



**HAL**  
open science

# Qualité de l'air et nuisances olfactives : Métrologie et cartographie des polluants gazeux, exposition et perception

Marie Verrièle

► **To cite this version:**

Marie Verrièle. Qualité de l'air et nuisances olfactives : Métrologie et cartographie des polluants gazeux, exposition et perception. Chimie analytique. Université de Lille, 2021. tel-04250971

**HAL Id: tel-04250971**

**<https://hal.science/tel-04250971v1>**

Submitted on 23 Oct 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License



# Habilitation à Diriger des Recherches

## Université de Lille- Ecole doctorale SMRE

Marie VERRIELE — DUNCIANU

IMT Nord Europe

CERI Energie et Environnement



Qualité de l'air et nuisances olfactives :  
Météorologie et cartographie des polluants  
gazeux, exposition et perception

Soutenue le 8 décembre 2021

Rapportrices :

Valérie Desauziers

Valérie Simon

Anne Claude Romain

Professeure, IMT Mines Alès

HDR, ENSIASSET

Professeure, Univ. Liège Arlon

Examineurs :

Géraldine Savary

Olivier Ramalho

Dominique Wolbert

Frédéric Thévenet

HDR, Univ. Normandie

Chercheur, CSTB

Professeur, Univ. Rennes

Professeur, IMT Nord Europe

Garante d'HDR :

Laurence Le Coq

Professeure, IMT Atlantique



**IMT Nord Europe**  
École Mines-Télécom  
IMT-Université de Lille



*A mes parents qui m'ont donné mes racines et mes ailes,  
A Marius,  
A mes filles.*

*Aux femmes, aux mères,  
Aux hommes et aux femmes qui les aiment.*





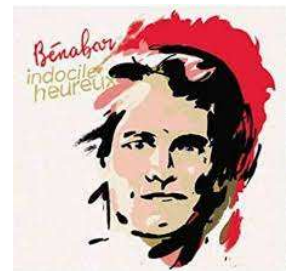


*A force de vouloir rentrer dans un moule, on finit par devenir tarte !*

*Attribué à Bernard Werber, écrivain,  
Ou à L'Impertinente, célèbre pâtissière lilloise (toi-même, tu sais).*

*Puisque la fortune sourit aux audacieux  
Soyons réalistes, exigeons l'impossible  
Même si l'on n'obtient pas toujours c'que l'on veut  
Admirons l'idéaliste incorrigible  
On admet bien l'inadmissible*

*Bénabar  
Exigeons l'impossible, indocile heureux, 2021*





## Avant-Propos

*Quasi huis-clos, le long métrage du Sud-Coréen Bong Joon-ho, s'ouvre et se clôt sur l'image de chaussettes pendues à un séchoir, dans l'obscurité d'un espace confiné. Le film Parasite dépeint un décalage entre deux familles, deux classes sociales, deux modes de pensée. La Maison-flacon de la famille Park enferme ses occupants dans une bulle olfactive (qu'eux-mêmes ne sentent pas) et qui ne tolère aucune intrusion qui ne leur soit pas familière. Les sillages émanant du chauffeur, de la gouvernante, et de la professeure d'art-thérapie, en réalité tous reliés par le même lien familial, agrègent leur identité olfactive ne se limitant pas à leur odeur corporelle, mais qui inclut aussi leurs univers culinaire, urbain et ménager.*

*Un espace confiné, une odeur inadéquate, des occupants préoccupés : la scène (photo ci-contre) rassemble tous les éléments qui m'ont importée pendant ces 10 années de recherche. Cet avant-propos vulgarise et ouvre donc avec évidence ce document de synthèse scientifique dont vous apprécierez j'espère la lecture.*



*D'après NEZ, la Revue Olfactive, N°8, 2019*



Dix années après avoir été diplômée d'un doctorat par l'Université de Lille, je me suis lancée dans l'exercice de synthèse de mon activité de recherche et d'enseignement. Ce travail est rassemblé dans ce document intitulé « Qualité de l'air et nuisances olfactives : métrologie et cartographie des polluants gazeux, exposition et perception » qui propose également les approfondissements et perspectives qui en découlent.

L'objet de mes recherches porte sur deux enjeux socio-économiques et sanitaires que sont *la qualité des environnements intérieurs* et *les nuisances environnementales*. Mon activité de recherche et d'enseignement repose sur un socle de compétences en métrologie des polluants traces de l'air que j'ai solidement acquis et renforcé auprès de Nadine LOCOGE, en thèse et depuis ma prise de poste de Maître-Assistante à l'Ecole des Mines de Douai, dans le département Energie et Environnement. Auprès d'elle, et des doctorants dont elle m'a confié l'encadrement, j'ai participé à l'évolution des thématiques de recherche du laboratoire. Après avoir acquis la prise de recul et la maturité scientifique, je coordonne aujourd'hui des projets collaboratifs, j'encadre ou co-encadre des doctorants, post-doctorants, étudiants et personnels techniques, et valorise le produit de mes travaux. J'intègre aujourd'hui 2 groupes thématiques au sein du Centre d'Enseignement, de Recherche et d'Innovation Energie et Environnement (CERI EE): le premier, dans lequel je suis majoritairement impliquée concerne la « Qualité de l'Air Intérieur » coordonné par Frédéric THEVENET ; et le second auquel je contribue

s'intitulant « Sources & Impacts » coordonné par Stéphane SAUVAGE. Mes compétences en analyse olfactive me distinguent au sein de ces groupes thématiques me permettant de proposer des approches de recherche.

L'interdisciplinarité (ou le décloisonnement entre les disciplines) et l'opérabilité des résultats marquent l'essentiel de mes projets de recherche, c'est pourquoi ils ont tous été réalisés dans le cadre de partenariats académiques ou industriels. Avant tout donc, je souhaite souligner que les avancées scientifiques décrites dans ce document sont le fruit du dynamisme de l'équipe, des collaborations fructueuses avec mes collègues enseignant-chercheurs, des efforts et de la qualité du travail des doctorants et post-doctorants que j'ai encadrés et enfin du support technique et de la richesse instrumentale que l'on trouve au laboratoire.

Ce document, rédigé en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches, présente :

**PARTIE A** – la synthèse de mon activité scientifique en recherche et enseignement ;

**PARTIE B** – l'intégration de mes activités de recherche en lien avec la qualité de l'air intérieur au sein de la communauté académique mais également en interaction avec le grand public ;

**PARTIE C** – l'apport de mes travaux en métrologie des composés odorants et analyse olfactive objectivée dans la gestion des nuisances environnementales.

Les parties B & C donnent dans un premier temps une vue d'ensemble de l'état de l'art du champ d'application, exposent mes contributions à la recherche et envisagent les approfondissements et perspectives à moyen et court termes.

<b>Avant-Propos .....</b>	<b>7</b>
<b>Partie A - Synthèse de l'activité scientifique : recherche &amp; enseignement .....</b>	<b>11</b>
Résumé .....	14
Carrière Académique .....	15
Partenariats Académiques, Industriels Et Institutionnels .....	18
Projets De Recherche Collaboratifs.....	19
Encadrement De Thèses, Masters .....	25
Publications Et Communications .....	27
Activités D'enseignement .....	33
Activités D'expertise De La Recherche .....	36
Implications Institutionnelles .....	36
Activités De Dissémination De La Recherche Vers Le Grand Public .....	36
<b>Partie B - Qualité des environnements intérieurs : diagnostic, compréhension des déterminants et implication citoyenne .....</b>	<b>39</b>
Dans Le Rétro . . . .....	43
B-1 Des développements métrologiques pour le diagnostic en air intérieur .....	47
B-2 Caractériser les sources et les puits en variant les échelles .....	53
B-3 Les projets CASPA comme solution de remédiation à la pollution en air intérieur .....	65
Dans le Viseur .....	70
References .....	76
<b>Partie C - Métrologie des COV odorants et analyse olfactive objectivée : une complémentarité d'approche pour la gestion des nuisances odorantes .....</b>	<b>79</b>
Dans Le Rétro . . . .....	82
C-1. Développements Métrologiques Pour La Surveillance Des Composés Odorants Dans L'air Ambient Et Les Atmosphères Confinées .....	85
C-2 Les Apports De L'analyse Olfactive Objectivée .....	93
Dans Le Viseur .....	97
References .....	99
<b>Post-face .....</b>	<b>101</b>





*Cette section décrit ma formation, mes activités de recherche et d'enseignement. Les étapes qui ont jalonnées ma carrière professionnelle sont retracées aboutissant à une description succincte de mon profil actuel d'enseignante-chercheuse. Une analyse bibliométrique de mon activité de publication est présentée ; mes implications dans les projets de recherche collaboratifs, les encadrements d'étudiants, et les activités de formation sont détaillées. Enfin quelques informations complémentaires sont apportées quant à ma participation à l'expertise de la recherche et à la dissémination vers le grand public.*

## Synthèse de l'activité scientifique : recherche & enseignement





RESUME.....	14
CARRIERE ACADEMIQUE.....	15
PARTENARIATS ACADEMIQUES, INDUSTRIELS et INSTITUTIONNELS.....	18
PROJETS DE RECHERCHE COLLABORATIFS.....	19
ENCADREMENT DE THESES, MASTERS.....	25
PUBLICATIONS et COMMUNICATIONS.....	27
ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT.....	33
ACTIVITES D'EXPERTISE DE LA RECHERCHE.....	36
IMPLICATIONS INSTITUTIONNELLES.....	36
ACTIVITES DE DISSEMINATION DE LA RECHERCHE VERS LE GRAND PUBLIC.....	36

### Listes des Tableaux et Figures

Tableau 1- 1 : Liste des partenariats académiques, industriels et institutionnels.....	18
Tableau 1- 2 Listes des projets collaboratifs, objectifs, contributeurs et source de financement.....	19
Tableau 1- 3 : Liste des thèses co-encadrées et sources de financement.....	25
Tableau 1- 4 : Liste des stages de Master 2 encadrés.....	26
Tableau 1- 5 : Liste des post-doctorants.....	26
Tableau 1- 6 : Listes des revues à comité de lecture de rang A et actes de congrès, facteurs d'impact sur 5 ans.....	28
Tableau 1- 7 : Conférences internationales et nationales majeures.....	28
Tableau 1- 8 : Liste des Brevets nationaux et des articles de revue et de recherche (juillet 2021).....	29
Tableau 1- 9 : Listes des articles en préparation.....	30
Tableau 1- 10 : Listes des communications orales (juillet 2021).....	31
Tableau 1- 11 : Listes des communications par affiches (juillet 2021).....	33
Tableau 1- 12 : Activités d'enseignement délivrés dans le cadre de la formation initiale des élèves ingénieurs de l'IMT Nord Europe.....	34
Tableau 1- 13 : Exemple de sujets proposés aux élèves ingénieurs dans le cadre des projets de découverte de la recherche.....	34
Tableau 1- 14 : Interventions diverses envers la société civile et le monde socio-économique.....	37
Figure 1- 1: Cartographie des projets de recherche menés et thèses co-encadrées selon les axes stratégiques qu'ils recouvrent.....	17
Figure 1- 2 : Evolution du nombre de documents publiés entre 2011 et 2021 dans des journaux à comité de lecture (barres bleues) et nombre de citations (surface orange).....	27
Figure 1- 3 : Nombre de communication orales (barres bleues) et par affiche (barres oranges) effectuées entre 2011 et 2021 dans des conférences internationales.....	28

**Dr. Marie VERRIELE-DUNCIANU**



née le 8 avril 1985, à Dunkerque

Mariée, 2 enfants (2016-2017)



Nationalité française

 marie-verriele


RESEARCHERID AAE-1572-2021

 0000-0002-3043-19915 18533925**Statut : Maître Assistant**

Qualifiée au statut de Maître de Conférences, section 31 (campagne 2021)

