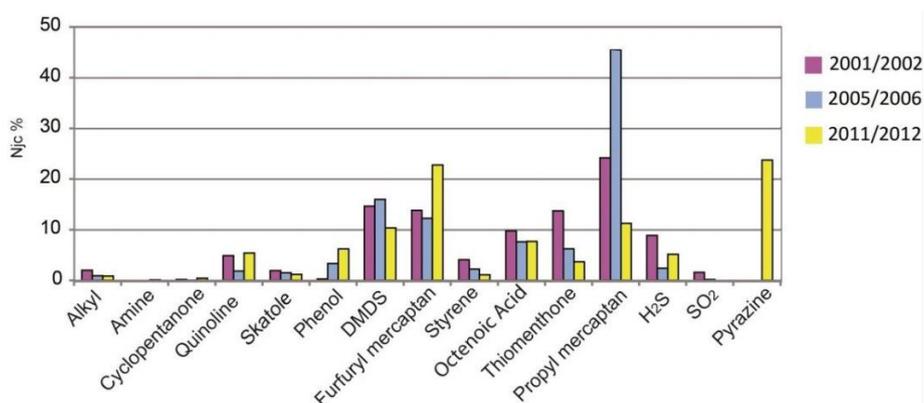


Figure 32 : Portrait olfactif de Notre Dame de Gravenchon 2001-2012 (Merlen, 2017)

5.4.6 Modélisation

On a vu ci-avant qu'il n'était pas forcément évident d'évaluer sur le terrain les odeurs et leurs nuisances. Si une mesure par olfactométrie à la source peut être relativement simple, une mesure dans le milieu récepteur requiert plus de moyens et d'expertise. Un recours à la modélisation peut alors se justifier. La modélisation, va permettre à partir des débits d'odeurs à la source, de la topographie d'une zone d'étude et de paramètres météorologiques, d'estimer la dispersion d'un panache odorant et de désigner des zones de concentrations d'odeur et des zones de bruit de fond. Les logiciels de modélisation sont des outils décisionnels importants pour accompagner les industries et les collectivités dans le pilotage de leurs installations en vue de limiter l'impact des odeurs ou de déterminer les valeurs limites d'émissions à la source n'engendrant aucune nuisance olfactive.

Les modèles sont basés sur l'utilisation de modèle gaussien, eulérien ou à bouffées gaussiennes. Plusieurs paramètres sont à prendre en compte lors de la sélection d'un modèle : la situation géographique, les objectifs de l'étude (impact olfactif ou dimensionnement de la source), les données et la puissance de calcul disponibles et les ressources financières allouées pour l'étude. (Merlen, 2017)

Le modèle gaussien est le modèle le plus utilisé du fait de sa simplicité à mettre en place. Il est particulièrement intéressant pour les sites sans relief, à l'inverse des modèles eulériens pertinents pour les sites accidentés. Les modèles à bouffées gaussiennes prennent mieux en compte les variations des conditions météorologiques et des émissions. Cependant, il existe plusieurs situations dans lesquelles la modélisation de la dispersion est difficilement applicable, par exemple en raison de la difficulté de caractériser de manière appropriée le taux d'émission d'odeur provenant de la source, en raison de sa configuration (source diffuse) ou de la discontinuité des émissions. En outre, il convient de toujours garder à l'esprit les limites de la modélisation de la dispersion, puisqu'un modèle mathématique, aussi sophistiqué soit-il, ne doit jamais être interprété comme une «vérité», mais tout au plus comme une bonne représentation de cause à effet de phénomènes particuliers, impliquant un degré d'incertitude intrinsèque, nécessitant donc une validation.

Les nez électroniques peuvent alimenter ces modèles en fournissant des données en continu, à proximité ou à distance de la source d'émission en fonction des besoins

La figure 33 ci-après illustre les données d'entrée et de sortie des modèles de dispersions.

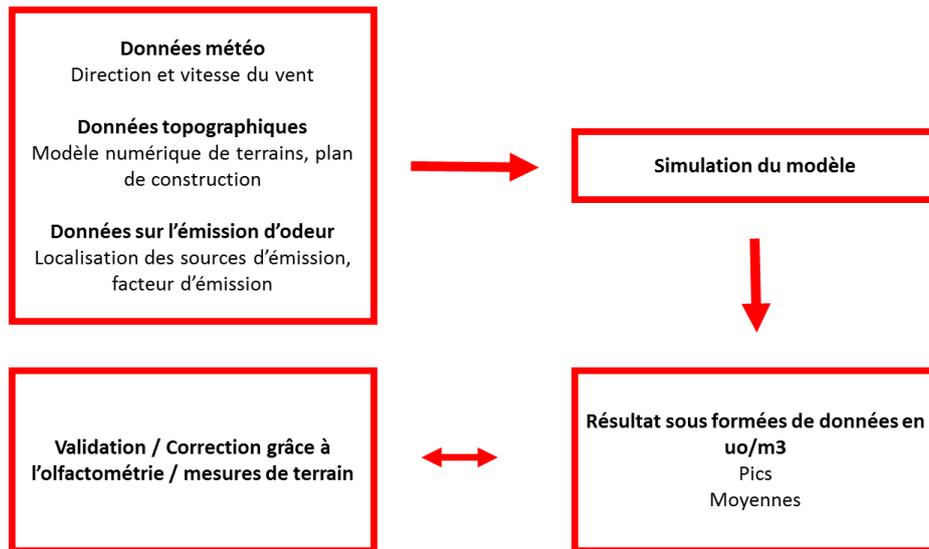


Figure 33 - Principe des modèles de dispersion (RECORD 2020) (basé sur rapport OMNISCIENTIS)



Figure 34 - Exemple de modèle de dispersion (porcherie) (Rapport OMNISCIENTIS)

5.4.7 Des méthodes complémentaires ?

Les différentes méthodes présentées ci-avant présentent chacune des avantages et des inconvénients. Ainsi, l'olfactométrie dynamique permet la caractérisation des sources d'émissions d'odeurs. Cependant, elle présente divers biais liés à la sélection du jury (âge, sexe, état psychologique, conditions de vie). De plus, elle est ponctuelle et ne permet pas l'identification des composés chimiques responsables de l'odeur.

Les techniques instrumentales présentent d'autres avantages et inconvénients. Ainsi, les méthodes *online* permettent d'identifier et quantifier les molécules présentes dans un échantillon de gaz mais elles ne sont pas mobilisables sur site et sont ponctuelles et coûteuses.

Les réseaux de capteurs sont moins onéreux, peuvent être installés sur site et fournir des données en continu ou à haute fréquence temporelle mais leurs performances (sensibilité, spécificité, robustesse, répétabilité) sont plus ou moins limitées en fonction des conditions environnementales.

Par conséquent, il semble judicieux d'adopter une méthode combinant plusieurs de ces procédés choisis pour leur complémentarité en fonction des objectifs visés (Figure 35).

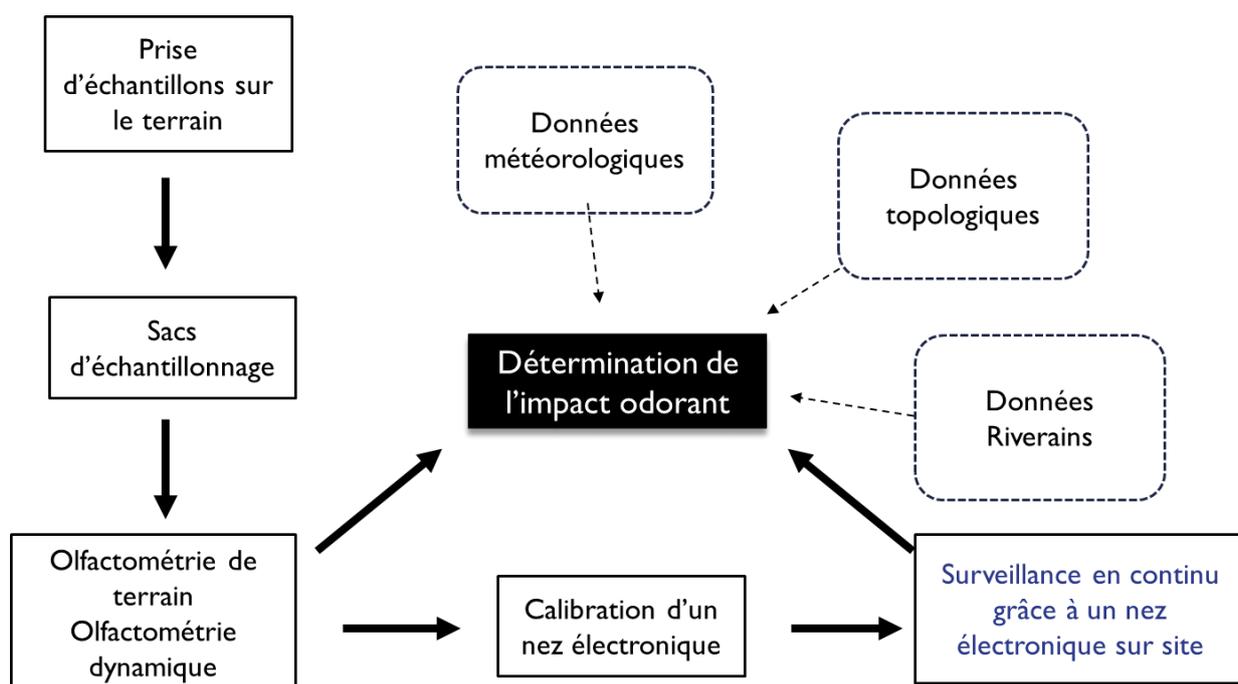


Figure 35 : Interaction entre les différentes méthodes mobilisables pour la surveillance des odeurs (RECORD 2020)

5.4.8 Positionnement des nez électroniques en fonction des secteurs d'application

En fonction des secteurs d'application, les nez électroniques peuvent présenter des avantages ou des inconvénients par rapport aux autres technologies et méthodes existantes. Les avantages et inconvénients présentés dans cette partie sont synthétisés sous forme d'un tableau SWOT en fin de chapitre.

5.4.8.1 Avantages

Les nez électroniques sont les seuls instruments capables d'évaluer et de caractériser une odeur, et ainsi d'en comprendre l'origine. Ce sont aussi les seuls appareils capables de mesurer la concentration d'une odeur (Capelli et al. 2014) même si le terme de « mesurer » est abusif comme nous l'avons vu. Ils peuvent néanmoins fournir un résultat en UO/m³ après calibration avec des mesures olfactométriques.

En effet, la mesure au laboratoire de composés odorants (chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse) ne rend pas toujours compte de l'odeur qui en résulte, surtout lors de mélanges complexes.

L'olfactométrie dynamique, bien qu'étant la seule méthode de référence (CEN/TC264 2003) pour quantifier la concentration des odeurs (en unités d'odeur par m³), a aussi ses limites. C'est une méthode d'analyse ponctuelle, relativement lourde à mettre en œuvre et coûteuse. Bien que normée, elle est caractérisée par une forte incertitude. Elle n'est parfois pas très adaptée aux mesures des odeurs au niveau des récepteurs ni à l'évaluation de l'exposition aux odeurs car les concentrations d'odeur à ce niveau sont souvent faibles et les odeurs difficilement distinguables au sein de l'air ambiant (Capelli et al. 2014).

Les nez électroniques permettent en outre d'obtenir des résultats rapidement voire en temps réel, en continu et sur le terrain. Ils ne nécessitent pas l'intervention de personnel formé aux techniques de laboratoire. Ils peuvent aussi être intégrés à une chaîne de production.

Les nez électroniques peuvent être couplés à des robots mobiles, permettant ainsi de mesurer les odeurs et leur distribution spatiale (Capelli et al. 2014). L'olfaction mobile robotisée semble ouvrir un nouveau champ d'application prometteur pour les nez électroniques. Ils peuvent également être couplés à la modélisation de la dispersion des odeurs, méthode intéressante pour la plupart des activités responsables de l'émission d'odeurs.

5.4.8.2 Inconvénients

La sensibilité des nez électroniques fait souvent débat. Elle dépend en premier lieu du type de capteurs, des conditions environnementales (la sensibilité déterminée au laboratoire sera différente de celle mesurée *in situ*), des molécules cibles mais elle dépend surtout du contexte et ne sera pas la même si on parle de détection d'un gaz simple ou d'une odeur. Ce dernier élément est souvent source d'ambiguïté. Un capteur peut avoir un seuil de détection de l'ordre du ppb et être considéré à ce titre comme sensible, et proche du seuil de détection humain (par exemple pour l'H₂S) ; en général, le seuil de détection du capteur est supérieur au seuil de détection humain et quand le capteur non sélectif du nez le détecte, cela peut correspondre à une concentration d'odeur de plusieurs centaines d'uo/m³, et donc à une sensibilité médiocre en terme de mesure d'odeur.