**Institution : Institut Mines Telecom Nord Europe**Centre d'Enseignement, de Recherche et d'Innovation *Energie & Environnement* 941, rue Charles Bourseul 03 27 71 24 80

BP 10838 - 59508 Douai cedex, France

 marie.verriele@imt-lille-douai.fr**Parcours académique**

- 2012 à aujourd'hui *Maître Assistante, CERI EE, IMT Nord Europe*  
 ➤ 9 projets de recherche en collaboration (consortium nationaux)  
 ➤ 11 co-encadrements de doctorants (3 en cours)
- 2008-2011 **Thèse de doctorat**, financement CIFRE, PSA  
*Influence de la nature des matériaux et de leur utilisation en tant que pièces automobiles sur la qualité de l'air à l'intérieur d'un habitacle de véhicule*  
 Etablissement : Université de Lille  
 Laboratoire : Ecole des Mines de Douai – Département Chimie et Environnement  
 Directrice de Thèse : Nadine Locoge
- 2006-2008 **Master en Chimie fine** ; spécialité Arômes, Parfums, Cosmétique  
 Université du Havre

**Thématiques de recherche :** # Qualité de l'Air Intérieur - Métrologie des composés organiques volatils - Interactions Gaz/Surface - Management des nuisances odorantes environnementales

Mes activités de recherche reposent sur des compétences en **physico-chimie de l'atmosphère** appliquées à deux enjeux socio-économiques et sanitaires que sont la qualité de l'air intérieur et les nuisances odorantes environnementales. Mes axes de recherches recouvrent plusieurs axes stratégiques :

- le développement métrologique pour l'échantillonnage et la mesure des Composés Organiques Volatils (COV) dont les COV odorants ;
- l'investigation de solutions de remédiation à la pollution en air intérieur ;
- la compréhension des déterminants-clés de la qualité de l'air intérieur : émissions / interactions gaz-surface / devenir des polluants / aérodynamique-thermique ;
- le développement d'approches reposant sur l'analyse olfactive objectivée pour aider à la compréhension de la qualité perçue des émissions odorantes.

**Activités d'enseignement :** # La méthode du Langage des Nez® - Management des nuisances odorantes – Géométrie des Odeurs

Mes compétences en analyse olfactive constitue le socle de mes activités d'enseignement qui concerne essentiellement le management des nuisances odorantes, déclinées à plusieurs niveaux : étudiants, industriels, agents territoriaux (DREAL, AASQA) et riverains. Ces formations sont labellisées par la marque déposée Langage des Nez®, pour laquelle je contribue au sein d'un groupe de travail à sa dissémination et à l'encadrement des contenus de formation.

Je pilote la création d'une formation originale et innovante proposant à la fois une formation à la QAI et au diagnostic olfactif.

Je contribue à l'encadrement des étudiants de l'IMT Nord Europe en tant que tuteur de stage et tuteur académique dans le cadre de la formation par apprentissage.

## CARRIERE ACADEMIQUE

**Génèse/** Ma carrière académique repose sur une base de compétences multidisciplinaires acquises lors de mon parcours universitaire. Après une licence de Chimie Générale obtenue à l'Université du Littoral Côte d'Opale (Dunkerque), je me suis dirigée vers un Master en Chimie fine, à l'Université du Havre, dans la spécialité Arômes - Parfums. L'enseignement délivré en Master alliait Chimie Organique, Chimie analytique, Rhéologie et texturologie, Physio-psychologie olfactive et cutanée et Analyse Sensorielle. Dès mes études universitaires, j'ai eu à cœur de combiner les approches sensorielles et instrumentales. J'ai accompagné lors des stages que j'ai suivis en Licence et lors de ma 1<sup>ère</sup> année de Master, des doctorants qui m'ont tout naturellement dirigés vers la recherche et plus spécifiquement vers la thématique scientifique que je soutiens aujourd'hui. En 2<sup>ème</sup> année de Master, j'ai initié au sein du groupe PSA un travail de recherche sur la caractérisation de la qualité odorante des habitacles de voiture.

2006-2008

**STAGES pendant la période universitaire****Licence**

URCOM, Université du Havre  
– 3 mois

Caractérisation physico-chimique de gommages de xanthane et galactomannanes

**Master 1**

IFTH, Villeneuve d'Ascq  
– 4 mois

Validation d'un protocole d'échantillonnage des COV émis par les matériaux automobile – Evaluation et optimisation des compétences d'un panel pour l'analyse olfactive

**Master 2**

PSA - Vélizy-Villacoublay  
– 8 mois

Création d'un référentiel en vue de l'analyse olfactive de l'air d'habitacles automobile et de matériaux

**Formation Doctorale/** A l'issue de mon stage de Master 2, et des contacts établis à l'Ecole des Mines de Douai, le constructeur automobile PSA a permis le financement de ma bourse de thèse. Engagée dans une démarche d'amélioration de la qualité de l'air habitacle de ses véhicules en vue de garantir une ambiance olfactive agréable, la division *Peintures, Matériaux et Procédés* (PMXP) de chez PSA s'est associée au département *Chimie et Environnement* de l'Ecole des Mines de Douai pour ses compétences en termes de métrologie des COV et de compréhension des sources d'émission.

2008-2011

**THESE de doctorat – Bourse CIFRE – PSA Peugeot Citroën**

Université de Lille 1  
Ecole des Mines de Douai  
Ecole Doctorale SMRE  
Discipline : OLPCA

Directeur de thèse : Hervé Plaisance, Ecole des Mines de Douai  
Encadrement : Nadine Locoge, Ecole des Mines de Douai ; Virginie Vandebilcke et Guillaume Meunier, PSA Peugeot Citroën

Soutenue le 13/12/2011

Président du jury : Jean- François Pauwels  
Rapporteurs : Valérie Desauziers, Claire Sulmont

Mention Très Honorable  
avec félicitations du jury

Nature et origines des composés organiques volatils et odeurs présents dans un habitacle de véhicule Impact des pièces automobiles sur la qualité de l'air intérieur.

**Objectifs & Avancées majeures/** La Qualité de l'Air Habitacle (QAH) s'évalue par l'innocuité des composés émis dans l'habitacle vis-à-vis des voies respiratoires et de la peau. Elle se traduit également par l'odeur générée par le mélange de ces composés.

L'objectif de mes travaux de thèse était d'accroître la connaissance des sources d'émissions de composés organiques volatils (COV) et odorants dans un habitacle automobile et d'évaluer leurs contributions aux concentrations et à l'odeur perçue dans l'habitacle. Si le laboratoire d'accueil avait la maîtrise des compétences métrologiques nécessaires, elles n'avaient pour autant jamais été mises en application dans le contexte de la qualité de l'air habitacle. J'ai donc apporté par mon travail des connaissances et un savoir-faire nouveau par le biais d'approches dédiées aux COV odorants et une approche faisant intervenir des données issues de l'analyse sensorielle.

Mon travail de thèse a permis spécifiquement le développement de méthodes dédiées à l'échantillonnage et l'analyse des amines. Ce développement a été permis par l'acquisition d'une chaîne d'analyse par chromatographie ionique couplée à la spectrométrie de masse. Une méthode d'évaluation olfactive, spécifique aux ambiances d'habitacle automobile a été développée sur la base des principes de l'analyse olfactive objectivée.

Sur un véhicule donné, l'application des méthodes de caractérisation physico-chimiques et sensorielles ont permis d'estimer l'impact de chacune des pièces de l'habitacle sur la QAH, d'une part, grâce à la mise en œuvre d'un modèle de calcul des contributions des pièces aux teneurs ambiantes de l'habitacle (Chemical Mass Balance); et d'autre part, grâce à des analyses multi-variées à partir des profils sensoriels. L'utilisation d'approches hybrides couplant données physico-chimiques et données sensorielles est un apport propre à mon travail de thèse.

Enfin, ma thèse a permis d'initier la collaboration entre PSA et l'Ecole des Mines de Douai qui se poursuit encore aujourd'hui.

**Parcours de recherche en tant qu'Enseignant-Chercheur à l'IMT Nord Europe** C'est 4 mois après ma soutenance de thèse que j'ai intégré en 2012 le département *Chimie et Environnement* de l'Ecole des Mines de Douai, en tant qu'Enseignant-Chercheur, sous le titre de Maître-Assistant. La création de mon poste a permis dans un premier temps de développer plus encore la discipline historique du laboratoire « Métrologie des COV ». Cela a constitué un socle de base afin de répondre aux enjeux liés à la qualité de l'air intérieur et aux nuisances odorantes environnementales.

IMT Nord Europe  
EMD →

J'occupe donc actuellement les fonctions d'Enseignant – Chercheur au sein du Centre d'Enseignement de Recherche et d'Innovation *Energie & Environnement* de l'IMT Nord Europe, fruit de la fusion en 2017 de l'Ecole des Mines de Douai et de Télécom Lille et de la restructuration de l'école en 3 CERI. Le CERI EE intègre 2 unités : SAGE (Sciences de l'Atmosphère et Génie de l'Environnement) à laquelle je suis rattachée et ECSP (Efficacité Énergétique des Composants, Systèmes et Procédés) avec laquelle de récentes interactions ont été créées.

Le domaine de recherche de l'unité SAGE porte sur la physico-chimie des espèces traces de l'air et ses champs d'application. Il vise à une meilleure compréhension des processus de génération et de transformation des polluants de l'air afin de proposer des solutions adaptées aux besoins de la société et des acteurs économiques.

De par la qualité des publications internationales du CERI EE, l'IMT Nord Europe a intégré en 2020 le classement mondial de Shanghai dans la thématique « Sciences de l'Atmosphère ». L'évaluation HCERES 2018-2019 a mis en exerce « la thématique de la qualité de l'air comme un sujet de très forte actualité » et a perçu « le très bon dynamisme et les ambitions affirmées pour l'avenir » de l'unité de recherche SAGE.

Mes problématiques de recherche intègrent le périmètre de 2 Groupes Thématiques créés en 2019 : « Qualité de l'Air Intérieur » et « Sources et Impacts des polluants traces de l'air ». Je travaille donc sur deux compartiments de l'air : troposphère et atmosphères confinées, dans lesquels évolue un mélange de polluants

d'une grande diversité, à l'état de traces, issus de sources le plus généralement diffuses. Durant ces 9 dernières années, j'ai développé 4 axes de recherche. Ces axes se sont construits avec la contribution de 6 projets de recherche multi-partenariaux dont 2 en coordination, de 11 encadrements de thèse (dont 7 soutenues et 4 en préparation).

<b>2012 - Aujourd'hui</b>	<b>Axe de recherche stratégiques</b>	
	<p>❶ le développement métrologique pour l'échantillonnage et la mesure des Composés Organiques Volatils (COV) dont les COV odorants ;</p>	<p>❷ la compréhension des déterminants-clés de la qualité de l'air intérieur : émissions / interactions gaz-surface / devenir des polluants / aéraulique ;</p>
	<p>❸ l'investigation de solutions de remédiation à la pollution en air intérieur ;</p>	<p>❹ le développement d'approches reposant sur l'analyse olfactive objectivée pour aider à la compréhension de la qualité perçue des émissions odorantes.</p>

*Dans le but d'apporter des réponses opérationnelles, ces axes stratégiques reposent sur des approches qui prennent en compte les diverses composantes d'une même problématique.*

- (i) *Les démarches pluridisciplinaires : comparaison entre données expérimentales et modélisées ; combinaison des approches instrumentales et sensorielles ;*
- (ii) *L'association entre les observations de terrain et les études en milieu contrôlé : des micro réacteurs aux enceintes à échelle 1:1 ;*
- (iii) *La production de données innovantes par des acteurs non scientifiques, les citoyens, afin d'identifier des solutions et assurer leur efficacité et leur acceptabilité ;*

*donnent le cadre de développement intégré à mes recherches.*

Il est à souligner que l'ensemble des travaux répertoriés dans cette synthèse ont tous été suivis en étroite interaction avec d'autres équipes de recherche académiques mais aussi industrielles et institutionnelles ; la liste des partenariats rappelée ci-après ainsi que les 66 co-auteurs de mes publications en témoignent également.

La Figure 1- 1 permet de situer les projets de recherche et thèses parmi les axes stratégiques. Généralement chaque projet ou thèse recouvre un axe principal (indiqué en gris foncé) complété par un axe secondaire (indiqué en gris clair). Cette cartographie permet de visualiser l'ampleur de la dominante « Développement Métrologique » dans mon travail de recherche.

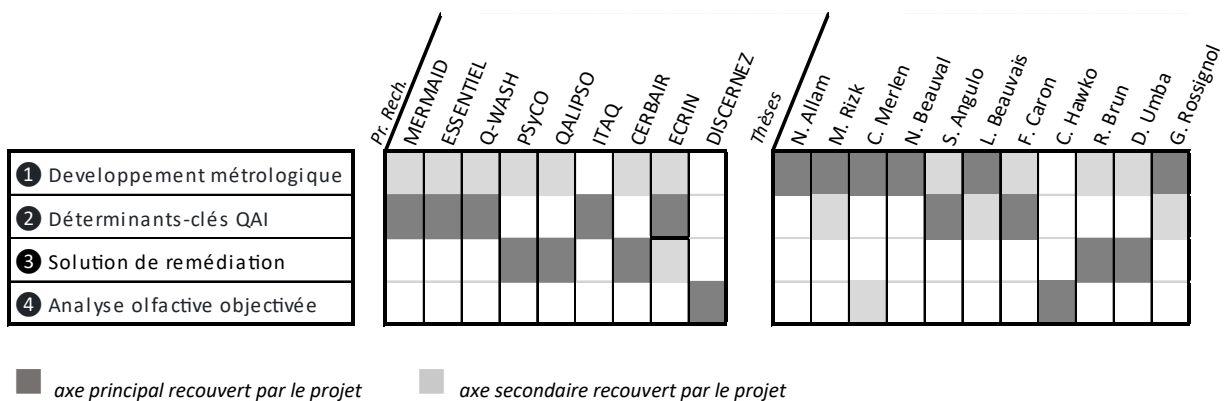


Figure 1- 1: Cartographie des projets de recherche menés et thèses co-encadrées selon les axes stratégiques qu'ils recouvrent

**PARTENARIATS ACADEMIQUES, INDUSTRIELS et INSTITUTIONNELS**

Le Tableau 1- 1 ci-après liste en 3 sections l'ensemble des partenariats (i) académiques, (ii) industriels, et (iii) institutionnels établis lors de mon parcours depuis la thèse. Ils sont donnés dans l'ordre des collaborations établies. Ces partenariats ont donné lieu aux projets de recherche collaboratifs et ont participé au financement des thèses co-encadrées.

Tableau 1- 1 : Liste des partenariats académiques, industriels et institutionnels.

<b>Partenariats Académiques (France)</b>		
<b>Entité</b>	<b>Collaborateur(s)</b>	<b>Discipline</b>
<b>GEPEA UMR 6144 CNRS</b> IMT Atlantique / Université De Nantes	Laurence Le Coq	Chimie des Procédés
<b>DEMO</b> Ecole des Mines de Saint Etienne	Mireille Batton-Hubert	Modélisation
<b>PC2A UMR 8522 CNRS</b> Université de Lille	Coralie Schoemaeker Benjamin Hanoune	Chimie Atmosphérique
<b>ICPEES</b> Université de Strasbourg	Stéphane Le Calvé	Chimie Analytique
<b>LIVE UMR 7362 CNRS</b> Université de Strasbourg	Nadège Blond	Modélisation
<b>LASIE</b> Université de La Rochelle	Patrice Blondeau	Modélisation
<b>IMPECS</b> Université de Lille	Delphine Allorge Anne Garat Jean Marc Lo Guidice Sébastien Anthérieux Guillaume Garçon	Toxicologie
<b>URCOM</b> Université du Havre	Géraldine Savary Nicolas Hucher	Analyse Sensorielle
<b>TVES</b> Université du Littoral Côte d'Opale	Séverine Frère	Sciences Humaines

<b>Partenariats Académiques (International)</b>		
<b>Entité</b>	<b>Collaborateur(s)</b>	<b>Discipline</b>
<b>CAMBI</b> Université de Bucarest (Roumanie)	Ilinca Nastase Cristiana Croitoriu	Mécanique des Fluides

<b>Partenariats Industriels</b>			
<b>Entreprises</b>	<b>Collaborateur(s)</b>	<b>Axe de recherche concerné</b>	<b>Type</b>
<b>PSA GROUP</b>	Virginie Vandebilcke Guillaume Meunier Juliette Quartararo	Développement métrologique Déterminants QAI	Multi-nationale
<b>GROUPE TERA</b>	Pascal Kalusny Vincent Ricard	Développement métrologique	PME
<b>SAINT GOBAIN RECHERCHE</b>	Marion Chenal Valérie Goletto	Solution remédiation	Multi-nationale
<b>OSMANTHE</b>	Arnaud Vatinel	Analyse olfactive objectivée	TPE
<b>COZYAIR</b>	Lamia Miallet	Solution remédiation	Start-up

Partenariats Institutionnels		
Entité	Collaborateur(s)	Domaine
INRS	Laurence Robert Romain Guichard	Prévention du travail
CSTB	Mélanie Nicolas François Maupetit	Bâtiment
ATMO NORMANDIE	Céline Léger Véronique Delmas	Qualité de l'Air
ATMO HAUTS DE FRANCE	Violaine Dion Laure Roussel Benoit Rocq	Qualité de l'Air

## PROJETS DE RECHERCHE COLLABORATIFS

Depuis ma thèse, j'ai contribué à 9 projets de recherche à l'échelle nationale dont 2 en tant que coordinatrice ; en réponse principalement à des Appels à Projets lancés par l'ADEME. Le Tableau 1-2 synthétise pour chacun d'entre eux les objectifs principaux, les budgets associés et financeurs, et aussi les équipements distinctifs et novateurs sur lesquels ils reposent (acquis ou non dans le cadre des projets). Bien évidemment en marge des projets acceptés, d'autres ont été déposés sans obtenir de financement favorable ; si cela représente un temps non négligeable pour le montage et le dépôt de ceux-ci, ils ont contribué à affiner les problématiques de recherche et les orientations scientifiques à titre personnel comme au périmètre de l'équipe.

Tableau 1- 2 Listes des projets collaboratifs, objectifs, contributeurs et source de financement

### MERMAID 2012-2016

*Caractérisation détaillée de l'air intérieur des bâtiments BBC par couplage entre Mesures Expérimentales Représentatives et Modélisation Air Intérieur Détaillée*

**Contributeurs**  
PC2A, Univ. Lille  
SAGE, IMT Nord Europe, Douai  
LIVE, Univ. Strasbourg  
ICPEES, Univ. Strasbourg  
LaSIE, Univ. La Rochelle  
ASPA, Strasbourg

La mise en évidence et la compréhension des processus physiques (émission, dépôt, adsorption/désorption) et chimiques (oxydation en phase gazeuse, décomposition de surface, formation de particules) responsables de la présence de polluants en air intérieur dans des bâtiments BBC non résidentiels constituaient les objectifs principaux du projet MERMAID. Il s'est appuyé sur la constitution d'une base de données expérimentales ainsi que sur l'utilisation d'outils de modélisation permettant la hiérarchisation des processus déterminants de la QAI dans ce type de bâtiment.

**Coordinateur :**  
Coralie Schoemaeker (PC2A)

L'acquisition d'une base de données différenciante en termes d'espèces mesurées et avec une résolution temporelle fine, tout comme la construction d'un modèle de prédiction prenant en compte la réactivité en air intérieur sont des résultats majeurs du projet. Il a montré la complexité et la pertinence de caractériser l'air intérieur des bâtiments énergétiquement performants et mis en évidence le besoin d'approfondir (i) la contribution des surfaces en tant que puits de polluants, (ii) le rôle de la chimie homogène et hétérogène en tant que source de polluants secondaires, et (iii) la nécessité des études de terrain.

Dans ce projet ma contribution a été la supervision d'une pré-campagne de diagnostic de la QAI sur 10 établissements scolaires, la participation à 2 campagnes de terrain intensives ainsi que l'encadrement de la thèse de M. RIZK associée au projet qui a couvert les aspects émissions et contribution des surfaces en tant que puits de polluants.

Equipements distinctifs et novateurs utilisés par le projet :

PTR-ToF-MS pour le suivi des COV en air intérieur  
FLEC pour la caractérisation de l'interaction COV/surface



Thèse rattachée :

M. RIZK, Développement, validation et mise en œuvre sur le terrain d'une méthode de caractérisation in-situ des processus de sorption des COV par les matériaux de construction.

<b>Budget total : 707 k€</b>	AAP PRIMEQUAL Environnements intérieurs et approches innovantes
<b>Aide demandée : 683 k€</b>	ADEME
<i>Dont 63 k€ (EMD)</i>	

### PSyCO 2015-2016

*Performances des Systèmes Passifs d'Épuration de l'Air Intérieur en Conditions Réelles*

<b>Contributeurs</b> SAGE, IMT Nord Europe, Douai	L'objectif du projet PSyCO a été d'évaluer l'impact des matériaux de construction épurateurs disponibles dans le commerce sur la qualité de l'air intérieur. Il a permis l'élaboration d'un protocole de qualification des matériaux adsorbants épurateurs passifs en conditions réelles ainsi que la détermination des paramètres d'adsorption des matériaux étudiés. Les essais ont été menés dans la pièce expérimentale de grand volume IRINA. Un évènement de pollution typique de l'air intérieur est généré dans la chambre afin d'évaluer les performances de purification de l'air à long terme des matériaux sélectionnés dans différentes conditions environnementales. Ce projet a contribué à l'amendement des normes relatives à l'efficacité des produits sorptifs.
<b>Coordinateur :</b> Frédéric THEVENET (Ecole des Mines, Douai)	

Equipements distinctifs utilisés par le projet :  
Pièce IRINA

<b>Budget total : 75 k€</b>	Carnot Mines
<b>Aide demandée : 75 k€</b>	
<i>Dont 75 k€ (IMT Nord Europe)</i>	

### ESSENTIEL 2017-2021

*EmissionS et TransformationS dEs COV odoraNts Terpéniques : Impact sur la qualité de l'air intérieur*

<b>Contributeurs</b> SAGE, IMT Nord Europe CSTB	Les pratiques émergentes en environnement intérieur en termes notamment d'utilisation de produits à base d'huile essentielles sont préoccupantes pour la qualité de l'air intérieur et l'exposition des occupants. L'usage des huiles essentielles, à inclure dans les produits ménagers écologiques ou à diffuser dans l'air ambiant représente une source massive de COV odorants terpéniques en air intérieur. Le projet ESSENTIEL a visé la caractérisation de l'impact de l'utilisation d'huiles essentielles sur la qualité de l'air intérieur à travers leur émission et leur devenir, notamment leurs interactions avec le bâti et les éléments de décoration.
<b>Coordinateur :</b> Frédéric THEVENET (IMT Nord Europe)	

L'établissement de profils d'émission réalistes par typologie de produits (directement utilisable pour l'évaluation de l'exposition individuelle aux terpène en air intérieur) et la mise en évidence de l'interaction des COV terpéniques avec les surfaces ainsi que la formation de sous-produits particuliers sont les résultats marquants du projet ESSENTIEL.

Ce projet a contribué au développement de la pièce expérimentale IRINA, dispositif expérimental unique et de grande taille a qui a démontré l'intérêt des études sur l'air intérieur à l'échelle 1:1.

Dans ce projet, j'ai eu la co-responsabilité d'une tâche visant l'évaluation des émissions et du devenir des polluants dans la pièce IRINA. J'ai assuré les développements métrologiques, participé à l'élaboration des protocoles et

été la garante de la qualité des mesures. J'ai co-encadré la thèse de S. ANGULO associée à ce projet.