Les nez électroniques sont en général moins spécifiques que le nez humain (Guillot et Luillery 2017). En effet, les capteurs qui entrent dans la composition des nez électroniques, mêmes s'ils sont nombreux

et complémentaires ne peuvent rivaliser avec la grande diversité des récepteurs olfactifs de l'épithélium humain.

Les nez électroniques nécessitent de mettre au point des algorithmes de reconnaissance des odeurs. Cette phase d'apprentissage implique la mise à disposition d'un jeu de données d'apprentissage et du temps pour que l'appareil puisse reconnaître et classer les odeurs cibles. Le soin apporté à cette étape conditionne la spécificité et la fiabilité des résultats.

Les phénomènes de dérive représentent un frein majeur à l'utilisation des nez électroniques en milieu industriel. Ils sont la principale cause de la baisse de la répétabilité, la robustesse et la spécificité des résultats au cours du temps. Les principaux facteurs sont l'humidité, la température ambiante, la présence d'autres gaz, odorants ou non (Capelli et al. 2014; Louffi et al. 2015), le développement de moisissures (Wilson 2018). En entrant en compétition avec les molécules à la surface des capteurs, les molécules d'eau ou de certains gaz parasites impactent sévèrement les résultats et sont la cause fréquente des écarts entre les résultats des nez électroniques obtenus au laboratoire et sur le terrain. Ces phénomènes de dérive obligent à des re-calibrations périodiques des appareils ou la mise en place de systèmes d'alerte quant à la fiabilité des résultats. Ils aboutissent aussi parfois à l'installation du nez électronique dans un laboratoire mobile sur le site étudié.

Il existe aussi des facteurs internes pesant sur la robustesse et la fiabilité des nez électroniques : les variations de la structure cristalline des matériaux (taille et orientation des matériaux), les variations de concentration des nanoparticules, le contact et l'épaisseur des matériaux ou encore la précision de conversion des données analogiques émises par les capteurs en données digitales.

Les nez électroniques peuvent aussi être victime d'« empoisonnement » (Capelli et al. 2014). Les capteurs à polymères semi-conducteurs sont particulièrement sensibles et peuvent être inactivés par certaines classes de COV comme les composés soufrés, les acides organiques ou encore les pesticides polaires (Wilson 2018).

SYNTHESE DE LA PARTIE 5.4

Les technologies dites concurrentes et leurs applications

Les technologies traditionnellement employées pour la surveillance des odeurs qu'elles soient instrumentales ou non apparaissent finalement plutôt comme des outils complémentaires des nez électroniques. Le choix des technologies à privilégier dépend des objectifs visés, des moyens disponibles et des contraintes environnementales du site à surveiller.

Analyse SWOT	
Forces	Faiblesses
<ul style="list-style-type: none">➤ Caractérisation des odeurs➤ Mesure des odeurs (attention !)➤ Portatif➤ Pas de problème de subjectivité➤ Mesure en temps réel	<ul style="list-style-type: none">➤ Limite de détection trop élevée pour de nombreuses applications➤ Dérive temporelle➤ Problème de répétabilité➤ Longue mise en place➤ Besoin d'accompagnement➤ Sensibilité à l'humidité et à la température➤ Coût relativement élevé
Opportunités	Menaces
<ul style="list-style-type: none">➤ Nombre croissant de problème de nuisances olfactives➤ Besoin réel d'un outil de suivi en temps réel➤ Peut s'intégrer dans une méthode globale de gestion des odeurs➤ Nouvelles normes et réglementation à venir	<ul style="list-style-type: none">➤ Concurrence importante dont des méthodes de référence➤ Apparition d'une nouvelle génération de capteurs spécifiques

6 Étude de cas

Trois études de cas d'application ont été réalisées sur la base d'entretiens menés avec les membres du COPIL de l'étude et d'autres personnes confrontées à des situations comparables. Une quatrième étude de cas, concernant le contrôle des odeurs sur la chaîne de production de RENAULT avait été envisagée. Cependant, il est apparu rapidement que ce cas était en fait très théorique, l'organisation de la chaîne de production en flux tendu ne permettant pas d'intégrer de test olfactif sur les pièces avant leur montage.

6.1 Détection et mesure des odeurs sur site industriel

6.1.1 Définition du besoin

Les industriels dont les activités induisent des nuisances olfactives cherchent à

- Détecter des odeurs inhabituelles ou dépassant un seuil dans l'air ambiant afin de pouvoir prévenir les plaintes du voisinage et agir pour minimiser l'impact olfactif (neutralisation, modification de l'activité responsable de l'odeur) ;
- Détecter et mesurer les odeurs à l'émission que ce soit lorsqu'ils ont des contraintes réglementaires ou pour mieux prévenir les nuisances dans l'air ambiant.

L'olfactométrie dynamique permet de détecter, caractériser et mesurer la quantité d'odeur d'un échantillon. C'est la méthode de référence mais c'est une technique ponctuelle, coûteuse, incapable de fournir un résultat en temps réel.

Une mesure instrumentale présente théoriquement de nombreux avantages :

- Détection et mesure en continu ;
- Fourniture des résultats en temps réel ;
- Maillage plus ou moins dense du site (dans le cas des dispositifs à bas coûts) ;
- Déclenchement d'une alarme ;
- Couplage avec des données météorologiques afin d'identifier la source de l'odeur ;
- Possibilité de traiter des échantillons toxiques pour la santé humaine.

Les mauvaises odeurs dans l'environnement constituent une réelle préoccupation pour le public comme en témoigne le très grand nombre de plaintes concernant les nuisances olfactives au voisinage d'élevages, de stations d'épuration ou encore d'entreprises diverses comme celles des secteurs agro-alimentaires, de la papeterie ou encore pétrochimiques.

L'une des difficultés importantes rencontrée lors de l'analyse de l'odeur est son caractère hautement subjectif qui nécessite notamment une analyse multidimensionnelle. Plus que les aspects physiologiques et physico-chimiques de l'odeur, c'est surtout sa représentation psychologique chez l'individu qui constitue la particularité de la nuisance olfactive dans l'environnement. Elle peut être évaluée selon différentes caractéristiques :

- La fréquence d'apparition de la nuisance ;
- L'intensité de l'odeur ;
- La durée de l'odeur ;
- Le caractère hédonique ou offensif de l'odeur ;
- La particularité du récepteur : c'est-à-dire la position sociale, économique ou encore culturelle de l'individu (un éleveur supportera mieux l'odeur d'un élevage qu'un citoyen).

En matière de qualité de l'air, la nuisance olfactive se distingue également par ses échelles spatiales et temporelles réduites. Il s'agit effectivement d'une pollution qui reste en général locale : elle concerne le plus souvent des riverains situés à quelques kilomètres au maximum autour de la source, sauf lorsque le panache odorant est émis à partir d'une cheminée élevée ou que les composés odorants présentent un seuil de détection très bas (exemple : mercaptan). Du point de vue temporel, alors que la toxicité est plutôt évaluée sur base de concentrations moyennes horaires ou journalières, la gêne olfactive, elle, est davantage liée aux pics d'émissions. Ainsi, même si, en moyenne sur une heure, la concentration de l'odeur reste inférieure au seuil de perception, l'individu percevra les pointes de concentration, même très brèves, et les enregistrera comme autant d'épisodes de gêne. La réglementation et les calculs de dispersion atmosphérique devront donc tenir compte de cette contrainte.

6.1.2 Les nez électroniques sont-ils adaptés ?

Les différents essais conduits (voir les retours d'expérience ci-dessous) montrent que les nez électroniques souffrent de :

- Un manque de sensibilité (qui les rend inadaptés aux mesures dans l'air ambiant) ;
- Un défaut de spécificité surtout dans l'air ambiant et d'autant plus que les conditions sont variables et les odeurs recherchées sont en faible quantité ;
- Un défaut de répétabilité ;
- Un défaut de robustesse et, en conséquence, d'une faible durée de vie.

Ces limites semblent liées à la technologie elle-même plutôt qu'à un fabricant même si un même produit peut donner des résultats différents selon les conditions environnementales.

Ils constituent néanmoins des outils utiles dans des conditions bien précises illustrées par les trois exemples ci-dessous et en complément des mesures olfactométriques et/ou de composés odorants par des techniques analytiques plus robustes.

6.1.2.1 Retour d'expérience de SUEZ

Contexte : Les activités de la société, en particulier le compostage ou le séchage thermique des boues à grande échelle, sont potentiellement à l'origine de nuisances olfactives importantes. De gros investissements ont été réalisés pour gérer les odeurs et des efforts de R&D ont permis de tester plusieurs nez électroniques.

- Alpha MOS pendant 6 mois à 1 an ; I-NOZ (entre 2013 et 2015) ;
- Actuellement FIDOR A fourni par ODOMETRIC. Ce nez électronique est composé de 6 capteurs MOS (3 dédiés aux COV, 1 aux composés pétrochimiques, 1 aux solvants organiques et 1 à l'ammoniac) et de 2 cellules électrochimiques dédiées à l'H₂S et l'ammoniac). Les tests réalisés sur 6 mois ont montré une bonne corrélation ($R^2=0.97$) avec les résultats obtenus par olfactométrie.

Points positifs : dans les conditions testées (niveau d'odeur important, typologie d'odeur constante), les résultats sont comparables aux résultats obtenus par olfactométrie.

Points négatifs : Les principales limites constatées sont la sensibilité et vulnérabilité aux conditions extrêmes. En effet une odeur dont la quantité est inférieure à 300 UO_E/m³ n'est souvent pas détectée. Les nez électroniques sont plutôt réservés à un usage à proximité de l'émission (sortie de cheminée), ce qui nécessite souvent une protection contre la condensation. La surveillance et l'entretien des nez électroniques, donc la présence de personnel dédié, est également cruciale pour garantir la fiabilité des résultats. Lorsque les conditions ne sont pas réunies, les capteurs CAIRPOL (Groupe ENVEA, Poissy, France), intégrant des PID et des cellules électrochimiques, permettent de mesurer avec précision les principaux gaz odorants (H₂S, CH₄S, NH₃, COV non -méthaniques, SO₂, NO₂) avec une sensibilité de l'ordre du ppb ou ppm. Il est possible d'intégrer les résultats obtenus par ces capteurs et de les corréler aux résultats d'olfactométrie pour créer ainsi un « indice d'odeurs » précis, fiable et sans entretien.

Le choix d'un nez électronique doit être raisonné et bien correspondre au contexte. Le FIDOR A a été proposé sur un site où la quantité d'odeur est importante même dans l'air ambiant et parce que du personnel sera disponible pour assurer l'entretien. Si ces deux conditions n'étaient pas réunies, l'usage d'un nez électronique risquerait d'être décevant.

6.1.2.2 Retour d'expérience de TOTAL

Contexte : Les besoins de détection et de mesure des odeurs concernent les émissions atmosphériques, issues des cheminées de raffineries, chargées en COV, particules et composés soufrés et la gestion de la qualité de l'air ambiant des sites industriels. Il n'y a pas d'obligation réglementaire de suivi ni de contrôle du niveau d'odeur dans ce secteur industriel.

Nez électroniques ou capteurs testés :

- Alpha MOS pendant 6 mois en 2002 : Les défauts de spécificité et de répétabilité observés ont conduit à juger les résultats insatisfaisants ;
- WatchTower 1 (WT1) (RUBIX S&I, Toulouse, France) : en cours de test actuellement ;
- Capteurs CAIRPOL (Groupe ENVEA, Poissy, France), intégrant des PID et des cellules électrochimiques : ces capteurs permettant de mesurer avec précision les principaux gaz odorants (H_2S , CH_4S , NH_3 , COV non –méthaniques, SO_2 , NO_2) avec une sensibilité de l'ordre du ppb ou ppm donnent des résultats fiables et intéressants. Ils ont pu être testés rigoureusement dans une chambre d'exposition ;
- Nez électronique Aryballe Technologies en 2017 : Le nez a permis de discriminer des odeurs issues d'émissaires différents (spécificité encourageante) mais uniquement pour des niveaux d'odeurs élevés (bien perceptibles au nez humain) et à proximité de la source (<10m).

Points positifs : A ce jour, aucun des nez électroniques testés, ne sont satisfaisants pour la surveillance de l'activité TOTAL. Le test actuellement en cours de la Watch Tower 1 (RUBIX &I, Toulouse, France) sera peut-être plus convaincant.

Points négatifs : Les principales limites constatées sont la sensibilité, la spécificité surtout dans l'air ambiant et vulnérabilité aux conditions extrêmes.

Compte-tenu de l'absence d'obligation réglementaire de suivi des odeurs, les capteurs CAIRPOL donnent actuellement les résultats les plus satisfaisants. Les résultats fournis peuvent être intégrés aux évaluations olfactives fournies par un réseau de nez humains constitué de personnel volontaires et formés au langage des nez. Les données issues d'un réseau constituent un excellent moyen de communication et favorisent une meilleure compréhension et acceptation des activités industrielles et des nuisances qui les accompagnent.

6.1.2.3 Retour d'expérience du Port de Rotterdam

Contexte : Le Port de Rotterdam est équipé de nez électroniques fournis par Comon Invent (Delft The Netherlands). L'expérience a été lancée par la Rijnmond Environmental Protection Agency (DCMR) en 2009 et a été jugée suffisamment satisfaisante pour être pérennisée. De plus le Port s'est porté acquéreur du réseau qui compte maintenant 250 nez électroniques, répartis sur plusieurs communes hébergeant de nombreuses activités industrielles et commerciales.



Principe technique : Chaque nez électronique contient 4 (parfois 8) capteurs de type MOS et des capteurs de température et d'humidité relative. Chacun est connecté par un réseau sans fil à un ordinateur distant où les signaux sont intégrés et analysés en temps réel. L'« empreinte olfactive » obtenue est comparée aux empreintes enregistrées dans une base de données (BDD) grâce à un logiciel. Ces empreintes olfactives de référence ont été créées et enregistrées à partir de vapeur de fuel, d'huiles, plus ou moins riches en composés soufrés... Elles ne sont pas spécifiques du site. Une alarme est déclenchée lorsque l'empreinte émise varie et qu'elle est associée aux empreintes de composés malodorants (résultat donné en termes de probabilité). Le dispositif est complété d'un bateau équipé d'un nez électronique et d'une équipe mobile qui interviennent sur le terrain en cas d'alarme lorsque la localisation de la source de l'odeur est compliquée.

Points positifs : Ce réseau permet une surveillance en continu et en temps réel d'un vaste territoire où les sources potentielles de pollutions olfactives (chimiques) sont nombreuses. Il ne détecte ni ne mesure une odeur mais déclenche une alarme qui permet aux gestionnaires du port de réagir au plus vite. Les données fournies ne sont pas publiques contrairement aux données acquises par des techniques de référence (PID, GC-MS...) qui équipent une quinzaine de sites.

Points négatifs : Les principales limites constatées sont la précision et la répétabilité des mesures⁷. Le logiciel dédié à l'interprétation des données, en particulier la modélisation des panaches et la triangulation des sources, pourrait également être amélioré.

⁷ Un autre projet porté par la DCRM, actuellement en cours de développement, prévoit de mesurer les odeurs de restaurant dans la ville. Une vaste BDD spécifique a été constituée en croisant les mesures par nez électronique et par olfactométrie. Les essais menés *in situ* ont montré que les nez électroniques ne peuvent pas distinguer ni quantifier les odeurs en ville. Les odeurs seront donc échantillonnées à proximité de la source pour être analysées par le nez électronique au laboratoire.

Ce retour d'expérience illustre bien les avantages et les limites des nez électroniques. Le succès du réseau du Port de Rotterdam repose sur le bon usage qui a été fait des données fournies par le réseau et la puissance financière du Port qui assume le coût du dispositif pour des résultats non réglementaires ni même publics. La DCRM se félicite aussi de la bonne gestion des alarmes qui entraînent des actions efficaces et de la bonne gestion des plaintes (environ 3000/an toutes origines confondues) en parallèle des dispositifs de mesure. Plus globalement, les nez électroniques proposés par Common Invent semblent essentiellement utilisés comme des outils d'alerte basés sur la modification du signal. L'identification de l'odeur par comparaison à la BDD est fournie à titre indicatif. Le discours commercial de la société semble cohérent avec les capacités techniques de l'appareil ce qui contribue certainement à la satisfaction des utilisateurs que nous avons interrogés.

6.2 Détection et mesure des odeurs dans des espaces partagés

6.2.1 Définition du besoin

Les odeurs des espaces partagés sont émises en continu et/ou à l'occasion de pic d'intensité et de fréquence variable. Leur nature et leur ton hédonique sont également variables. Cependant, certaines odeurs (nourriture, alcool, cigarette, odeurs corporelles, urine et déjections, animaux, moisissures liées à la climatisation), principales sources de nuisance, peuvent être ciblées.

Le but des industriels ou prestataires de services concernés est de détecter les nuisances olfactives pour y remédier le plus efficacement et rapidement possible afin de garantir *in fine* le confort et la satisfaction de leurs clients.

Une mesure instrumentale présente théoriquement de nombreux avantages :

- Détection et mesure en continu ou régulièrement/fréquemment ;
- Fourniture des résultats en temps réel ;
- Déclenchement d'une alerte permettant le déclenchement automatique de processus (ventilation par exemple) ou le signalement qu'une intervention est nécessaire ;
- Dispositifs à bas coûts, le nombre de site étant généralement important ;
- Dispositifs discrets et peu encombrants ;
- Maintenance simple (pouvant être effectué par du personnel formé mais non spécialisé) et peu fréquente ;
- Seules certaines odeurs, dépassant un seuil donné, peuvent être ciblées.

6.2.2 Retours d'expérience

Les essais réalisés par la SNCF sont actuellement en cours et aucun résultat n'est disponible. Le choix s'est porté sur la technologie développée par RUBIX. Les premières difficultés rencontrées concernent l'alimentation de l'appareil et la transmission des données qui nécessite l'installation d'un routeur 4G sur la rame qui sera équipée.

Les essais pratiqués par RENAULT (NeOse Pro d'Aryballe en avril 2019) se sont montrés décevants du fait de :

- Un manque de sensibilité responsable d'une limite de détection élevée (ce problème a nécessité l'utilisation d'un concentrateur) ;
- Un défaut de spécificité d'autant plus que les conditions sont variables (véhicules différents) et les odeurs recherchées sont en faible quantité (l'utilisation d'un concentrateur a également amélioré la spécificité de l'appareil) ;
- Un défaut de répétabilité.

On retrouve donc les mêmes limites qui ont été observées pour un usage dans l'air ambiant.

6.2.3 Les nez électroniques sont-ils adaptés ?

Lesquels plus particulièrement?

Le RUBIX POD (Rubix) et le NeOse Pro (Aryballe) sont bien les 2 seuls produits que nous avons identifiés et qui sont potentiellement adaptés à un usage dans un espace partagé comme un habitacle de voiture ou un wagon de train. Ces marchés sont, de plus, clairement visés par les constructeurs.

Le tableau 11 ci-dessous liste les caractéristiques techniques les plus importantes pour l'usage visé et précise lequel des 2 produits est le plus performant.

Pour les espaces partagés comme les toilettes des wagons pour lesquels les odeurs concernées sont vraisemblablement moins variables, il semble pertinent de réaliser une analyse GC couplée à l'olfactométrie afin d'identifier les molécules odorantes responsables des odeurs. Si cette analyse permet d'identifier quelques molécules odorantes dominantes, alors, l'utilisation de capteurs spécifiques (cellules électrochimiques, PID) semble pertinente.

	RUBIX POD	NeOse Pro
Coût	-	+
Discrétion/Encombrement	-	+
Déclenchement d'une alerte	+	+
Prise en charge de la perception des usagers à travers une application smartphone	+	-
Sensibilité	Variable en fonction des odeurs	Variable en fonction des odeurs
Spécificité	?	- si odeur trop faible ou variable
Possibilité d'associer 3 capteurs électrochimiques de gaz au choix	+	-
Facilité de maintenance	?	+
Durée de vie	+	Inconnue (même si améliorée avec les MOEM par rapport aux biocapteurs)

Tableau 11 : Performances comparée du RUBIX POD (Rubix) et le NeOse Pro (Aryballe)

7 Limites et perspectives

7.1 Limites actuelles

Cette analyse repose sur la lecture attentive d'articles scientifiques académiques, de livres blancs, d'outils de communication de concepteurs de nez électronique ou encore d'articles de presse.

Au cours de cette étude, plusieurs points particulièrement marquants sont apparus :

- Un écart entre les promesses des nez électroniques et leurs capacités lorsqu'ils sont testés en conditions réelles ;
- Un discours commercial souvent optimiste et très axé sur l'analogie avec l'olfaction
- Le fait que les principes et caractéristiques techniques restent souvent évasifs donnant l'impression que le nez électronique est une « boîte noire » ;
- L'abondance d'articles scientifiques (papiers blancs ou articles de revue à comité de lecture) vantant les capacités des nez électroniques et leurs multiples applications potentielles⁸ qui contraste avec la difficulté à obtenir des retours d'expérience même infructueux voire l'impossibilité d'identifier des utilisateurs en routine.

Ces constats nous ont poussés à réaliser une analyse critique de la bibliographie, qui est extrapolable aux discours commerciaux auxquels nous avons été confrontés. Vraisemblablement mu par la même analyse, Boeker a publié un article en 2014 dans la revue *Sensors and Actuators B : Chemical* dont nous nous sommes largement inspiré pour ce chapitre, tant il est toujours d'actualité.

7.1.1 Les biais induits par l'analogie avec le sens de l'olfaction humain

Un composé volatil est dit odorant parce qu'il est détecté par nos récepteurs olfactifs et qu'il transmet donc un signal à notre cerveau qui l'identifie l'odeur et l'associe à une émotion. C'est la seule chose qui distingue un composé odorant d'un composé non odorant. On comprend donc qu'un nez électronique ne puisse pas faire la distinction entre un composé volatil odorant et un composé volatil non odorant. Or ce biais intrinsèque des nez électroniques est souvent passé sous silence ou rapidement balayé par les constructeurs.

La sensibilité des nez électroniques est souvent comparée à la sensibilité du sens de l'olfaction humain et on lit souvent que l'appareil est aussi sensible que le nez humain. Ceci peut être vrai pour certaines odeurs mais dans un grand nombre de situation, les nez électroniques ne peuvent détecter des odeurs dont le niveau est inférieur à 200 UO_E/m³, ce qui signifie qu'il aura fallu diluer 200 fois l'échantillon pour

⁸ Le nez électronique Cyranose 320 (Sensigent, USA) est cité dans 148 articles traitant des applications agroalimentaires et industrielles des nez électroniques, parus entre 2000 et 2018.

que la moitié d'un panel de nez humains ne le détecte plus. Ce niveau peut atteindre 1000 UO_E/m³ pour des odeurs auxquelles le nez humain est très sensible comme l'H₂S. Cette information n'est parfois pas évidente à concevoir car de telles concentrations d'odeur correspondent à des concentrations chimiques de l'ordre du ppm et c'est cette information qui est mise en avant alors que dans le domaine de la détection d'odeur et en fonction des composés, elle n'est pas pertinente.

Il est fréquent d'entendre parler de quantification des odeurs dès lors que le nez électronique fournit un résultat en UO_E/m³. Les nez électroniques ne sont pas capables de quantifier (au sens de la norme européenne) une odeur de manière autonome. Cette quantification exprimée en UO_E/m³ est le résultat d'une corrélation entre l'intensité du signal et la mesure olfactométrique réalisée par un jury de nez humains. On comprend alors que la précision de cette mesure dépend directement du nombre de mesures olfactométriques qui auront été réalisées pour construire la corrélation. Ceci n'est jamais souligné. Il est également rarement précisé que les mesures olfactométriques, même si elles constituent la méthode de référence sont elles-mêmes sujettes à une incertitude importante (les résultats donnés par plusieurs panélistes peuvent différer de 50%). Cette incertitude est donc au moins reportée, et plus vraisemblablement majorée par la corrélation.

De même que la quantification d'une odeur par un nez électronique est le résultat d'une corrélation, l'identification d'une odeur est plutôt le résultat d'une classification par un ou des algorithmes de traitement des données. L'emploi fréquent du terme de « reconnaissance » ou d' « identification » est trompeur et minimise les incertitudes inhérentes aux traitements statistiques des données, autant que celles liées à la présence et la proportion de gaz non odorants. Cette notion d' « empreinte » est mal choisie et abusive.

La spécificité des nez électroniques est plus rarement mise en avant. Le système olfactif humain repose sur environ 400 récepteurs différents, chacun étant assez spécifique et capable de fixer uniquement quelques molécules. Ces récepteurs sont présents à la surface des quelques 10 à 30 millions de cellules sensorielles qui tapissent notre épithélium. Les quelques capteurs intégrés dans les nez électroniques ne peuvent fournir une réponse aussi spécifique que le sens de l'olfaction humaine même lorsqu'ils sont mis en oscillation (cf. RUBIX POD, RUBIX S&I, France) ou quand leur température varie (cf. OdorCheckerOutdoor ou OdorCheckerSpot, 3S GmbH, Allemagne).