Equipements distinctifs et novateurs utilisés par le projet :

Compact-GC pour le suivi des COV terpénique en air intérieur  
FLEC pour la caractérisation de l'interaction COV/surface  
Pièce expérimentale IRINA

Thèse rattachée :

S. ANGULO, Emissions of terpenes from the use of essential-oil-based household products under realistic conditions: impact on indoor air quality.

**Budget total : 294 k€**

**Aide demandée : 206 k€**

*Dont 103 k€ (IMT Nord Europe)*

AAP Connaissance, Réduction à la source et Traitement des Emissions dans l'Air 2017  
ADEME

### QALIPSO 2019-2021

*Qualité de l'Air dans les Logements Individuels et analyse Psycho-Sociologique du comportement des Occupants.*

#### Contributeurs

CERI EE, IMT Nord Europe  
Atmo HDF

#### Coordinateur :

Marie VERRIELE DUNCIANU  
(IMT Nord Europe)

Le développement des nouvelles technologies de l'information et de la communication, la démocratisation de dispositifs techniques individuels et l'essor des réseaux sociaux permettent de renforcer la participation citoyenne dans le domaine de la qualité de l'air. Les approches multi-disciplinaires mêlant sciences sociales, sciences dures et sciences de l'ingénieur, impliquant chercheurs et citoyens, et reposant sur l'utilisation de microcapteurs, ont fait leurs preuves pour l'amélioration des connaissances des perceptions citoyennes et des comportements.

Les questions posées par le projet QALIPSO concerne les leviers qui peuvent donner à l'occupant l'envie d'agir dans son environnement domestique pour moins s'exposer aux pollutions. Il veut se focaliser sur la définition des modalités d'accompagnement nécessaire à une famille pour la mise à disposition d'une station de mesure de la qualité de l'air intérieur en vue d'identifier et de réduire les sources de pollution de son logement.

Ma contribution dans ce projet, en tant que coordinatrice a été de synchroniser l'ensemble des parties prenantes qui recouvrent de multiples champs disciplinaires : sociologues, métrologues, data scientists. J'ai eu la responsabilité de l'organisation des réunions techniques et comités de pilotage en lien avec l'ADEME et la communauté d'agglomération du Douaisis, ainsi que la validation des communications scientifiques et vers le grand public. Je co-encadre la thèse de D. UMBA associé au projet qui couvre la partie métrologie et traitement de données du projet.

Equipements distinctifs et novateurs utilisés par le projet :

Captothèque de 45 mini-stations de mesure pour la pollution de l'Air Intérieur

Thèse rattachée :

D. UMBA KALALA, QOUSTO : Qualification d'Outils numériques pour une Surveillance personnalisée et citoyenne de l'exposition aux polluants de l'air.

**Budget total : 276 k€**

**Aide demandée : 193 k€**

*Dont 80 k€ (IMT Nord Europe)*

APR DIQACC Données individuelles de la qualité de l'air et changement de comportements 2018  
ADEME

**Q-wASH 2019-2022**

*Qualité de l'air et Activités domestiques : influence du Séchage du linge sur le confort Hygrothermique et les concentrations en polluants dans l'habitat*

**Contributeurs**

CERI EE, IMT Nord Europe  
Atmo HDF

**Coordinateur :**

Marie VERRIELE DUNCIANU  
(IMT Nord Europe)

La problématique de l'humidité en air intérieur ne se pose pas uniquement en termes d'excès et d'élimination, mais plutôt en termes d'équilibre à maintenir. Cet équilibre est continuellement influencé par les échanges avec l'air extérieur et par les interactions avec les surfaces du bâti, mais surtout par des sources internes. L'activité de séchage du linge est clairement identifiée comme l'activité la plus émissive d'humidité en air intérieur. Cependant aucune donnée qualitative et quantitative précise n'est disponible au sujet de l'impact réel de cette pratique sur les paramètres de confort et la qualité de l'air intérieur (QAI).

Par ailleurs, au-delà des aspects liés à l'humidité, les dynamiques d'émission et de piégeage de COV associées au séchage du linge à l'air libre, en lien avec les détergents utilisés, restent à renseigner pour évaluer l'incidence de cette pratique sur la QAI. L'objectif général du projet Q-wASH est de caractériser l'impact du séchage du linge sur le confort hygrothermique du logement et plus généralement sur la qualité de l'air intérieur.

Ma contribution dans ce projet, en tant que coordinatrice a été de synchroniser l'ensemble des parties prenantes, d'organiser les réunions techniques et les comités de pilotage en lien avec l'ADEME. Je suis co-responsable d'une tâche qui vise l'évaluation de l'impact du séchage du linge à l'échelle 1. Je suis sur ce projet garante des protocoles et de la qualité des mesures effectuées.

Equipements distinctifs et novateurs utilisés par le projet :

Compact-GC pour le suivi des COV terpénique en air intérieur  
Pièce expérimentale IRINA

**Budget total : 281 k€**

**Aide demandée : 172 k€**

*Dont 111 k€ (IMT Nord Europe)*

AAP CONnaissance, Réduction à la source et Traitement des Emissions dans l'Air 2019  
ADEME

**ITAQ et ITAQ<sup>2</sup> 2019-2023**

*Interaction Thermique-Aéraulique du bâtiment & Qualité de l'air intérieur .... vers la construction 4.0*

**Contributeurs**

IMT Nord Europe

**Coordinateur :**

Frédéric THEVENET (IMT Nord Europe)

Les déterminants de la QAI impliquent des processus physico-chimiques nombreux et complexes (émission, puits, réactivité). Par ailleurs, le transport des polluants dans un milieu confiné résulte des différents phénomènes de diffusion et de convection fortement influencés par la turbulence ou la température. La collecte temporelle des champs de vitesse, de température et de concentration dans les milieux intérieurs est donc essentielle. Toutes ces données sont nécessaires à l'amélioration des modèles de prédiction de la QAI et à leur paramétrisation.

En vue de prendre en compte la problématique de la QAI en considérant les aspects aéraulique et thermique du bâtiment, le projet ITAQ (2020-2021) a

visé d'une part le développement d'un outil de modélisation basé sur l'utilisation de codes CFD permettant de décrire les processus déterminants de la QAI à l'échelle d'une pièce, d'un bâtiment. Il a permis aussi de compléter l'équipement de la pièce expérimentale IRINA et d'un bâtiment démonstrateur à énergie positive par une instrumentation mixte capables de renseigner à la fois les concentrations en polluants et les caractéristiques thermo-fluidiques.

Dans un second temps, le projet ITAQ<sup>2</sup> (2021-2022) complète cette démarche d'instrumentation en intégrant un renforcement expérimental et numérique sur les aspects thermiques de façon à mieux renseigner les interactions entre les processus aéraulique, thermiques et la qualité de l'air.

Dans ce projet, je contribue à faire le lien entre les concepteurs du modèle et les équipes techniques assurant l'instrumentation de la pièce IRINA et du bâtiment BE+. J'apporte mes connaissances sur les déterminants de la QAI afin que les processus physico-chimiques associés soient inclus de manière pertinente au modèle développé.

Equipements distinctifs et novateurs utilisés par le projet :

Outil de modélisation CFD

Pièce expérimentale IRINA et bâtiment BE+

Dispositif de mesures thermiques : Background Oriented Schlieren: imagerie BOS

**Ressourcement interne :**  
60 k€

AAP Interne IMT Nord Europe 2020 & 2021

## CERb'AIR 2020-2022

*Capteurs pour l'évaluation de l'Exposition peRsonnelle aux polluants de l'Air*

### Contributeurs

IMT Nord Europe

TVES (ULCO)

LADYSS (Université de Nanterre)

COZYAIR (StartUp)

### Coordinateur :

Nadine Locoge (IMT Nord Europe)

L'exposition des populations aux polluants de l'air, tant à ceux de l'air ambiant que ceux présents dans les environnements intérieurs est une question d'actualité pour laquelle une prise de conscience s'opère auprès de chaque individu. Le manque d'accessibilité aux données individualisées de qualité de l'air et la complexité des paramètres d'influence rendent les actions à l'échelle individuelle difficile à identifier. Un changement d'échelle avec la possibilité d'apporter une information personnalisée relative à l'exposition de chaque individu pourrait permettre un changement de comportement et ainsi rendre chaque individu acteur de son environnement.

Le projet CERb'AIR propose un démonstrateur sur plusieurs dizaines d'individus de la potentialité du changement de comportement associé à l'utilisation d'un système d'évaluation en temps réel de l'exposition aux polluants de l'air.

Ma contribution sur ce projet sera de guider l'analyse supervisée des données en collaboration avec un data scientist. J'assurerai la mise en perspective des résultats issus de ces analyses avec les conclusions émanant du projet sur le plan sociologique.

Equipements distinctifs et novateurs utilisés par le projet :

Prototypes OEEIL, dispositif  $\mu$ -capteur pour l'évaluation de l'exposition personnelle aux polluants de l'air

**Budget total : 308 k€****Aide demandée : 168 k€***Dont 94 k€ (IMT Nord Europe)*

AAP PARTENARIAT PUBLIC-PRIVE IRENE 2019

Région Hauts de France

**CPER ECRIN 2021-2027***Environnement Climat – Recherche et INnovation***Contributeurs**

Univ. Lille  
 IMT Nord Europe  
 ULCO - UPJV  
 CNRS, IPL, INSERME, CHUL,  
 UTC, UPHF, INERIS, SATT  
 Nord, CUD

Le projet ECRIN portent sur l'identification et la compréhension des impacts du changement climatique sur la physico-chimie de l'atmosphère, la santé et les services écosystémiques. Il a l'ambition de proposer des actions d'adaptation et d'atténuation en vue de la réduction de notre empreinte environnementale.

**Site porteur :**

ISITE ULNE et Alliance A2U

Ma contribution sur ce projet sera de piloter un sous-WP centré sur la question de l'exposition aux polluants en environnement intérieur. Il entre dans une tâche de travail plus large sur le lien entre la santé des populations, le climat et l'environnement. Il s'agit donc d'un travail multidisciplinaire puisqu'il s'agira de mener une analyse multiparamétrique des inégalités de santé à partir des dimensions sanitaire, environnementale et socio-économique.

**Budget total : 39M€**

Contrat Plan Etat Région – Région Hauts de France

**DISCERNEZ 2021-2023***Développement d'outils de gestion des nuisances odorantes en milieu urbain dense : cartographie prédictive de propagation de panache odorant et formation de NEZ-citoyens***Contributeurs**

URCOM (Univ. Le Havre  
 Normandie)  
 IMT Nord Europe  
 ARIA Technologie  
 Atmo Normandie  
 Osmanthe

Le projet DISCERNEZ a pour objectif général le développement d'un outil d'évaluation des nuisances odorantes en milieu urbain en se basant sur la méthodologie du Langage des Nez®. Depuis plusieurs années, cette méthodologie de caractérisation objective des odeurs est appliquée et a permis une bonne connaissance de l'environnement olfactif au niveau de la zone industrielle du Havre. Ces connaissances et savoir-faire ont principalement été utilisés au service de l'action afin de réduire les nuisances olfactives. Il apparaît néanmoins que pour rendre l'approche encore plus pertinente et opérationnelle, un outil de modélisation des panaches odorants est indispensable.

**Coordinateur :**

Géraldine Savary (URCOM)

Le projet DISCERNEZ vise la mise à disposition d'un modèle numérique de dispersion des émissions odorantes capable de fournir une cartographie prédictive portant sur les aspects qualitatifs et quantitatifs des odeurs. Comprendre et gérer les nuisances inhérentes et leurs impacts lors d'incidents industriels mais aussi au quotidien dans les zones urbano-industrielles permettra une meilleure prise en compte de la dimension odeur par les différents acteurs (services de l'État, services d'intervention, collectivités...).