7.1.2 Les déceptions liées aux caractéristiques techniques des nez électroniques

Les caractéristiques techniques affichées apparaissent établies et fiables mais sont rarement reproductibles en pratique.

Les limites de détection affichées pour un nez électroniques sont données pour des gaz spécifiques et pour les COV. Ces limites sont en général déterminées dans des conditions idéales de laboratoire et ne sont pas forcément reproductibles en conditions réelles. Les nez électroniques intègrent des capteurs non spécifiques, par définition capables de détecter une large gamme de composés volatils. Cette caractéristique fondamentale de la technologie est souvent mise en avant par les concepteurs

mais elle ne présente pas que des avantages. En effet, chaque capteur est caractérisé par sa gamme de détection (l'ensemble des composés volatils qui génèrent un signal) et les seuils de détection de chacun de ces composés volatils. Ces paramètres étant inconnus, il est difficile d'interpréter un résultat : un composé volatil peut ne pas être détecté car il est en deçà du seuil de détection ou n'est pas dans la gamme de détection. Au contraire, un composé volatil non odorant présent dans la gamme de détection à une concentration supérieure au seuil de détection génèrera un signal. La méconnaissance des caractéristiques précises de chaque capteur induit inévitablement une incertitude. De plus, la variabilité des capteurs même de type identique est responsable de la faible reproductibilité des mesures effectuées par les nez électroniques et pénalise la qualité des résultats lorsque le changement d'un capteur est nécessaire.

Le fait que les capteurs des nez électroniques soient non spécifiques et génèrent un signal en présence d'un gaz non odorant comme odorant a d'autres conséquences. Si les gaz non odorants sont minoritaires dans un mélange gazeux ou si leur concentration est corrélée à celle des gaz odorants (par exemple lorsqu'ils sont issus du même process), alors l'emploi d'un nez électronique est pertinent. Dans le cas contraire, l'usage d'un nez électronique sera décevant. De même, la présence de particules peut diminuer voire inhiber la réponse d'un nez électronique (Marco 2014). Ces limites d'usage sont rarement expliquées. Pourtant, elles permettraient de comprendre qu'un même nez électronique donne des résultats satisfaisants ou décevants en fonction des situations. Elles soulignent aussi la nécessité de connaître la composition du mélange gazeux pour choisir la méthode de mesure la plus adaptée. De fait, la méconnaissance de la composition du mélange gazeux génère obligatoirement une incertitude.

Les capteurs intégrés dans les nez électroniques sont connus pour être sensibles à la température, l'humidité et au vieillissement responsable d'une dérive des résultats. L'effet de ces paramètres est testé au laboratoire de manière à ce qu'ils soient maîtrisés et compensés au mieux par les algorithmes. Les procédures de calibration ont aussi pour objectif de corriger les variations liées à la température, l'humidité et le vieillissement. Cependant, elles ne peuvent être réalisées que pour des gaz simples et il est illusoire de vouloir reproduire au laboratoire les mélanges complexes auxquels le nez électronique sera confronté en conditions réelles. Idéalement la calibration doit donc être réalisée sur des échantillons prélevés sur le terrain et renouvelée à chaque remplacement d'un capteur, ce qui est long et coûteux. Température, humidité et vieillissement restent la principale cause de la faible répétabilité des mesures obtenus par les nez électroniques ainsi que de leur robustesse limitée (Marco 2014).

La qualité de l'échantillonnage a souvent été négligée lors de la conception des nez électroniques. Pourtant, elle influe aussi fortement sur la répétabilité et la robustesse des résultats (Boeker 2014). Ce point a été largement débattu lors de la conception de la future norme sur les mesures instrumentales des odeurs et devrait être mieux pris en considération à l'avenir.

7.1.2.1 L'effet « boîte noire »

Les algorithmes mis en œuvre pour le traitement des données et leur affectation à une classe qui définira le résultat sont rarement détaillés par les constructeurs de nez électroniques. Or les résultats peuvent être très différents en fonction des méthodes et des paramètres choisis (bruit de fond, nombre de données intégrées...). Pour que ces résultats soient pertinents, le choix et le paramétrage des différents algorithmes nécessitent idéalement l'attention, la compréhension et la contribution de l'utilisateur final.

Aussi performants soient ces algorithmes, d'autres facteurs comme la variabilité et la dissimilarité des échantillons doivent être pris en compte pour garantir des résultats pertinents. En effet, les nez électroniques sont d'autant plus performants qu'ils sont employés pour distinguer des échantillons homogènes et bien distincts les uns des autres. Au contraire lorsque les échantillons sont très voisins et ou très variables dans leur nature, la spécificité des nez électroniques sera mise en défaut et les résultats seront décevants. La plupart des utilisateurs que nous avons interrogés (Suez, Total, DCRM de Rotterdam) en ont fait l'expérience. Avant de choisir de mettre en œuvre un nez électronique, Boeker (2014) propose même l'arbre de décision reproduit ci-dessous (Figure 35).

La validation des résultats fournis par un nez électronique est une étape souvent ignorée des utilisateurs malgré son importance notamment en l'absence de données précises sur la composition de l'échantillon. En effet, un nez électronique fournit toujours un résultat mais celui-ci peut être erroné pour de multiples raisons, ce qui justifie la mise en œuvre d'une validation comme, par exemple, une validation croisée des résultats : le modèle conçu sur un jeu de données d'entraînement est testé ensuite sur un jeu de validation (échantillons distincts mais prélevés et analysés dans les mêmes conditions). Ce type de validation est assez facile à mettre en œuvre mais il ne garantit en rien la robustesse du modèle dans des conditions différentes que celles des jeux d'entraînement et de validation. Ceux-ci doivent donc être choisis scrupuleusement et être représentatifs des conditions d'usage du nez électronique

7.1.2.2 Prérequis

Enfin, l'utilisation d'un nez électronique ou de toute autre méthode, instrumentale ou non, de mesure des odeurs et des gaz volatils n'est pas toujours stratégique. Par exemple, en ce qui concerne le cacao, la société Valrhona a procédé à des essais pour distinguer les variétés de cacao en fonction des COV émis. Deux thèses ont été conduites. Ces travaux ont montré que la chromatographie en phase gazeuse permettait de distinguer au mieux 4 groupes parmi les 20 variétés proposées et démontré ainsi que les COV ne sont donc pas la bonne métrique pour distinguer les variétés de cacao.

L'usage des nez électroniques pour distinguer l'origine des huiles d'olive est fréquemment mis en avant (Majchrzak et al. 2018). Contrairement au cacao, les huiles d'olives émettent bien des COV qui peuvent les distinguer les unes des autres avec une efficacité et une fiabilité qui dépend de la spécificité de la méthode employée (nez électronique ou autre). Cependant, la mesure des odeurs émises par les huiles n'est pas pour autant pertinente. En effet, les COV identifiés peuvent être le reflet du terroir d'origine

des olives, du process de fabrication de l'huile ou de la méthode de conservation de l'huile ou bien de tous ces éléments combinés.

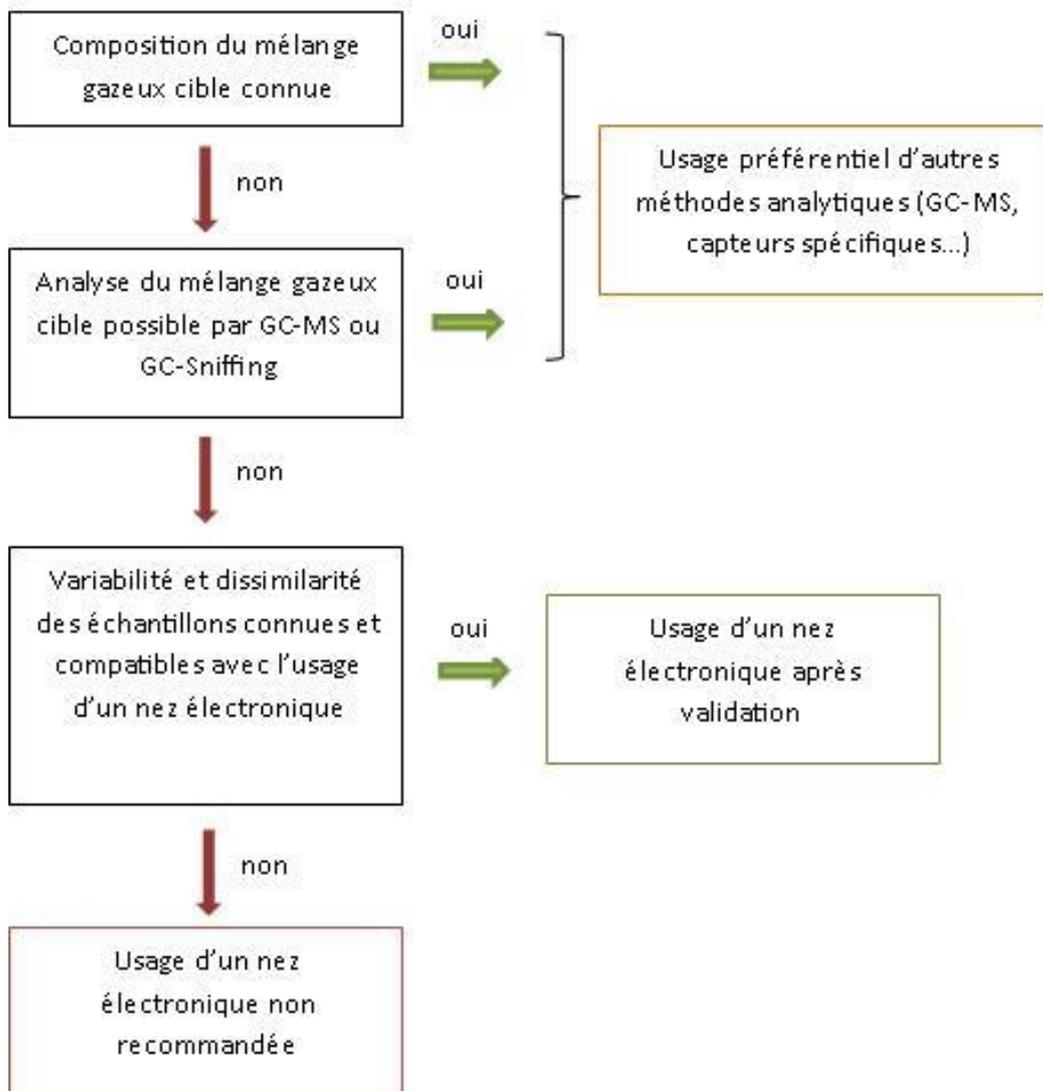


Figure 36 : Arbre de décision pour la mise en œuvre d'un nez électronique (RECORD 2020) (d'après Boeker 2014)

7.2 Principaux axes de recherche

De nombreuses équipes de recherche travaillent sur des nouveaux capteurs, ou des méthodes de traitement de signaux afin de s'affranchir des limites technologiques actuelles, que ce soit la limite de détection trop élevée, la dérive temporelle des capteurs, le manque de reproductibilité des résultats ou encore l'influence des conditions environnementales (voir 5.4.8.2). Par ailleurs, la recherche sur les nez électroniques profite des avancées effectuées dans différents domaines de recherches telles que les nanosciences ou l'intelligence artificielle.

Les paragraphes suivants s'attachent à décrire les axes de recherche privilégiés pour améliorer les nez électroniques.

7.2.1 Amélioration de la détection

7.2.1.1 Les cas des nez bioélectroniques (Pajot-Augy, 2019)

Des manifestations spontanées de chiens face à des patients atteints par divers cancers (mélanome, cancer du sein, etc.) ont été rapportées dès 1989, mais de façon anecdotique et ponctuelle. (Pajot, 2018)

Comme nous l'avons vu précédemment, la prolifération des cellules tumorales s'accompagne de modifications métaboliques qui entraînent une augmentation du taux de stress oxydatif et une libération dans le sang de COV éliminés par l'haleine, l'urine, la sueur, etc. Ces métabolites diffèrent selon la tumeur et apparaissent dès les premiers stades de la maladie, la lésion n'étant encore que précancéreuse. Ils constituent ainsi des biomarqueurs précoces de la maladie. Le profil odorant (c'est-à-dire les quantités relatives des différents odorants) évolue selon le type et le stade du cancer. Les COV constituent ainsi une signature olfactive pour diverses pathologies qui peut être perçue par les animaux, les chiens en particulier du fait du grand nombre de récepteurs olfactifs présents dans leurs muqueuses olfactives (Figure 37). C'est le principe du projet Acadia1 qui consiste à éduquer des chiens d'alerte à la détection de l'acétone dans l'haleine de patients diabétiques (Pajot, 2018).



Figure 37 – Utilisation du chien pour la détection de maladies (nombre de récepteurs olfactifs par espèce) (RECORD 2020)

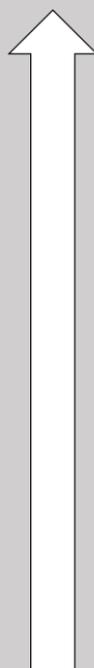
Principe du nez bioélectronique

Le remplacement des surfaces sensibles des nez électroniques par des protéines olfactives, en particulier des récepteurs olfactifs (RO), dont la fonction intrinsèque est de discriminer et de lier des COV à très faible concentration, n'a été envisagé qu'après la description relativement récente de la superfamille des récepteurs olfactifs par Richard Axel et Linda Buck (voir 2.1.2).

Les nez bioélectroniques sont les nez électroniques basés sur des biocapteurs. Les récepteurs olfactifs sont généralement utilisés comme sonde biologique dans ce type d'instruments. De petites différences dans la structure des molécules odorantes peuvent entraîner un changement significatif de l'odeur, ce qui est dû au fait que chacun des récepteurs olfactifs est codé avec un gène différent et correspond généralement à un type d'odeur différent. Les potentialités d'application des nez bioélectroniques sont concentrées dans les domaines où une analyse très sélective et sensible des substances odorantes est requise (Wasilewski, 2016).

Des biocapteurs, qui intègrent des récepteurs olfactifs humains, ont été développés et testés pour détecter une molécule libérée lors de contamination bactérienne de l'eau de mer. Ces récepteurs pourraient être couplés à d'autres récepteurs spécifiques d'odeurs et ainsi fournir un outil de diagnostic rapide et adapté à d'autres usages (Tonacci, 2018).

Contrairement aux nez électroniques intégrant des capteurs du type MOS, la connaissance préalable du ou des COV pouvant être utilisés comme biomarqueurs d'une pathologie est nécessaire pour concevoir ces nez bioélectroniques. Il s'agit donc ensuite d'identifier les récepteurs les plus pertinents pour détecter ces odorants cibles.



	Nez électronique	Nez bioélectronique	Nez humain	
<i>Visualisation des résultats obtenus</i>	Classification des odeurs selon leurs tons hédoniques ou leurs concentrations			<i>Transmission des signaux aux régions hautes du cerveau générant une réponse olfactive</i>
<i>Comparaison des résultats avec la bibliothèque de données</i>	Unité de traitement des données		Cerveau	
	Algorithmes de reconnaissance de motifs, bibliothèque de données		Cortex olfactif	<i>Transport du signal olfactif sur le trajet olfactif par les cellules bipolaires, les axones transmettent les stimuli olfactifs au centre de l'odorat situé au niveau de l'hippocampe et de l'amygdale situés dans le lobe temporal</i>
<i>Traitent du signal grâce aux méthodes d'analyse statistique appropriées</i>	Système d'acquisition et de traitement des données		Bulbe olfactif	
			Épithélium olfactif	
<i>Molécules odorantes au contact avec les éléments sensible (biologique, physique ou chimique) et génération du signal</i>	Sondes de nature appropriées	Transducteur du signal	Cellules des récepteurs olfactifs	<i>Stimulation des récepteurs olfactifs et transfert d'un signal électrique</i>
		Récepteurs olfactifs		
<i>Méthodes d'échantillonnage</i>	Système d'échantillonnage		Narines	<i>Succions des molécules odorantes à l'aide des poumons</i>

Figure 38 - Comparaison schématique des principes entre nez électroniques "classiques", nez humains et nez bioélectroniques (d'après (Wasilewski, 2016))

La possibilité de dissocier la collecte des composants biologiques (appareillage à usage unique dans la mallette du médecin ou en poste de soins) du traitement des données (composants électroniques pour l'analyse du résultat et le diagnostic) constitue une fonctionnalité qui devrait renforcer l'intérêt médical pour les nez bioélectroniques. Toutefois, des avancées dans le domaine de l'instrumentation sont encore nécessaires pour arriver au chevet du patient : l'innovation technologique devra permettre dans l'avenir de réduire les coûts pour une utilisation à plus grande échelle. La recherche sur les nez bioélectroniques est d'ailleurs particulièrement dynamique, comme le montre l'augmentation du nombre de publications scientifiques entre 2010 et 2015 (Figure 39).

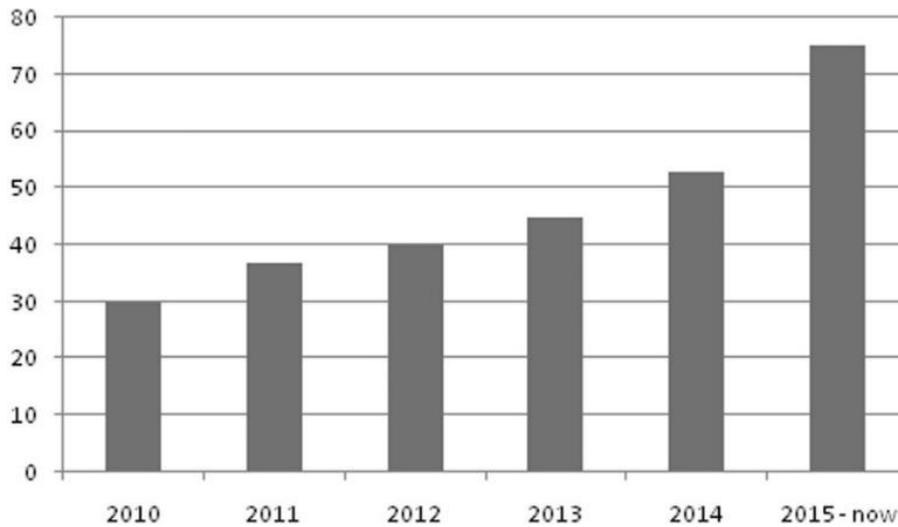


Figure 39 - Nombre de publications scientifiques concernant les nez bioélectroniques) (F.Di Pietrantonio, 2015)

7.2.1.2 Recherche sur les capteurs

Biocapteurs

De nouvelles générations de biocapteurs et de nanobiocapteurs sont en cours de développement. Leurs éléments sensibles sont des récepteurs olfactifs, et pourraient être les bases de nez bio-électroniques performants et peu chers.

Les applications des nez bioélectroniques sont très variées, et mettent en jeu des secteurs aussi variés que

- Le suivi en ligne de processus industriels ;
- La détection de composants toxiques ;
- La détection d'explosifs ou de drogues ;
- Le dépistage de la tuberculose et le diagnostic du cancer du sein.

Les analyses sur puces, ainsi que les capteurs utilisant des récepteurs olfactifs ne requièrent que de très faibles quantités de nanosomes porteurs de récepteurs olfactifs préparés à partir de levures modifiées. Leur coût en termes d'éléments sensibles est donc minimal. Cette conception de capteurs offre donc de réelles possibilités pour l'élaboration d'un réseau de micro- ou nanocapteurs, qui pourrait mimer un nez biologique.

Capteurs MOS

Les recherches actuelles issues de la littérature sur ces capteurs de gaz, portent sur l'amélioration des performances du capteur mais aussi du système de détection global. Ces nouvelles voies de recherche concernent :

- La technologie des capteurs fonctionnant à faible température voire à température ambiante par différentes méthodes de transduction : MEMS, NEMS (cantilevers fonctionnalisés), colorimétrie, fluorescence, cataluminescence ;
- La miniaturisation de systèmes optiques et physiques performants (capteurs Infra- rouge, micro colonne chromatographique) ;
- La technologie des plateformes chauffantes plus stables, plus robustes et à faible consommation ;
- Le développement de « nouveaux matériaux » sensibles dans la majorité des cas nanostructurés.

Ces recherches sont focalisées sur les trois performances de base que sont la sensibilité, la sélectivité et la stabilité en agissant sur le capteur lui-même par la modification de ces caractéristiques physiques (technologie, morphologie, dopage, filtre, température) ou en agissant mathématiquement sur les données produites (traitement du signal, reconnaissance de forme), ou encore sur l'association des deux.

Apport des Nanosciences dans la recherche sur les capteurs (RAMGIR, 2015)

Les avancées scientifiques relatives aux contrôles des dimensions des nanomatériaux a conduit à une recrudescence de leur utilisation. Le rapport surface/volume de ces structures est particulièrement intéressant pour la détection d'espèces biologiques et chimiques. L'une des classes de matériaux les plus attractives pour des nanodispositifs sont les oxydes métalliques. En effet, ils sont simples d'utilisation, peu chers, robustes et peu énergivore.

Divers nanomatériaux sont en cours de développement ou sont étudiés pour des applications possibles dans les nez électroniques. Ces nanostructures comprennent les nanoparticules, les nanofils ou encore les nanotubes.

Ces derniers offrent différents avantages tels que :

- Un rapport surface/volume élevé ;
- Une réactivité de surface augmentée ;
- Une consommation énergétique réduite ;
- Un coût relativement bas.

La cinétique de réaction plus rapide des nanomatériaux est une caractéristique particulièrement intéressante pour le développement de capteurs rapides et fiables, permettant ainsi la surveillance en temps réel de diverses odeurs ou espèces gazeuses.

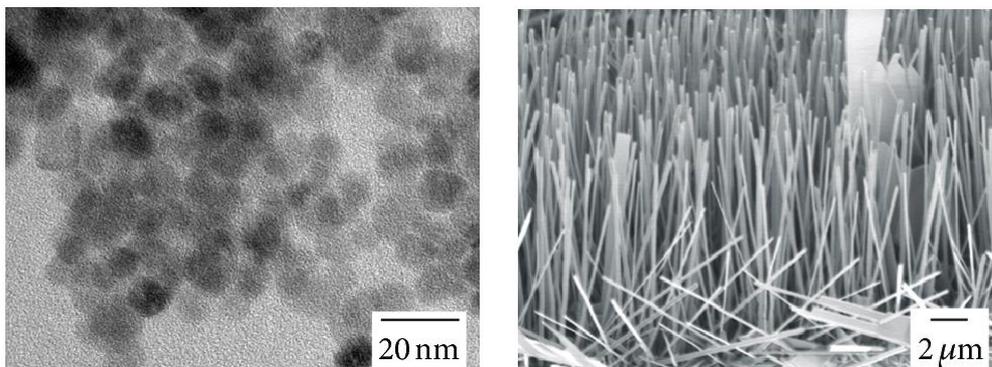


Figure 40 - Deux exemples de nanostructures : des nanoparticules (à gauche) et des nanofils (à droite)

7.2.2 Recherche sur les aspects « traitement du signal »

Le traitement du signal aujourd'hui mis en œuvre dans les nez électroniques passent par des techniques algorithmiques classiques et connues depuis bien longtemps (analyse en composant principal, technique k plus proches voisins, etc.). L'essor de la recherche sur l'intelligence artificielle (IA) représente une opportunité pour les nez électroniques afin d'améliorer ce bloc technologique important du nez électronique.

Apport de l'Intelligence artificielle

L'une des principales technologies sur laquelle reposera le traitement du signal dans les prochaines années sont les réseaux de neurones, une technique d'IA. Ces derniers mettent en œuvre des algorithmes de reconnaissance de formes qui recherchent des similitudes et des différences entre les éléments à identifier et des éléments connus enregistrés dans une bibliothèque de référence spécifiques à l'objet d'analyse (dans notre cas l'odeur). Le résultat de l'analyse des données est généralement fourni sous la forme d'un pourcentage de correspondance des éléments d'identification de l'échantillon avec ceux des motifs de sources connues dans la bibliothèque de référence.

Un réseau de neurones artificiels, souvent appelé simplement réseau de neurones, est un modèle mathématique inspiré des réseaux de neurones biologiques. Il consiste en un groupe interconnecté de neurones artificiels et traite les informations en utilisant une approche dite connexionniste du calcul. Généralement, les réseaux de neurones sont des systèmes « adaptatifs ». En effet, ils changent de structure lors de la phase d'apprentissage. Ils sont généralement utilisés pour modéliser des relations entre les entrées et les sorties d'un dispositif.

La combinaison de méthodes statistiques et d'intelligence artificielle constitue le futur du traitement de données pour les nez électroniques. De plus, le dynamisme de la recherche dans ce domaine est absolument spectaculaire (Figure 41).

Il convient de noter que les algorithmes les plus complexes (ex : *deep learning*) devront être intégrés dans des dispositifs à hautes performances afin de pouvoir être mis en œuvre.