Equipements distinctifs et novateurs utilisés par le projet :

Outil de cartographie prédictive des émissions odorantes

**Budget total : 407 k€****Aide demandée : 200 k€***Dont 45 k€ (IMT Nord Europe)*

ANR Flash – APR SIOMRI

## ENCADREMENT DE THESES, MASTERS

Certains des encadrements de thèses et de masters auxquels j'ai participé ont bénéficié du soutien scientifique des projets pré-cités, sans pour autant y puiser les ressources de financement. D'autres sont autoporteurs, et notamment les projets de thèses financés par le dispositif CIFRE. Le Tableau 1- 3 reporte l'ensemble des thèses co-encadrées, leur sources de financement, et rappelle ceux qui y ont contribué : les doctorants, directeurs de thèse et co-encadrants. Mon taux d'implication dans l'encadrement est indiqué entre parenthèses. Le Tableau 1- 4 fait la liste des stages de Master 2 encadrés et le Tableau 1- 5 la liste des post-doctorants avec qui j'ai collaboré.

Tableau 1- 3 : Liste des thèses co-encadrées et sources de financement

<b>Année de soutenance - Nom du doctorant, Titre de la thèse Direction de thèse et co-encadrement (entité)*, pourcentage d'encadrement</b>	<b>Financement</b>
<b>2015 - N. ALLAM</b> , Estimation des émissions surfaciques du biogaz dans une installation de stockage des déchets non dangereux. <i>Direction : L. Le Coq (Ecole des Mines de Nantes), N. Locoge</i> <i>Co-encadrement : M. Verrielle Duncianu (25%)**, M. Batton-Hubert , (Ecole des Mines de Saint Etienne)</i>	Séché Environnement
<b>2015 - M. RIZK</b> , Développement, validation et mise en œuvre sur le terrain d'une méthode de caractérisation in-situ des processus de sorption des COV par les matériaux de construction. <i>Direction : N. Locoge, S. Le Calvé (Université de Strasbourg)</i> <i>Co-encadrement : M. Verrielle Duncianu (60%), S. Dusanter</i>	ADEME/Mines Douai
<b>2017 - C. MERLEN</b> , Développement et validation métrologique de préleveurs passifs pour la surveillance des composés volatils odorants dans l'air ambiant. <i>Direction : N. Locoge</i> <i>Co-encadrement : M. Verrielle Duncianu (40%), S. Crunaire, P. Kaluzny (TERA Environnement)</i>	CIFRE – TERA Environnement
<b>2018 - N. BEAUVAL</b> , Évaluation de l'impact sanitaire des cigarettes électroniques : caractérisation physicochimique des e-liquides et des e-vapeurs <i>Direction : N. Locoge, D. Allorge (Université de Lille 2)</i> <i>Co-encadrement : M. Verrielle Duncianu (20%), A. Garat (Université de Lille 2)</i>	IMT LD /Faculté Pharmacie
<b>2019 - S. ANGULO</b> , Emissions of terpenes from the use of essential-oil-based household products under realistic conditions: impact on indoor air quality. <i>Direction : F. Thevenet</i> <i>Co-encadrement : M. Verrielle Duncianu (40%), M. Nicolas (CSTB)</i>	CSTB/IMT LD
<b>2020 - L. BEAUVAIS</b> , Développement d'un outil de diagnostic in-situ des émissions de Composés Organiques Volatils en vue de la maîtrise de l'odeur et des concentrations en polluants dans l'habitable. <i>Direction : N. Locoge</i> <i>Co-encadrement : M. Verrielle Duncianu (80%), J. Quartararo (PSA)</i>	CIFRE - PSA
<b>2021 - F. CARON</b> , Caractérisation des mécanismes de transfert de COV à l'interface matériau-air pour le développement de modèles numériques prévisionnels de la qualité de l'air intérieur. <i>Direction : F. Thevenet</i> <i>Co-encadrement : M. Verrielle Duncianu (30%), R. Guichard (INRS), L. Robert (INRS)</i>	INRS
<b>A soutenir (10 novembre 2021) - C. HAWKO</b> , Contrôle des émissions atmosphériques industrielles au Havre pour la réduction des odeurs quotidiennes et lors d'incidents. <i>Direction : N. Locoge, G. Savary (Université du Havre)</i>	Université du Havre

Co-encadrement : M. Verrièle Duncianu (30%), S. Crunaire, N. Huchet (Université du Havre), C. Léger (Atmo Normandie)

**Prévue en 2022 - R. BRUN**, Etude des performances des matériaux de construction à matrice organique pour l'amélioration de la qualité de l'air intérieur. CIFRE - SGR

Direction : F. Thevenet

Co-encadrement : M. Verrièle Duncianu (30%), M. Chenal (SGR)

**Prévue en début 2023 - D. UMBA KALALA, QOUSTO** : Qualification d'Outils numériques pour une Surveillance personnalisée et citoyenne de l'exposition aux polluants de l'air. ADEME – Région Hauts de France

Direction : N. Locoge

Co-encadrement : M. Verrièle Duncianu (30%), S. Crunaire, N. Redon

**Prévue en fin 2023 - G. ROSSIGNOL, ILINQA** : Impact des composés libérateurs de formaldéhyde, présents dans la formulation des produits ménagers, sur la Qualité de l'Air intérieur. ADEME/CSTB

Direction : F. Thevenet

Co-encadrement : M. Verrièle Duncianu (40%), M. Nicolas (CSTB)

---

\* si l'entité n'est pas indiquée : IMT Nord Europe

Tableau 1- 4 : Liste des stages de Master 2 encadrés

**Année de soutenance - Nom du stagiaire, Titre du stage**

**2014 - C. MERLEN**, Analyse des composés soufrés dans l'air ambiant

Financement : TERA Environnement

**2015 - D. DAUDIN-DEMAN**, Mise au point de méthodes permettant la mesure spatiale du méthane autour d'installation de traitement des déchets

Financement : IMT Nord Europe

**2017 - F. CARON**, Etude de la durée de vie des matériaux de construction purificateurs d'air

Financement : Saint Gobain Recherche

**2018 - R. BRUN**, Etude des propriétés de piégeage d'un mélange de COV par des matériaux de construction à matrice inorganiques

Financement : Saint Gobain Recherche

**2018 - S. THLAJEH**, Fate of terpenes in indoor environment: uptake of limonene onto construction materials

Financement : Labex CaPPA

**2020 - M. AMAOUCHE**, Modélisation haute-fidélité de la qualité de l'air intérieur par simulation numérique CFD

Financement : IMT Nord Europe

**2021 - P. DEBRAY**, Simulation numérique de la dispersion d'un polluant en régime transitoire dans un environnement intérieur

Financement : IMT Nord Europe

---

Tableau 1- 5 : Liste des post-doctorants

**Année et durée de contrat- Nom du post-doctorant, Mission confiée, Projet associé**

**2016**, 6 mois – M. RIZK Détermination des propriétés de dépollution de matériaux typiques des environnements intérieurs.

Financement : Projet PSyCO

**2018**, 11 mois – P. HARB - Détermination des propriétés de sorption de matériaux typiques des environnements intérieurs.

Financement : *Projet ESSENTIEL*

**2020**, 24 mois - A. EID - Analyse supervisée de données de pollution de l'air.

Financement : *Projet QALIPSO & CERb'AIR*

**2021**, 14 mois – F-CARON – Investigation de l'impact du séchage du linge sur la QAI.

Financement : *Projet Q-WaSH*

**2021**, 21 mois – C. HAWKO – Cartographie prédictive des nuisances olfactives.

Financement : *Projet DISCERNEZ*

## PUBLICATIONS et COMMUNICATIONS

J'ai contribué à la rédaction de **29 documents**: 2 articles de revue et 27 articles de recherche [A1-A29]. Je suis première auteure de 7 de ces documents, 3 ont été publiés pendant ma thèse. 21 publications sont portées (en premier auteur) par des doctorants que j'ai encadrés ; la rédaction de ces articles a donc été le cadre également d'un travail de formation à la recherche et au métier de chercheur.

J'ai participé à 26 conférences internationales, ayant donné lieu à **40 communications orales** [C1-C40], **6 communications par affiches** [C41-C46] et **articles de colloques** publiés dans des actes de congrès.

Je suis également co-auteur de **d'1 brevet** [B1].

Ces travaux ont été publiés avec la collaboration de 65 co-auteurs : chercheurs, doctorants et post-doctorants, techniciens et ingénieurs du monde académique et industriel.

Ma productivité scientifique ainsi que l'impact de mes travaux sont représentés par un **h-index de 8**.



La Figure 1- 2 donne un aperçu du rythme de publication que j'ai suivi ; le nombre de citations permet d'évaluer l'impact de la publication de mes recherches sur l'avancement des connaissances scientifiques. Le Tableau 1- 6 recense les **14 revues** dans lesquelles ont été publiés les articles, ainsi que leurs facteurs d'impacts respectifs. Le Tableau 1- 8 et le Tableau 1- 9 donne la liste exhaustive des brevets et articles publiés et en préparation.

Figure 1- 2 : Evolution du nombre de documents publiés entre 2011 et 2021 dans des journaux à comité de lecture (barres bleues) et nombre de citations (surface orange)

\*2021 : chiffres au 31/7/21

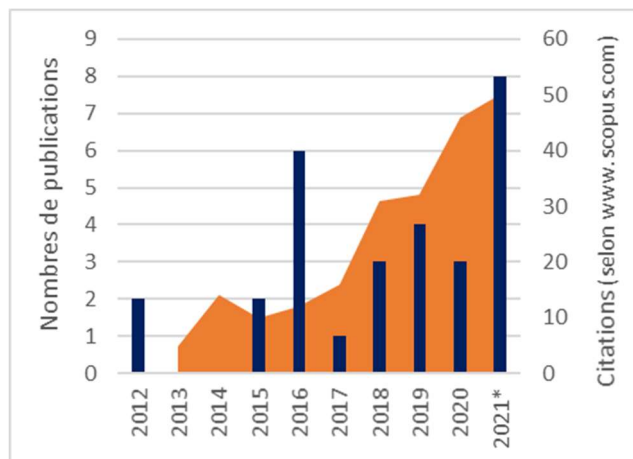




Tableau 1- 6 : Listes des revues à comité de lecture de rang A et actes de congrès, facteurs d'impact sur 5 ans

	<b>Facteur d'impact</b>	<b>Nombre de documents</b>
<b>Revue à comité de lecture de Rang A</b>		<b>29 articles</b>
<i>Building And Environment</i>	5.459	4
<i>Atmospheric Environment</i>	4.63	3
<i>Indoor Air</i>	4.52	2
<i>Microchemical Journal</i>	3.273	2
<i>Talanta</i>	4.711	2
<i>Environmental Science And Pollution Research</i>	3.306	2
<i>International Journal Of Hygiene And Environmental Health</i>	5.081	1
<i>Journal Of Environmental Monitoring</i>	3.238	1
<i>Journal Of Hazardous Materials</i>	8.512	1
<i>Journal Of Sensory Studies</i>	2.780	1
<i>Science of the Total Environment</i>	6.551	1
<b>Somme</b>	<b>93.508</b>	<b>20</b>
<i>Data In Brief</i>	-	2
<b>Somme</b>		<b>2</b>
<i>Chemical Engineering Transactions</i>	1.42	4
<i>Iop Conference Series Materials Science And Engineering</i>	0.53	2
<i>Wit Transactions On Ecology And The Environment</i>	0.21	1
<b>Somme</b>	<b>6.95</b>	<b>7</b>

La Figure 1- 3 donne un aperçu de l'évolution du nombre de communications orales et par affiches auxquelles j'ai participé entre 2009 et 2021. Le Tableau 1- 7 recense les colloques et conférences internationales et nationales majeures auxquelles je participe de façon récurrente. Le Tableau 1- 10 et le Tableau 1- 11 donnent la liste exhaustive des publications par affiche et communications orales.

Figure 1- 3 : Nombre de communication orales (barres bleues) et par affiche (barres oranges) effectuées entre 2011 et 2021 dans des conférences internationales

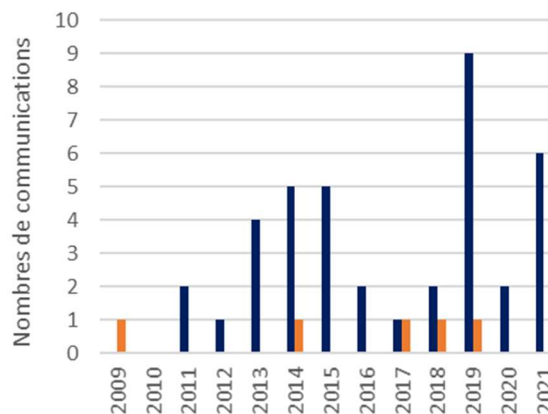


Tableau 1- 7 : Conférences internationales et nationales majeures

<b>Conférences internationales</b>	<b>Organisateur</b>
<i>Indoor Air, 2012/2016/2020</i>	ISIAQ
<i>Healthy Buildings 2015/2017/2021</i>	ISIAQ
<i>IAQVEC 2016/2019</i>	
<i>NOSE 2016/2020</i>	AIDIC
<b>Conférences nationales</b>	<b>Organisateur</b>
<i>Atmos'Fair, annuel</i>	Webs Event

Tableau 1- 8 : Liste des Brevets nationaux et des articles de revue et de recherche (juillet 2021)

Les 10 articles les plus cités sont surlignés en gras ; sont indiqués à la fin de chaque référence le nombre de citation

- [B1] Merlen, C., Verrielle, M., Crunaire, S., Locoge, N., Procédé de préparation d'un adsorbant pour composés organiques volatils, procédé de quantification de composés organiques volatils, 1760296 (n° dépôt), 30/10/2017
- [A1] **Verrielle, M., H. Plaisance, V. Vandenbilcke, N. Locoge, J.N. Jaubert, et G. Meunier. « Odor evaluation and discrimination of car cabin and its components: Application of the "field of odors" approach in a sensory descriptive analysis ». *Journal of Sensory Studies* 27, n° 2 (2012): 102-10. (Nombre de citations: 26)**
- [A2] **Verrielle, M., H. Plaisance, L. Depelchin, S. Benchabane, N. Locoge, et G. Meunier. « Determination of 14 amines in air samples using midjet impingers sampling followed by analysis with ion chromatography in tandem with mass spectrometry ». *Journal of Environmental Monitoring* 14, n° 2 (2012): 402-8. (Nombre de citations: 22)**
- [A3] Verrielle, M., N. Allam, L. Depelchin, L. Le Coq, et N. Locoge. « Improvement in 8h-sampling rate assessment considering meteorological parameters variability for biogas VOC passive measurements in the surroundings of a French landfill ». *Talanta* 144 (2015): 294-302.
- [A4] Rizk, M., M. Verrielle, M. Mendez, S. Dusanter, C. Schoemaeker, S. Le Calvé, et N. Locoge. « In-situ measurements of sorption parameters with a field and laboratory emission cell (FLEC): A comparison to the test emission chamber method ». *WIT Transactions on Ecology and the Environment* 198 (2015): 329-35
- [A5] **Rizk, M., M. Verrielle, S. Dusanter, C. Schoemaeker, S. Le calve, et N. Locoge. « Fast sorption measurements of volatile organic compounds on building materials: Part 1 - Methodology developed for field applications ». *Building and Environment* 99 (2016): 200-209. (Nombre de citations: 12)**
- [A6] **Rizk, M., M. Verrielle, Mendez, M., Blond, N., S. Dusanter, C. Schoemaeker, Blondeau, P., S. Le calve, et N. Locoge. « Fast sorption measurements of VOCs on building materials: Part 2 - Comparison between FLEC and CLIMPAQ methods ». *Building and Environment* 99 (2016): 239-51. (Nombre de citations: 10)**
- [A7] Rizk, M., M. Verrielle, S. Dusanter, C. Schoemaeker, S. Le Calve, et N. Locoge. « Fast sorption measurements of volatile organic compounds on building materials: Part 1 - Methodology developed for field applications ». *Data in Brief* 6 (2016): 953-58.
- [A8] Rizk, M., M. Verrielle, M. Mendez, N. Blond, S. Dusanter, C. Schoemaeker, P. Blondeau, S. Le Calvé, et N. Locoge. « Data on comparison between FLEC and CLIMPAQ methods used for fast sorption measurements of VOCs on building materials ». *Data in Brief* 7 (2016): 518-23.
- [A9] **Verrielle, M., C. Schoemaeker, B. Hanoune, N. Leclerc, S. Germain, V. Gaudion, et N. Locoge. « The MERMAID study: indoor and outdoor average pollutant concentrations in 10 low-energy school buildings in France ». *Indoor Air* 26, n° 5 (2016): 702-13. (Nombre de citations: 38)**
- [A10] Merlen, C., M. Verrielle, S. Crunaire, V. Ricard, P. Kaluzny, et N. Locoge. « Assessment of uncertainty in measurements of reduced sulfur compounds by active sampling on Tenax TA® tubes ». *Chemical Engineering Transactions* 54 (2016): 37-42.
- [A11] Merlen, C., M. Verrielle, S. Crunaire, V. Ricard, P. Kaluzny, et N. Locoge. « Quantitative or only qualitative measurements of sulfur compounds in ambient air at ppb level? Uncertainties assessment for active sampling with Tenax TA® ». *Microchemical Journal* 132 (2017): 143-53.
- [A12] Merlen, C., M. Verrielle, S. Crunaire, V. Ricard, P. Kaluzny, et N. Locoge. « A preconcentration method based on a new sorbent for the measurement of selected reduced sulfur compounds at ppb level in ambient air ». *Microchemical Journal* 143 (2018): 47-54.
- [A13] **Rizk, M., F. Guo, M. Verrielle, M. Ward, S. Dusanter, N. Blond, N. Locoge, et C. Schoemaeker. « Impact of material emissions and sorption of volatile organic compounds on indoor air quality in a low energy building: Field measurements and modeling ». *Indoor Air* 28, n° 6 (2018): 924-35. (Nombre de citations: 10)**
- [A14] **Thevenet, F., O. Debono, M. Rizk, F. Caron, M. Verrielle, et N. Locoge. « VOC uptakes on gypsum boards: Sorption performances and impact on indoor air quality ». *Building and Environment* 137 (2018): 138-46. (Nombre de citations: 23)**
- [A15] **Beauval, N., M. Verrière, A. Garat, I. Fronval, R. Dusautoir, S. Anthérieu, G. Garçon, J.-M. Lo-Guidice, D. Allorge, et N. Locoge. « Influence of puffing conditions on the carbonyl composition of e-cigarette aerosols ». *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 222, n° 1 (2019): 136-46. (Nombre de citations: 23)**
- [A16] Angulo Milhem, S., M. Verrielle, M. Nicolas, et F. Thevenet. « Impact of essential-oil-based cleaning products on indoor air quality: From liquid composition to test emission chamber », IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 609, 4, (2019).

- [A17] Caron, F., R. Guichard, L. Robert, M. Verrielle, et F. Thevenet. « Impact of ventilation on indoor air quality: Singular behaviour of formaldehyde ». *Chemical Engineering Transactions* 74 (2019): 997-1002.
- [A18] Caron, F., R. Guichard, L. Robert, M. Verrielle, et F. Thevenet. « Assessment of an experimental method for determining the three key parameters of VOC emissions from solid materials », IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 609, 4, (2019).
- [A19] Urupina, D., V. Gaudion, M.N. Romanias, M. Verrielle, et F. Thevenet. « Method development and validation for the determination of sulfites and sulfates on the surface of mineral atmospheric samples using reverse-phase liquid chromatography ». *Talanta* 219 (2020).
- [A20] Caron, F., R. Guichard, L. Robert, M. Verrielle, et F. Thevenet. « Behaviour of individual VOCs in indoor environments: How ventilation affects emission from materials ». *Atmospheric Environment* 243 (2020).
- [A21] **Angulo Milhem, S., M. Verrielle, M. Nicolas, et F. Thevenet. « Does the ubiquitous use of essential oil-based products promote indoor air quality? A critical literature review ». *Environmental Science and Pollution Research* 27, n° 13 (2020): 14365-411. (Nombre de citations: 6)**
- [A22] **Dusautoir, R., G. Zarcone, M. Verrielle, G. Garçon, I. Fronval, N. Beauval, D. Allorge, et al. « Comparison of the chemical composition of aerosols from heated tobacco products, electronic cigarettes and tobacco cigarettes and their toxic impacts on the human bronchial epithelial BEAS-2B cells ». *Journal of Hazardous Materials* 401 (2021). (Nombre de citations: 4)**
- [A23] Angulo-Milhem, S., M. Verrielle, M. Nicolas, et F. Thevenet. « Indoor use of essential oils: Emission rates, exposure time and impact on air quality ». *Atmospheric Environment* 244 (2021).
- [A24] Angulo-Milhem, S., M. Verrielle, M. Nicolas, et F. Thevenet. « Indoor use of essential oil-based cleaning products: Emission rate and indoor air quality impact assessment based on a realistic application methodology ». *Atmospheric Environment* 246 (2021).
- [A25] Thevenet, F., M. Verrielle, P. Harb, S. Thlajeh, R. Brun, M. Nicolas, et S. Angulo-Milhem. « The indoor fate of terpenes: Quantification of the limonene uptake by materials ». *Building and Environment* 188 (2021).
- [A26] Hawko, C., Verrielle, M., Hucher, N., Crunaire, C., Léger, C., Locoge, N., Savary, G., « Modeling the quality of odor mixtures in environment: a new approach using the experimental mixture design combined with the Langage des nez® ». *Chemical Engineering Transactions* (2021)
- [A27] Hawko, C., Verrielle, M., Hucher, N., Crunaire, C., Léger, C., Locoge, N., Savary, G., « Toward an objective odor characterization of compounds emitted in industrial zones: the Langage des Nez® as an efficient tool ». *Chemical Engineering Transactions* (2021).
- [A28] Hawko, C., Verrielle, M., Hucher, N., Crunaire, C., Léger, C., Locoge, N., Savary, G. « Objective odor analysis of incidentally emitted compounds using the Langage des Nez® method: application to the industrial zone of Le Havre ». *Environmental Science and Pollution Research* (2021) doi: 10.1007/s11356-021-12899-6.
- [A29] Hawko, C., M. Verrielle., N. Hucher., C. Crunaire., C. Léger., N. Locoge., G. Savary., « A review of environmental odor quantification and qualification methods: the question of objectivity in sensory analysis ». *Science of The Total Environment* (2021) <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148862>

Tableau 1- 9 : Listes des articles en préparation

- [P1] Hawko, C., M. Verrielle., N. Hucher., C. Crunaire., C. Léger., N. Locoge., G. Savary., "Investigation of the odor quality of pollutant mixtures for the environmental odor nuisance management", *soumis*
- [P2] Hawko, C., M. Verrielle., N. Hucher., C. Crunaire., C. Léger., N. Locoge., G. Savary., Dataset for studying the stability of various odorants in canisters and Nalophan® bags. Data in Brief, *soumis*
- [P3] Angulo-Milhem, S., M. Verrielle, M. Nicolas, et F. Thevenet. « Real consumer use patterns of essential-oil-based household products: Emission rate assessment in a real scale 40 m<sup>3</sup> room and impact on indoor air quality », à *soumettre*
- [P4] Angulo-Milhem, S., M. Verrielle, M. Nicolas, et F. Thevenet. « Real consumer use patterns of essential oil diffusion: Emission rate assessment in a real scale 40 m<sup>3</sup> room and impact on indoor air quality ». à *soumettre*
- [P5] Brun, R., M. Verrielle., M. Chenal., A. Soisson, F. Thevenet. "Short Com Formaldéhyde", *en écriture*
- [P6] Brun, R., M. Verrielle., M. R. Avhad., H. Kaper., M. Chenal., A. Soisson, F. Thevenet. "Characterization of the surface chemistry of ACs", *en écriture*