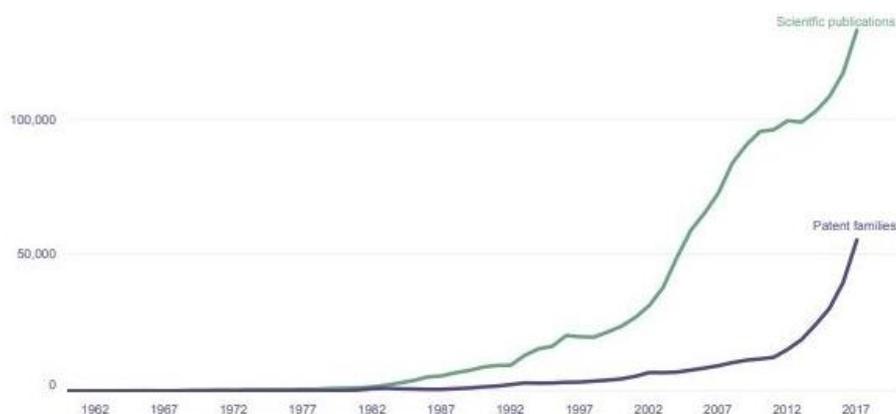


Figure 41 : Nombre d'articles scientifiques et de brevets publiés relatifs à l'intelligence artificielle de 1962 à 2017

8 Conclusion

La surveillance et la mesure des odeurs dans l'environnement comme dans l'air intérieur est un enjeu majeur depuis ces dernières années. Cette préoccupation sociétale croissante s'est traduite, d'une part, par l'évolution de la réglementation qui considère maintenant les odeurs comme une pollution à part entière et, d'autre part, par des efforts dans le domaine de la recherche académique et industrielle pour améliorer la détection, l'identification et la quantification des odeurs.

Cependant, contrairement aux autres polluants qui sont des molécules chimiques ou des particules physiques (particules fines, fibres), une odeur est une sensation, par définition fournie par un organe sensoriel. Cette sensation est le résultat d'un mécanisme physiologique particulièrement complexe qui a lieu dans notre système olfactif. Traduire et mesurer cette sensation est donc complexe. C'est pourtant ce que propose de faire l'olfactométrie dynamique à travers un panel de nez humains composant un jury de nez selon des règles précises et normées. La mise en œuvre de cette méthode décrite par la norme EN13725 (CEN/TC264 2003) permet de détecter, décrire et mesurer une odeur. Cette méthode a cependant ses limites : elle est ponctuelle ; que ce soit au laboratoire ou sur le terrain, elle est lourde à mettre en œuvre et donc coûteuse ; elle ne peut être mise en œuvre en cas d'émanations toxiques ; et même lorsque la méthodologie est scrupuleusement suivie, les résultats souffrent d'une forte incertitude d'ordre physiologique liée à la subjectivité des panélistes.

Parallèlement, des méthodes de mesures des composés volatils existent, des plus sophistiquées et précises comme la GC-MS aux plus ciblées comme la mise en œuvre de capteurs (cellules électrochimiques, PID...) pouvant être déployés en réseau sur le terrain. La GC-MS présente l'énorme avantage de permettre la détection, l'identification et la quantification des composés volatils prélevés à un endroit donné. Lorsque la GC-MS est couplée à l'olfactométrie dynamique (GC olfactive), les composés odorants peuvent être distingués parmi l'ensemble des composés volatils, ce qui, malgré tout, ne permet pas d'en déduire l'odeur. Cette méthode est coûteuse et ne permet pas de réaliser des analyses en continu. Quant aux capteurs, ils sont en général spécifiques d'une molécule ou d'un groupe de molécules définies (H_2S , SO_2 , H_2 , COV...). Dans le cas de mélanges odorants simples, le résultat peut être corrélé à l'odeur émise mais ces capteurs ne rendent pas mieux compte de l'odeur. Ils ont généralement l'avantage d'être sensibles, précis, d'un coût raisonnable et de fournir des résultats en continu.

En comparaison, les nez électroniques présentent l'énorme avantage de détecter, d'identifier et quantifier les odeurs et, cela, de manière continue. Ils pallient donc en théorie les limites majeures de l'olfactométrie dynamique et des autres méthodes instrumentales employées pour le monitoring des odeurs. La mesure instrumentale d'une odeur permettrait également de fournir un résultat objectif. C'est la raison pour laquelle ils ont été fréquemment présentés comme le Graal en matière de monitoring des odeurs. La réalité est beaucoup plus complexe voire décevante en comparaison des promesses *marketing* souvent mises en avant qui, petit à petit ont généré une méfiance chez les utilisateurs potentiels de nez électroniques. Les nez électroniques intègrent des capteurs « *low cost* », non spécifiques, souvent de type MOS. Chaque capteur fournit un signal en présence de molécules volatiles.

Compte-tenu de leur non spécificité, aucun des signaux fournis n'est totalement identique, même pour des capteurs de même type, et c'est leur intégration qui génère un signal global qui reflète la composition en molécules volatiles de l'échantillon. Pour qu'une identification puisse être proposée, il faut ensuite que ce signal global soit comparé par des méthodes d'analyse de données multivariées à une base de données de référence, ce qui permet de fournir une correspondance avec une odeur connue. De multiples incertitudes se nichent à chaque étape de ce processus, qui, au final, se manifestent par une faible répétabilité, reproductibilité et robustesse des résultats fournis par les nez électroniques. La plus grosse limite des nez électroniques, souvent oubliée du fait de l'appellation de « nez » électronique restent cependant liée au fait que ces capteurs sont sensibles à tous les composés volatils et non uniquement aux composés odorants contrairement au sens olfactif humain. Il est également rare que leur sensibilité soit supérieure à celle du nez humain surtout dans l'air ambiant, en conditions réelles.

Corriger les messages marketing trompeurs ne doit néanmoins pas faire oublier les avantages de ces instruments. En effet, ils permettent de surveiller, en continu, les évolutions des mélanges de composés volatils complexes et de contribuer à en définir l'origine. Leur coût relativement peu élevé fait qu'il est intéressant de les intégrer dans des réseaux plus ou moins denses pour surveiller un territoire où de multiples activités industrielles cohabitent. Loin de remplacer les autres méthodes et instruments de surveillance des odeurs et pollutions de l'air, ils peuvent constituer des outils d'alerte et apporter des éléments de compréhension lors d'épisodes odorants aux côtés des autres méthodes disponibles. Ils ont donc leur place au sein de la boîte à outils des gestionnaires de la surveillance des odeurs et c'est bien dans ce sens que les travaux visant la rédaction de la nouvelle norme sur la mesure instrumentale des odeurs ont été conduits. De plus, la recherche, active dans ce domaine, et les retombées d'autres domaines de recherche (IA, nanosciences), laissent espérer que les limites technologiques des nez électroniques seront repoussées dans les prochaines années.

9 Bibliographie

- Adjadj, A, V Debuy, et P Sureau. 2015. « Evaluation des performances des équipements et systèmes de sécurité. Etat de l'art des détecteurs d'hydrogène ». INERIS.
- AFNOR. 1996. « Norme NF X43-103: Qualité de l'air - Mesurage olfactométriques - Mesurage de l'odeur d'un effluent gazeux - Méthodes supraliminaire. »
- ASTM International. 1999. « ASTM E544-99, Standard Practices for Referencing Suprathreshold Odor Intensity ». West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- . 2019. « E679-19, Standard Practice for Determination of Odor and Taste Thresholds By a Forced-Choice Ascending Concentration Series Method of Limits ». West Conshohocken, PA. www.astm.org.
- Beuth. 2018. « VDI/VDE 3518 Part 3, Multigas sensors - Odour-related measurements with electronic noses and their testing ».
- Boeker, Peter. 2014. « On "Electronic Nose" methodology ». *Sensors and Actuators B: Chemical* 204: 2-17.
- Brinkman, Thomas, Ralf Both, Bianca Maria Scale, Serge Roudier, et Luis Delgado Sancho. 2018. « JRC Reference Report on Monitoring of Emissions to Air and Water from IED Installatio ». EUR 29261 EN. EUR 29261 EN.
- Capelli, Laura, Selena Sironi, et Renato Del Rosso. 2014. « Electronic Noses for Environmental Monitoring Applications ». *Sensors* 14 (11). <https://doi.org/10.3390/s141119979>.
- Cellini, A, Sonia Blasioli, Enrico Biondi, Assunta Bertaccini, Ilaria Braschi, et Francesco Spinelli. 2017. « Potential Applications and Limitations of Electronic Nose Devices for Plant Disease Diagnosis ». *Sensors* 17 (11). <https://doi.org/10.3390/s17112596>.
- CEN/TC 264. 2007. « NF EN 15259: Qualité de l'air - Mesurage des émissions de sources fixes - Exigences relatives aux sections et aux sites de mesurage et relatives à l'objectif, au plan et au rapport de mesurage. »
- . 2016a. « NF EN 16841-1: Air ambiant - Détermination de la présence d'odeurs par mesures de terrain - Partie 1: méthode de la grille - Air ambiant - Détermination de l'exposition aux odeurs par mesures de terrain - Partie 1: méthode de la grille ».
- . 2016b. « NF EN 16841-2: Air ambiant - Détermination de la présence d'odeurs par mesures de terrain - Partie 2: méthode du panache - Air ambiant - Détermination de l'exposition aux odeurs par mesures de terrain - Partie 2: méthode du panache ».
- CEN/TC264. 2003. « NF EN 13725: Qualité de l'air - Détermination de la concentration d'une odeur par olfactométrie dynamique ».
- . 2019. « NF EN 17255-1: Émissions de sources fixes - Systèmes d'acquisition et de traitement de données - Partie 1: spécification des exigences relatives au traitement et à la déclaration de données ».
- Choden, P., T. Seesaard, U. Dorji, C. Sriphrapadang, et T. Kerdcharoen. 2017. « Urine odor detection by electronic nose for smart toilet application ». In *2017 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 190-93. <https://doi.org/10.1109/ECTICon.2017.8096205>.
- Cipriano, Domenico. 2018. « Application of EN14181 and EN15267 to Electronic Noses: Challenge or Provocation? » *Chemical Engineering Transactions* 68: 139-44. <https://doi.org/10.3303/CET1868024>.
- Cors, Marie, Pierre Cobut, Jean-Louis Fanlo, Anne-Claude Romain, Julien Delva, et Jeau-Louis Thomas. 2017. « L'observatoire des odeurs: un outil de résolution des conflits? Réflexions d'un acteur de terrain. » *Pollution Atmosphérique*, n° 234.
- Garvanèse, Guillaume. 2017. « De la molécule à l'odeur ». *CNRS Le journal*, 2017. <https://lejournal.cnrs.fr>.