- [P7] Umba Kalala, D., N. Redon, M. Verriële, S. Crunaire, N. Locoge, Characterizing multi sensor platforms performance to investigate indoor air quality events, *en écriture*

Tableau 1- 10 : Listes des communications orales (juillet 2021)

- [C1] Verriële, M., H. Plaisance, V. Vandebilcke, N. Locoge, G. Meunier, Determination of a large variety of amines in air samples using midjet impinger sampling followed by analysis with ion chromatography in tandem with mass spectrometry, Airmon 2011 : 7th International Symposium on Modern Principles for Air Monitoring and Biomonitoring, Loen, Norway, June 19-23, 2011
- [C2] Verriële, M., H. Plaisance, J. N. Jaubert, V. Vandebilcke, N. Locoge, G. Meunier, Car Cabin Air Quality : Application Of The « Field Of Odors® » Approach For The Odor Evaluation Of Car Components , Indoor Air 2011 : 12th international conference on indoor air quality and climate, Austin, Texas, June 5-10, 2011
- [C3] Allam, N., M. Verriële, K. Chaillou, A. Rospars, M. Batton Hubert, N. Locoge, L. Le Coq, Methodology to estimate biogas surface leakage in a landfill site, Sardinia 2013, 14e international waste management and landfill symposium, Forte Village, S. Margherita di Pula (CA), Italy, 30 september-4 october, 2013
- [C4] Verriële, M., N. Locoge, Carboxylic acids & amines measurements in air : active sampling and IC-MS analysis, 2nde international conference PETrA 2013, Prague, June 4-6, 2013
- [C5] Blocquet, M., M. Mendez, M. Verriële, S. Dusanter, N. Locoge, S. Le Calve, N. Blond, T. Leonardis, C. Fittschen, B. Hanoune, M. Ward, Influence de la pollution extérieure sur la qualité de l'air dans les Bâtiments Performants en Energie , Colloque Francophone "Combustion et Pollution Atmosphérique" COMPOLA 2014 , Tanger, Maroc, 22-24 octobre 2014
- [C6] Hanoune, B., M. Blocquet, S. Batut, S. Coudert, S. Germain, D. Petitprez, L. Pillier, M. Ward, M. Mendez, S. Dusanter, V. Gaudion, T. Leonardis, N. Locoge, M. Rizk, M. Verriële, M. Guglielmino, S. Le Calve, C. Liaud, C. Schoemaeker, The Complex Chemistry in Low Energy Buildings, 4th Sino-French Joint Workshop on Atmospheric Environment, Lyon, December 10-13, 2014
- [C7] M, Rizk., M. Verriële, S. Dusanter, M. Ward, S. Le Calve, N. Locoge, Sorption of Organic gases onto Building Materials: Development of a new device for In-situ Measurements, 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate , Hong Kong (Chine), 7-12 juillet 2014
- [C8] Verriële, M., M. Ward, B. Hanoune, N. Leclerc, N. Locoge, Do Low Energy Public Buildings (LEPB) comply with the Recent IAQ Regulations in France ? What about unregulated VOC ?, 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Hong Kong (Chine), 7-12 juillet 2014
- [C9] Verriële, M., N. Allam, L. Depelchin, L. Le Coq, N. Locoge, Radiello diffusive sampler® for measurement of VOC from landfill biogas, 8th International Symposium on Modern Principles of air Monitoring and Biomonitoring, Marseille, 15-19 juin 2014.
- [C10] Rizk, M., M. Mendez, M. Verriële, S. Dusanter, C. Schoemaeker, S. Le Calve, N. Locoge, In-Situ measurements of sorption parameters with Field and Laboratory Emission Cell (FLEC): comparison to the test emission chamber method, Air Pollution, 23rd International Conference on Modelling, Monitoring and Management of Air Pollution , Valencia, Spain, June 1 - 3, 2015
- [C11] Rizk, M., M. Verriële, S. Dusanter, C. Schoemaeker, S. Le Calve, N. Locoge, In-situ measurements of volatile organic compound sorption coefficients on building materials: first field campaign in a low energy building, Healthy Buildings 2015 Europe , Eindhoven, The Netherlands, May 18-20, 2015
- [C12] Schoemaeker ,C., M. Blocquet, M. Rizk, M. Ward, M. Guglielmino, C. Liaud, M. Verriële, M. Mendez, B. Hanoune, D. Petitprez, S. Dusanter, S. Le Calve, N. Blond, D. Hauglustaine, P. Blondeau, N. Locoge, IAQ determinants in a Low Energy school through time-resolved measurements: outdoor and indoor contributions to the indoor chemistry, Healthy Buildings 2015 Europe , Eindhoven, The Netherlands, May 18-20, 2015
- [C13] Verriële, M., T. Leonardis, S. Dusanter, C. Schoemaeker, N. Locoge, On-line monitoring of volatile organic compounds in a low energy building: the roles of material emissions, outdoor sources and ventilation , Healthy Buildings 2015 Europe, Eindhoven, The Netherlands, May 18-20, 2015
- [C14] Thevenet, F., M. Verriële, M. Romanias, N. Locoge, Innovative instruments for the characterization of gas - surface interactions in indoor air , Indoor Air 2016, IBIAQ Workshop, Gand, Belgique, 2-8 juillet 2016
- [C15] Verriële, M., T. Leonardis, S. Dusanter, C. Schoemaeker, N. Locoge, On-line hourly VOC monitoring in a low energy building: impact of building material emissions, outdoor sources and ventilation on ambient concentrations , Indoor Air 2016 , Gand, Belgique, July 2-8, 2016

- [C16] Debono, O., M. Rizk, V. Gaudion, M. Verrielle, N. Locoge, F. Thevenet, Comparison of gypsum boards regarding toluene and formaldehyde uptake under typical indoor air conditions , Healthy Buildings 2017 Europe, Lublin, Poland, July 2-5, 2017
- [C17] Angulo, S., M. Verrielle, M. Nicolas, F. Thevenet, Impact of essential-oil-based cleaning products on indoor air quality: From liquid composition to chamber emission evaluation, 10th IAQVEC 2019 - International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation and Energy Conservation in Buildings, Bari, Italie, September 5-7, 2019
- [C18] Angulo, S., M. Verrielle, M. Nicolas, F. Thevenet, Does natural and ecological certified household products promote indoor air quality ? : From liquid composition to test chamber emission evaluation, ISES ISIAQ Joint Annual Meeting, Kaunas, Lithuania, August 18-22, 2019
- [C19] Caron, F., L. Robert, R. Guichard, M. Verrielle, F. Thevenet, CFD prediction of VOC emission from a solid material in an experimental chamber, 10th international conference on multiphase flow (ICMF), Rio de Janeiro, Brazil, May 19-24, 2019
- [C20] Caron, F., R. Guichard, L. Robert, M. Verrielle, F. Thevenet, Impact of ventilation on VOC emissions in indoor environments : the singular behavior of formaldehyde, iCheap 14 / 14th International Conference on Chemical and Process Engineering, Bologna, Italy, May 26-29, 2019
- [C21] Caron, F., F. Thevenet, M. Verrielle, R. Guichard, L. Robert, Assessment of an experimental method for determining the three key parameters of VOC emission from solid materials, 10th IAQVEC 2019 - International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation and Energy Conservation in Buildings, Bari, Italie, September 5-7, 2019
- [C22] Verrielle, M., S. Angulo, M. Nicolas, F. Thevenet, Can we really promote air quality by essential oil diffusion ?, ISES ISIAQ Joint Annual Meeting, Kaunas, Lithuania, August 18-22, 2019
- [C23] Beauvais, L., M. Verrielle, J. Quartararo, N. Locoge, In-situ methodology for odor assessment into the vehicle cabin though various environmental conditions, 21st Conference Odour & Emissions of Plastic Materials, Kassel, Germany, 19-20 March 2019.
- [C24] Angulo, S., M. Verrielle, M. Nicolas, F. Thevenet, Temporal Dynamics and Emission Rates of Terpenes from Essential Oil Diffusers in a Real Scale Room, Indoor Air 2020 , On-line, Nov 1-5, 2020
- [C25] S. Angulo, M. Verrielle, M. Nicolas, F. Thevenet, Real Consumer Use Patterns of Essential-Oil-Based Household Products: Emission Rate Assessment and Impact on Indoor Air Quality, Indoor Air 2020 , On-line, Nov 1-5, 2020
- [C26] Harb, P., M. Verrielle, S. Angulo, M. Nicolas, F. Thevenet, What are the main non-reactive sinks of terpenes? Comparison of various indoor surfaces, Indoor Air 2020 , On-line, Nov 1-5, 2020
- [C27] Umba Kalala, D., N. Redon, M. Verrielle, S. Crunaire, N. Locoge, Characterizing multi sensor platforms performance to investigate indoor air quality event and quantify personal exposure, Healthy Buildings 2021, Oslo, 18-22 Juin, 2021
- [C28] Brun, R., M. Genest, M. Verrielle, M. Chenal, A. Soisson, F. Thevenet, Do sorptive materials act as secondary sources under realistic indoor thermal conditions? Healthy Buildings 2021, Oslo, 18-22 Juin, 2021
- [C29] Brun, R., R. M. Avhad, H. Kaper, M. Verrielle, M. Chenal, A. Soisson, F. Thevenet, Characterization of the surface chemistry of ACs: a tool for sorptive indoor material formulation Healthy Buildings 2021, Oslo, 18-22 Juin, 2021
- [C30] Miranda, L., C. Duc, N. Redon, M. Verrielle, Optimization of the number of sensors in a indoor air quality multisensory system using intrinsic dimension estimation Healthy Buildings 2021, Oslo, 18-22 Juin, 2021
- [C31] Caron, F., M. Verrielle, R. Guichard, L. Robert, F. Thevenet, Assessment of three experimental methods for determining the emission parameters of VOCs from a solid material Healthy Buildings 2021, Oslo, 18-22 Juin, 2021
- [C32] Angulo Milhem, S., M. Verrielle, M. Nicolas, F. Thevenet, Diffusions of essential oils in a 40m3 experimental room : from emission rates to impact on indoor air quality Healthy Buildings 2021, Oslo, 18-22 Juin, 2021
- [C33] Verrielle, M., V. Vandebilcke, Qualité de l'air intérieur habitacle. Application du champ des odeurs – Approche pour l'évaluation de l'odeur de pièces automobiles, Atmos'Fair , Lyon, 26-27 septembre 2012
- [C34] Verrielle, M., M. Rizk, S. Dusanter, M. Ward, S. Le Calve, N. Locoge, Faisabilité d'une mesure in-situ des paramètres de sorption des composés organiques volatils en air intérieur, Atmos'fair 2013, Paris, 25-26 septembre, 2013
- [C35] Allam, N., M. Verrielle, K. Chaillou, A. Rospars, M. Batton Hubert, N. Locoge, L. Le Coq, Methodology to estimate biogas surface leakage in a landfill site, XIVE congrès de la Société Française de Génie des Procédés (SFGP), Lyon, 8-10 octobre 2013