- Gouronnec, Anne-Marie. 2000. « Mesure des odeurs par analyse sensorielle ou "olfactométrie" ». *Pollution Atmosphérique* 168: 583-98.
- Guillot, Jean-Michel, et Caroline Luillery. 2017. « Évolution des normes de mesure des odeurs et des composés odorants ». *Pollution Atmosphérique*, n° 234. <https://doi.org/10.4267/pollution-atmospherique.6266>.
- ISO 13301. 2018. « ISO 13301:2018 Sensory analysis - Methodology - General guidance for measuring odour, flavour and taste detection thresholds by a three-alternative forced-choice (3-AFC) procedure ». ISO/TC 34/SC 12 Analyse sensorielle.
- Jia, Wenshen, Gang Liang, Yalei Wang, et Jihua Wang. 2018. « Electronic Noses as a Powerful Tool for Assessing Meat Quality: a Mini Review » 11. <https://doi.org/10.1007/s12161-018-1283-1>.
- Liang, Zhifang, Fengchun Tian, X. Simon Yang, Ci Zhang, Hao Sun, et Tao Liu. 2018. « Study on Interference Suppression Algorithms for Electronic Noses: A Review ». *Sensors* 18 (4). <https://doi.org/10.3390/s18041179>.
- Loutfi, Amy, Silvia Coradeschi, Ganesh Kumar Mani, Prabakaran Shankar, et John Bosco Balaguru Rayappan. 2015. « Electronic noses for food quality: A review ». *Journal of Food Engineering* 144 (janvier): 103-11. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.07.019>.
- Lynch, Patrick J. 2019. « Olfaction Par Patrick J. Lynch, medical illustrator — Patrick J. Lynch, medical illustrator, CC BY 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1498125> ». Wikipédia, l'encyclopédie libre. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1498125>.
- Majchrzak, Tomasz, Wojciech Wojnowski, Tomasz Dymerski, Jacek Gębicki, et Jacek Namieśnik. 2018. « Electronic noses in classification and quality control of edible oils: A review ». *Food chemistry* 246: 192-201.
- Marco, Santiago. 2014. « The need for external validation in machine olfaction: emphasis on health-related applications ». *Anal Bioanal Chem* 406: 3941-56. <https://doi.org/10.1007/s00216-014-7807-7>.
- Menini, P. 2012. « Du capteur de gaz à oxydes métalliques vers les nez électroniques sans fil ».
- NEN. 2012. « NTA 9055 (EN), Air quality - Electronic air monitoring - Odour (nuisance) and safety ».
- Rudnitskaya, Alisa. 2018. « Calibration Update and Drift Correction for Electronic Noses and Tongues ». *Frontiers in Chemistry* 6: 433. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00433>.
- Sambemana, Herizo. 2012. « Adaptation d'un nez électronique pour le contrôle de la concentration et de l'humidité d'une atmosphère chargée en huile essentielle destinée à un effet thérapeutique médical. » Université de Lorraine. <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01749225>.
- Schuermans, Valerie, ZiYu li, Audrey Jongen, Zhouqiao Wu, Jinyao Shi, Jiafu ji, et Nicole D. Bouvy. 2018. « Pilot Study: Detection of Gastric Cancer From Exhaled Air Analyzed With an Electronic Nose in Chinese Patients ». *Surgical innovation* 25 (5): 429-34. <https://doi.org/10.1177/1553350618781267>.
- Tonacci, Alessandro, Francesco Sansone, Raffaele Conte, et Claudio Domenici. 2018. « Use of Electronic Noses in Seawater Quality Monitoring: A Systematic Review ». *Biosensors* 8 (4). <https://doi.org/10.3390/bios8040115>.
- Van Harrevel, Anton P. 2017. « Progress in the review of EN13725: focus on sampling and uncertainty ». *Chemical Engineering Transactions* 40: 7.
- Wilson, Alphus. 2017. « Biomarker Metabolite Signatures Pave the Way for Electronic-nose Applications in Early Clinical Disease Diagnoses ». *Current Metabolomics* 5: 90-101. <https://doi.org/10.2174/2213235X04666160728161251>.
- Wilson, Alphus D. 2013. « Diverse applications of electronic-nose technologies in agriculture and forestry ». *Sensors (Basel, Switzerland)* 13 (2): 2295-2348. <https://doi.org/10.3390/s130202295>.
- Wilson, Alphus Dan. 2012. « Review of Electronic-nose Technologies and Algorithms to Detect Hazardous Chemicals in the Environment ». *First World Conference on Innovation and*

Computer Sciences (INSODE 2011) 1 (janvier): 453-63.
<https://doi.org/10.1016/j.protcy.2012.02.101>.

Wilson, D. Alphus. 2018. « Application of Electronic-Nose Technologies and VOC-Biomarkers for the Noninvasive Early Diagnosis of Gastrointestinal Diseases ». *Sensors* 18 (8).
<https://doi.org/10.3390/s18082613>.

10 Annexes

ANNEXE I – Répartition des personnes interrogées selon leur domaine d'activité

Typologie des personnes interrogées	Nombre d'entretiens
Acteurs académiques	17
Gestionnaires de la qualité de l'air	4
Acteurs industriels	12
Membres du COPIL	4
Acteurs d'autres domaines	3
Total	40

Signalement de nuisances olfactives provenant d'un local professionnel situé à Paris

Nom et prénom

du ou de la déclarant-e : _____

Adresse : _____

Code postal : _____ Bâtiment : _____ Escalier : _____

Étage : _____ Porte : _____

Digicode / Interphone : _____

Tél domicile : _____ Tél travail : _____

Portable : _____

Pour instruire votre signalement, une prise de contact est nécessaire.

Où pouvez-vous être joint par téléphone entre 9h et 17h pendant la semaine : _____

Courriel : _____ @ _____

Nom et adresse de l'établissement(s)

présumé(s) être à l'origine de la nuisance :

Décrivez précisément la nuisance :

Provenance et nature de la gêne : interne à l'immeuble côté cour de jour
 externe à l'immeuble côté rue de nuit

À quelle fréquence ? ponctuellement régulièrement permanente

Quel(s) jour(s) ? Lundi Mardi Mercredi Jeudi
 Vendredi Samedi Dimanche Tous les jours

À quelle heure ? _____ H _____ ou indiquer la tranche horaire entre _____ H et _____ H

Depuis quand subissez-vous cette gêne ? _____

Vous êtes-vous déjà plaint-e ? non oui

Si oui, auprès de qui ? _____

Quel a été le résultat obtenu ? _____

Fait à Paris, le : _____

Ce formulaire est à compléter et à renvoyer :

- par courriel : nuisances-pro@paris.fr
- par courrier : Ville de Paris

Bureau d'Actions contre les Nuisances Professionnelles
Direction de la Prévention, de la Sécurité et de la Protection
5, rue de Lobau, 75004 Paris

Pour toute information complémentaire, contactez le **3975*** ou consultez paris.fr
* Prix d'un appel local à partir d'un poste fixe

Figure 42 - Exemple de fiche de signalement de nuisances olfactives

ANNEXE III – Règlementation relative aux odeurs et aux nuisances olfactives

Les principaux textes relatifs à la gestion des odeurs (Gouronnec 2000) sont liés à la notion d'installation classée.

1810 Décret impérial du 14 octobre 1810 relatif aux Manufactures et Ateliers qui répandent une odeur insalubre ou incommode.

Ce décret vise à réduire ces nuisances.

1917 Loi 1917-12-19 du 19 décembre 1917 relative aux établissements dangereux, insalubres ou incommodes.

Les manufactures, ateliers, usines, magasins, chantiers et tous établissements industriels ou commerciaux qui présentent des causes de danger ou des inconvénients soit pour la sécurité, la salubrité ou la commodité du voisinage, soit pour la santé publique, soit encore pour l'agriculture, sont soumis à la surveillance de l'autorité administrative dans les conditions déterminées par la présente loi.

1961 Loi 61-842 du 2 août 1961 relative à la pollution atmosphérique et aux odeurs et portant modification de la précédente loi (loi du 19 décembre 1917).

Les immeubles, établissements industriels, commerciaux, artisanaux ou agricoles, véhicules ou autres objets mobiliers possédés, exploités ou détenus par toutes personnes physiques ou morales, devront être construits, exploités ou utilisés de manière à satisfaire aux dispositions prises en application de la présente loi afin d'éviter les pollutions de l'atmosphère et les odeurs qui incommode la population, compromettent la santé ou la sécurité publique, ou nuisent à la production agricole, à la conservation des constructions et monuments ou au caractère des sites.

1976 Loi 76-663 du 19 juillet 1976 relative aux Installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) et son décret d'application 77-1133 du 21 septembre 1977.

Les installations susceptibles de présenter des graves dangers ou inconvénients pour la commodité du voisinage à un régime l'autorisation préalable et à l'obligation d'accompagner leur demande d'autorisation d'une étude d'impact comportant un volet « odeurs ». À partir de 1996, ce volet comporte en sus une analyse des effets olfactifs de l'installation sur l'environnement ainsi que les mesures prévues par l'exploitant pour supprimer, limiter ou compenser les inconvénients de l'installation pour la commodité du voisinage.

1996 Loi 96-1236 du 30 décembre 1996 sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie (loi LAURE).

Elle est reprise aujourd'hui dans le **code de l'environnement (article L. 220-2)** et reconnaît comme pollution à part entière « toute substance susceptible de provoquer des nuisances olfactives excessives ».

1998 Arrêté du 2 février 1998 relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des ICPE soumises à autorisation (arrêté intégré) et sa circulaire d'application du 17 décembre 1998.

Cet arrêté précise les conditions d'exploitations des ICPE et définit pour la première fois une définition de la concentration et du débit d'odeurs.

Parallèlement, des installations non soumises à autorisation voient leur activité réglementée par des arrêtés sectoriels de plus en plus précis en matière d'odeurs :

2002 Arrêté sectoriel du 7 janvier 2002 applicable aux centres de compostage soumis à déclaration, qui mentionne que l'inspecteur des installations classées peut demander la réalisation, aux frais de l'exploitant, d'une campagne d'évaluation de l'impact olfactif de l'installation afin de qualifier l'impact et la gêne éventuelle et permettre une meilleure prévention des nuisances. Cette évaluation peut être réalisée à l'aide d'outils de simulation de la dispersion atmosphérique, s'appuyant sur des modèles mathématiques.

2003 Arrêté sectoriel du 12 février 2003 applicable aux ICPE soumises à autorisation sous la rubrique 2730 (traitement des cadavres, des déchets ou des sous-produits d'origine animale...) qui précise que la concentration d'odeur, dans un rayon de 3 km autour du site, ne doit pas dépasser 5 ou_E/m³ (unité européenne d'odeur par mètre cube d'air) plus de 175 heures par an pour les installations existantes ou plus de 44 heures par an pour les installations nouvelles et que, à défaut de la réalisation d'une étude de dispersion atmosphérique, la concentration d'odeur ne doit pas dépasser 1000 ou_E/m³.

Autres textes en lien avec la gestion des odeurs :

1975 Loi du 15 juillet 1975 relative à l'élimination des déchets et de la récupération des matériaux.

Cette loi spécifie que « Toute personne qui produit ou détient des déchets, dans des conditions de nature à [...] engendrer des bruits et des odeurs et d'une façon générale à porter atteinte à la santé de l'homme et à l'environnement, est tenue d'en assurer ou d'en faire assurer l'élimination [...] dans des conditions propres à éviter lesdits effets ».

De nombreuses activités liées aux déchets (transit, regroupement, tri, stockage, traitement...) sont soumises à la réglementation des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE).

1992 Loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau

Cette loi prévoit que les ouvrages, travaux et activités entraînant des prélèvements, déversements, écoulements ou rejets dans les eaux et ne figurant pas dans la nomenclature ICPE soient soumis à un régime similaire à celui des ICPE. De ce fait, les ouvrages de traitement et de collecte des eaux usées doivent, depuis 1994, joindre à leur dossier de demande d'autorisation les dispositions prises dans la conception et l'exploitation de l'installation pour minimiser l'émission des odeurs.

Les lois concernant les ICPE, les déchets et l'eau sont désormais intégrées au code de l'environnement.

ANNEXE IV – L'échelle TRL, et TRL estimés de certains nez électroniques en cours de développement

Les TRL (*Technology Readiness Level* ou niveau de maturité technologique) « *forment une échelle d'évaluation du degré de maturité atteint par une technologie* » (DGA, 2009). Ils permettent une meilleure lisibilité du niveau de maturité d'une technologie, de la probabilité qu'elle arrive sur le marché, de la durée avant laquelle elle pourrait arriver sur le marché.

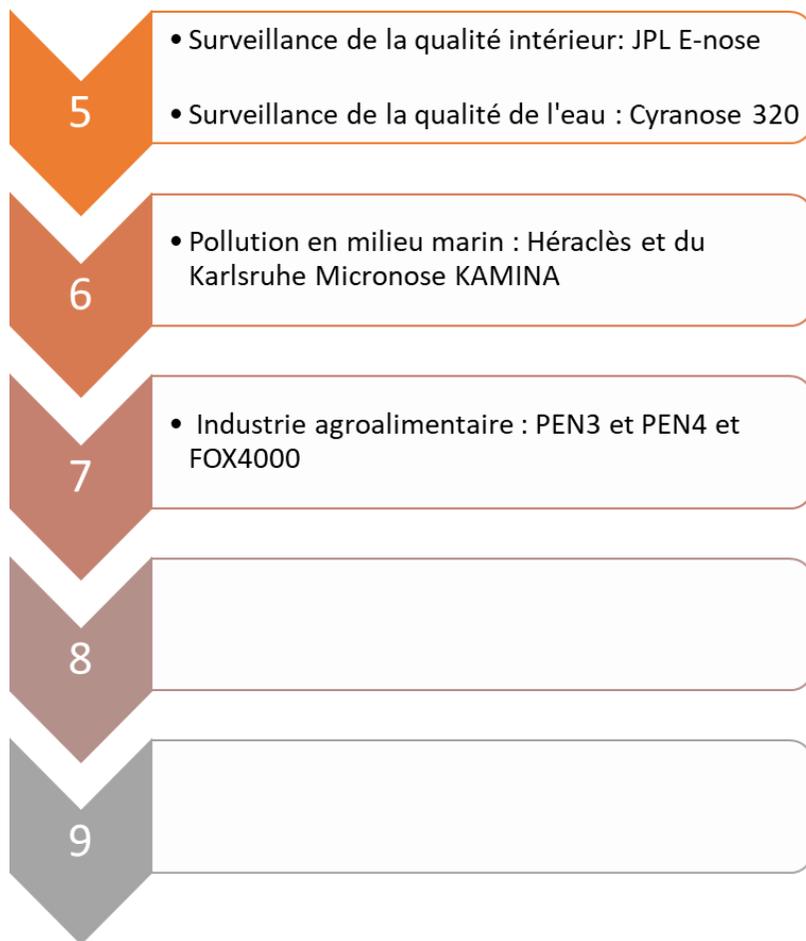
Niveau TRL	Définition	Description	Exemple de justifications demandées
1	Principe de base observé et décrit.	C'est le plus bas niveau de maturité technologique. La recherche scientifique. La recherche scientifique commence à être traduite en une recherche et développement (R&D) appliquée. Les exemples peuvent inclure des études papier portant sur les propriétés de base d'une technologie.	Publications de travaux de recherche identifiant les principes de base de la technologie. Références relatives à ces travaux.
2	Concept technologique et/ou application formulés.	L'invention commence. Les principes de base ayant été observés, des applications peuvent être envisagées. Elles sont spéculatives et il n'existe pas de preuve ou d'analyse détaillée pour étayer les hypothèses. Les exemples sont limités à des études analytiques.	Publications ou autres références qui esquissent l'application considérée et fournissent une analyse appuyant le concept.
3	La recherche scientifique commence à être traduite en une recherche et développement (R&D) appliquée. Les exemples peuvent inclure des études papier portant sur les propriétés de base d'une technologie.	Une R&D active est initiée. Elle comprend des études analytiques, et des études en laboratoire destinées à valider physiquement les prédictions analytiques faites pour les différents éléments de la technologie. Les exemples impliquent des composants non encore intégrés ou représentatifs.	Résultats de mesures en laboratoire portant sur les paramètres essentiels des sous-systèmes critiques et comparaison de ces résultats aux prédictions analytiques. Références relatives à la réalisation de ces tests et de ces comparaisons, (qui, où et quand ?)
4	Validation de composants et/ou de maquettes en laboratoire.	Des composants technologiques de base sont intégrés de façon à vérifier leur aptitude à fonctionner ensemble. La représentativité est relativement faible si l'on se réfère au système final. Les exemples incluent l'intégration en laboratoire d'éléments ad hoc.	Concepts envisagés du système et résultats d'essais de maquettes de laboratoire. Références relatives à la réalisation des travaux (qui, où et quand ?). Estimation des différences entre la maquette du matériel, les résultats des essais et les objectifs du système envisagé.

Niveau TRL	Définition	Description	Exemple de justifications demandées
5	Validation de composants et/ou de maquettes en environnement représentatif	La représentativité de la maquette technologique augmente significativement. Les composants technologiques de base sont intégrés à des éléments supports raisonnablement réalistes, de façon à être testés en environnement simulé. Les exemples incluent l'intégration hautement représentative de composants en laboratoire.	Résultats d'essais d'une maquette de laboratoire du système, intégrée à des éléments supports, dans un environnement opérationnel simulé. Écarts entre environnement représentatif et environnement opérationnel visé. Comparaison entre les résultats des essais et les résultats attendus. Problèmes éventuellement rencontrés. La maquette du système a-t-elle été raffinée pour mieux correspondre aux objectifs du système envisagé ?
6	Démonstration d'un prototype ou d'un modèle de système/ sous-système dans un environnement représentatif.	Un modèle représentatif ou un système prototype, allant bien au-delà de celui du TRL 5, est testé dans un environnement représentatif. Cela représente une étape majeure dans la démonstration de la maturité d'une technologie. Les exemples incluent les essais d'un prototype dans un environnement de laboratoire reproduisant fidèlement des conditions réelles ou les essais dans un environnement opérationnel simulé.	Résultats d'essais en laboratoire d'un système prototype très proche de la configuration désirée en termes de performance, masse et volume. Écarts entre l'environnement d'essai et l'environnement opérationnel. Comparaison entre les résultats des essais et les résultats attendus. Problèmes éventuellement rencontrés. Plans, options ou actions envisagés pour résoudre les problèmes rencontrés avant de passer au niveau suivant.
7	Démonstration d'un prototype du système dans un environnement opérationnel.	Prototype conforme au système opérationnel, ou très proche. Ce TRL représente un saut important par rapport au TRL 6, exigeant la démonstration d'un prototype du système réel dans son environnement opérationnel (par exemple dans un avion, dans un véhicule, dans l'espace). À titre d'exemple, on peut citer le test d'un prototype dans un avion banc d'essai.	Résultats d'essais d'un système prototype en environnement opérationnel. Identifications des entités ayant réalisé les essais. Comparaison entre les résultats des essais et les résultats attendus. Problèmes éventuellement rencontrés. Plans, options ou actions envisagés pour résoudre les problèmes rencontrés avant de passer au niveau suivant.

Niveau TRL	Définition	Description	Exemple de justifications demandées
8	Système réel achevé et qualifié par des tests et des démonstrations	La preuve est faite que la technologie fonctionne dans sa forme finale, et dans les conditions d'emploi prévues. Dans la plupart des cas, ce niveau de TRL marque la fin du développement du système réel. Les exemples incluent les tests et évaluations du système dans le système d'armes auquel il est destiné, afin de déterminer s'il satisfait aux spécifications.	Résultats d'essai du système dans sa configuration finale confronté à des conditions d'environnement couvrant l'ensemble du domaine d'utilisation. Évaluation de ses capacités à satisfaire les exigences opérationnelles. Problèmes éventuellement rencontrés. Plans, options ou actions envisagés pour résoudre les problèmes rencontrés avant de finaliser la conception.
9	Système réel qualifié par des missions opérationnelles réussies.	Application réelle de la technologie sous sa forme finale et dans des conditions de missions telles que celles rencontrées lors des tests et évaluations opérationnels. Les exemples incluent l'utilisation du système dans des conditions de mission opérationnelle.	Rapports de tests et d'évaluations opérationnels

=Sources : Quelques explications sur l'échelle des TRL (Technology Readiness Level) d'après le plan stratégique de recherche & technologie de défense et de sécurité – DGA 2009

Dispositifs fournissant un résultat relatif à la quantité d'odeur



Dispositifs ne fournissant pas un résultat relatif à la quantité d'odeur

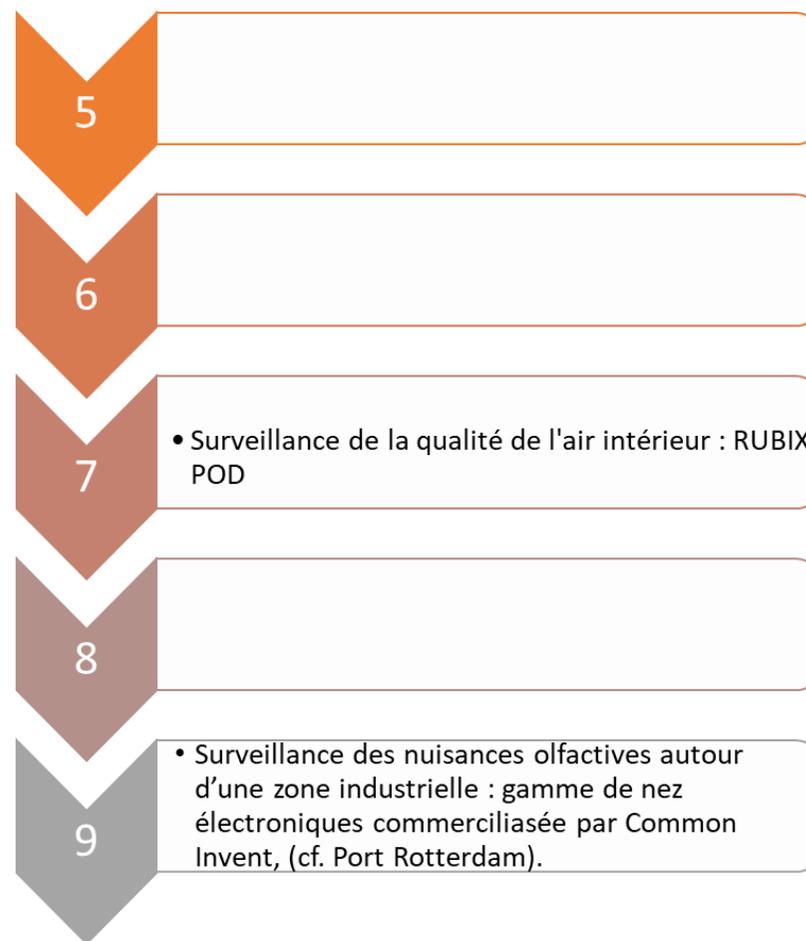


Figure 43 - Exemples de nez électroniques placés sur l'échelle TRL (RECORD 2020)

ANNEXE V - Les principales entreprises commercialisant des nez électroniques

Le tableau ci-dessous compile les noms des entreprises impliquées dans la conception et la commercialisation de nez électroniques, ainsi que les noms des produits qu'elles ont développés.

Société	Adresse	Pays	Produit	Domaine d'application
Neotronics Scientific LTD	Chelmsford	UK	Neotronic Nose	Monitoring de l'air ambiant
Electronic Sensor Technology Inc.	Newbury Park	USA (California)	zNose® (Model 4200, 7100)	Monitoring de l'air ambiant à proximité d'activités industrielles (Fonderie), de l'eau, fraude (café, miel), santé, sécurité
Technobiochip	Pozzuoli	Italie	LibraNose 2,1	Foresterie (détection de la contamination fongique du bois)
Sacmi Imola sarl		Italie	EOS 507C	Agroalimentaire (Détection de contamination bactérienne)
		Italie	EOS 835	
Aryballe Technologies	Grenoble	France	NeOse	Anosmie

Société	Adresse	Pays	Produit	Domaine d'application
Alpha MOS	Immeuble, Le Colombus, 4 Rue Brindejonc des Moulinais, 31500 Toulouse	France	HERACLES (nez électronique par chromatographie en phase gazeuse rapide) et HERACLES Neo	Agroalimentaire
				Surveillance de la pollution de l'eau de mer par les hydrocarbures
			FOX 3000 (MOS-e- nose), FOX 4000	
Implant Science Corporation		USA	Quantum Sniffer QS- H150	
SpectraFluidic s Inc		USA	Technologie développée par UCSB's Institute for Collaborative Biotechnologies	
SenSiC AB		Suède	Applied Sensor 3320 (analyse olfactive du lait)	Agroalimentaire
WOLF – Enose		UK		Agroalimentaire
Figaro USA Inc.		USA	Nombreux modèles (TGS 2620, 2610, 2600...)	Agroalimentaire
Cyranose Sciences Inc.	Hertz	UK	Cyranose 320	Agroalimentaire

Société	Adresse	Pays	Produit	Domaine d'application
ThermoFisher Scientific	5225 Verona Road Madison WI 53711	USA	Karlsruhe Micro Nose (KAMINA) Gas Sensor MicroArray	Agroalimentaire, qualité de l'air et de l'eau, détection des incendies, domaine médical
	5225 Verona Road Madison WI 53711	USA	Karlsruhe Micro Nose (KAMINA) Gas Sensor MicroArray	Qualité de l'air, détection des incendies, domaine médical
	5225 Verona Road Madison WI 53711	USA	Karlsruhe Micro Nose (KAMINA) Gas Sensor MicroArray	Eaux usées et potentiellement eau de mer
Bloodhound Sensors Ltd.		UK	BH-114	Agroalimentaire
Airsense Analytics	Schwerin	Allemagne	PEN 2	Agroalimentaire
		Allemagne	PEN 3	Agroalimentaire
SES Piezo Ltd.		UK		Agroalimentaire
Fragrance & Flavor Analyzer	Shimadzu	Japon	FF-2A	Agroalimentaire
Danish Odour Sensor System		Danemark	DOSS	Agroalimentaire
Odournet/Osm etech Inc.	Crewe/Woburn	UK/USA	Aromascan PLC	Monitoring de l'air ambiant

Société	Adresse	Pays	Produit	Domaine d'application
	Crewe	UK	Aromascan A32S	Agro-alimentaire ; Contrôle système d'abattement d'odeur de porcherie
Neotronics Scientific Ltd.	Chelmsford	UK	Neotronic Nose	Monitoring de l'air ambiant
Electronic Sensor Technology Inc.	Newbury Park	USA (California)	zNose® (Model 4200, 7100)	Monitoring de l'air ambiant à proximité d'activités industrielles (Fonderie), de l'eau, fraude (café, miel), santé, sécurité
Technobiochip	Pozzuoli	Italie	LibraNose 2,1	Foresterie (détection de la contamination fongique du bois)
Sciented Lab Center		Corée du sud	Odor Catch	Monitoring de l'air ambiant