- [C36] Schoemaeker, C., M. Blocquet, M. Rizk, M. Ward, R. Nasreddine, M. Guglielmino, C. Liaud, C. Trocquet, M. Mendez, M. Verrielle, S. Dusanter, B. Hanoune, D. Petitprez, L. Pillier, S. Le Calve, N. Blond, D. Hauglustaine, P. Blondeau, N. Locoge, Etude de la qualité de l'air dans un bâtiment énergétiquement performant par analyse en temps réel de l'évolution des polluants, Atmosfair 2015, Lyon, France, June 9-10, 2015
- [C37] Angulo, S., M. Verrielle, M. Nicolas, F. Thevenet, Utilisation des huiles essentielles dans les produits d'entretien pour la maison : Quel impact sur la qualité de l'air intérieur ?, Atmos'fair, Paris, France, 19-20 juin 2018
- [C38] Robert, L., R. Guichard, C. Mandin, F. Caron, M. Verrielle, F. Thevenet, Exposition des salariés et qualité de l'air intérieur dans les espaces de stockage, Atmos'fair, Paris, France, 19-20 juin 2018
- [C39] Verrielle, M., S. Crunaire, N. Redon, M. Vermeulen, G. Guigon, C. Leger, A. Wroblewski, Faire face à une nuisance odorante environnementale : une situation toujours complexe. Pourquoi ne pas s'initier en s'amusant avec les ECSPER à Smellville ?, Atmos'Fair 2017, Lyon, 10-11 octobre 2019
- [C40] Hawko, C., M. Verrielle, N. Hucher, S. Crunaire, C. Leger, N. Locoge, G. Savary, Le Langage des Nez® : un atout pour limiter l'incidence d'une pollution olfactive – application à la zone industrialo-portuaire du Havre, Atmosfair, , Lyon, France, 5-6 juin 2019

Tableau 1- 11 : Listes des communications par affiches (juillet 2021)

- [C41] Verrielle, M., H. Plaisance, V. Vandenbilcke, N. Locoge, G. Meunier, Determination of Amines in Air from the Interior of the Car by Sampling by Midget Impinger Followed by Analysis with two Complementary Techniques : Ion Chromatography and Liquid Chromatography in tandem with Mass Spectrometry, Congrès : Emissions and Odors from Materials, Bruxelles (Belgique), Octobre 2009
- [C42] Ward, M., M. Verrielle, B. Hanoune, D. Petitprez, N. Leclerc, M. Rizk, S. Dusanter, S. Le Calve, M. Millet, P. Bernhardt, M. Mendez, N. Blond, D. Hauglustaine, A. Clappier, P. Blondeau, M. Abadie, N. Locoge, Experimental and Modeling Characterizations of Indoor Air Quality in Low Energy Public Buildings in France - the MERMAID program (Mesures Expérimentales Représentatives et Modélisation Air Intérieur Détaillée - Representative Experimental Measurements and Detailed Indoor Air Modeling : REMDAIM ??, Indoor Air 2014 - The 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Hong Kong, China, July 7–12, 2014
- [C43] Schoemaeker, C., M. Blocquet, M. Ward, B. Hanoune, D. Petitprez, P. Lebegue, S. Dusanter, N. Locoge, M. Rizk, M. Verrielle, M. Guglielmino, S. Le Calve, C. Liaud, R. Nasreddine, C. Trocquet, N. Leclerc, X. Pingenot, C. Schneider, N. Blond, D. Hauglustaine, J. L. Ponche, M. Mendez, P. Blondeau, M. Abadie, Caractérisation détaillée de l'air intérieur des bâtiments performants en énergie par couplage entre Mesures Expérimentales Représentatives et Modélisation Air Intérieur Détaillée , 5èmes Défis Bâtiment & Santé, Paris, 2 juin 2015
- [C44] Debono, O., M. Rizk, V. Gaudion, M. Verrielle, N. Locoge, F. Thevenet, Sorptive gypsum board for formaldehyde removal : partitioning coefficient and clean-up performances, Healthy Buildings 2017 Europe, Lublin, Poland, July 2-5, 2017
- [C45] Dusautoir, R., G. Zarcone, M. Verrielle, G. Garcon, I. Fronval, V. Riffault, N. Locoge, J.-M. Lo-Guidice, S. Antherieu, Chemical characterization and in vitro toxicology study of Heated Tobacco Product and electronic cigarette aerosols: comparison with conventional cigarette smoke, Congrès annuel de la Société Française de Toxicologie, Lille, 27-28 novembre 2018
- [C46] Harb, P., S. Angulo, R. Brun, M. Verrielle, F. Thevenet, Indoor sinks of terpenes : experimental screening of various surfaces, ISES ISIAQ Joint Annual Meeting, Kaunas, Lithuania, August 18-22, 2019

## ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT

**Formation initiale/** Je contribue depuis mon recrutement à la formation des élèves ingénieurs de l'IMT Nord Europe, au travers les enseignements fondamentaux et d'ouverture sous la forme de TP et de Cours /TD, principalement pour les niveaux L2-L3. Le

Tableau 1- 12 synthétise l'ensemble de ces activités. Cela représente un volume horaire relativement faible, mon domaine disciplinaire se recouvrant peu avec les enseignements délivrés par l'école.



Tableau 1- 12 : Activités d'enseignement délivrés dans le cadre de la formation initiale des élèves ingénieurs de l'IMT Nord Europe

<b>Période, Discipline enseignée, Niveau, Cours, Travaux dirigés (TD) ou Travaux Pratiques (TP)</b>	<b>Volume horaire</b>
<b>2013-2014</b> – Introduction aux plans d'expérience, L3, Cours/TD	24 h/an
<b>2013-2015</b> – Statistiques Appliquées – Mise à niveau, Mastère Métrologie, Cours/TD	10 h/an
<b>Depuis 2015</b> – Chimie analytique, M1, TP	16h/an
<b>2017-2018</b> – Procédés, Analyse et environnement : mise en pratique, L3, TP	
<b>2014-2020</b> – Géométrie des Odeurs, L3, Cours/TP	24h/an
<b>Depuis 2021</b> – Géométrie des Odeurs, L2, Cours/TP	24h/an

Je suis la seule contributrice aux cours d'*Introduction aux Plans d'Expériences* et de *Géométrie des Odeurs*, que j'ai intégralement construit. Je suis auteure de l'intégralité des contenus de cours, des exercices associés, responsable de la progression suivie et de la cohérence avec le parcours pédagogique des étudiants. Concernant les TP de Chimie Analytique délivré en M1, j'ai élaboré les protocoles de 2 TP de 8h axés sur l'analyse des COV par ATD/GC/MS et l'analyse des ions par CI ; en revanche, je ne participe pas à l'encadrement de ces TP. Sur les TP de L3, au contraire, je ne participe qu'en tant qu'encadrante et n'ai pas été partie prenante de l'élaboration des protocoles.

**Tutorat** Je suis, depuis 2013, active dans l'accompagnement des élèves en projet de découverte de la recherche proposé chaque année en M1, sur un module de 80h. Je suis à l'origine pour chaque session de la proposition de 1 à 3 sujets en lien avec le domaine de recherche du CERI EE. J'accompagne les étudiants sur un travail bibliographique, la définition d'une problématique et d'un plan d'action, un travail expérimental puis sur une restitution sous la forme d'un rapport de synthèse et d'une soutenance. Le Tableau 1- 13 donne quelques exemples de sujets proposés.

Tableau 1- 13 : Exemple de sujets proposés aux élèves ingénieurs dans le cadre des projets de découverte de la recherche

Evaluation des Emissions en COV par Micro-Extraction en Phase Solide (SPME) de différentes fractions de broyats de panneaux de bois aggloméré.
Analyse sensorielle : Etablir un protocole pour l'évaluation des seuils olfactifs individuels
La chimie analytique peut-elle répondre au problème de mauvaise haleine ?
Influence des paramètres réactionnels sur la réaction de Berthelot utilisée pour la quantification des ions ammonium.
Un sapin de Noël artificiel ou naturel : quel choix pour la planète et pour la qualité de l'air de son logement ?

Chaque année depuis 2012 je participe aux jurys de soutenance de stage de niveau L2 à M2. Depuis 2020, je suis désignée pour 2 à 3 élèves de L2, L3 et M1 comme tutrice de stage. Je suis également tutrice académique pour un élève ingénieur de spécialité en génie énergétique en alternance.

**Formation professionnelle** Ma principale activité d'enseignement s'effectue dans le cadre de la formation professionnelle, avec en sujet principal l'analyse olfactive objectivée pour la gestion des nuisances odorantes en air ambiant mais aussi en atmosphère confinée (véhicule, air intérieur). Ces formations sont délivrées sous une marque « **Le Langage des Nez**® », promue par un GT Formateurs animé par Atmo Normandie dont je fais partie depuis sa création en 2016.

J'ai participé à l'élaboration du programme de formation qui s'organise autour de 4 axes : (i) la psycho-physiologie olfactive, (ii) la qualification des natures odorantes selon une méthode de référence, (iii) la quantification des intensités odorantes, et (iv) l'analyse olfactive objectivée.

Je suis aujourd'hui, formatrice habilitée à enseigner la méthode du Langage des Nez®, et référente pour le CERI EE au niveau du pôle « Formation Tout au Long de la Vie ».

J'ai animé jusqu'à aujourd'hui 2 sessions de formation de 32h, pour des groupes de 4-6 personnes issues du milieu industriel, de bureaux d'études spécialisés ou d'association de surveillance de la qualité de l'air. Par ailleurs, dans le cadre d'une opération pilotée par Amines Métropole, j'ai assuré la formation de 40 nez riverains, en 2016, en collaboration avec la société Osmanthe, bureau d'étude spécialisé du domaine et de Atmo Picardie. Enfin, j'ai formé en septembre 2021 un panel de 6 personnes au niveau de l'IMT Nord Europe est afin de répondre aux besoins de projets de recherche alliant analyses instrumentales et sensorielles.

### La méthode du Langage des Nez®

Il s'agit d'une méthode d'apprentissage permettant d'acquérir un langage collectif et partageable. Elle rend possible une description précise, objective, et répétable de tout type d'odeurs – environnementale, cosmétique, alimentaire, matériaux...

Elle se base sur un socle de référents (composés chimiques isolés) odorants positionnés dans un espace 3D. Une approche analytique par moindres distances permet le positionnement de toute odeur dans l'espace 3D, aboutissant donc à la qualification odorante d'un effluent gazeux.



De plus, j'ai décliné cette formation sur un format plus court (3h30) dont j'ai élaboré l'intégralité du contenu. En effet, j'interviens 4 fois par an depuis 2016 sur la même thématique auprès des agents DREAL, dans le cadre d'une formation continue proposée par l'IMT Nord Europe « Air et Odeurs ». J'anime le module de sensibilisation au management des nuisances odorantes dans l'environnement.

Ces activités s'intègrent pleinement à mes activités de recherche. Elles se nourrissent mutuellement en avançant dans la connaissance de la perception des odeurs dans l'environnement.

**Création Formation professionnelle QAI – analyse olfactive/** Depuis 2020, je pilote en association avec Arnaud Vatinel (société OSMANTHE) la création d'une formation originale et innovante sur le sujet de la Qualité de l'Air Intérieur, destinés aux professionnels (AASQA, Bureaux d'études, Industriels Bâtiment...), sur un format long de 4 jours. Cette formation vise à (i) acquérir les connaissances de bases sur les enjeux et déterminants de la QAI, (ii) s'informer sur la réglementation et la normalisation, (iii) se former à la caractérisation olfactive de matériaux et au diagnostic olfactif en air intérieur.

La première session de formation est prévue pour mars 2022.

**Activités pédagogiques innovantes/** Depuis 2018, le CERI EE travaille à la création d'un MOOC Air Quality. Un premier module, en anglais, de 3 semaines présente les bases de la pollution atmosphérique et de ses effets. Un second module de 5 semaines est en cours de finalisation, et permettra d'approfondir l'ensemble des aspects liés à la pollution de l'air ambiant. Ma principale contribution a été la création d'un Jeu Sérieux « Les ECSPER à Smellville » (Etudes de Cas Scientifiques Pour l'Expertise et la Recherche).

Il propose au joueur de se mettre en situation de crise face à un incident industriel à l'origine de mauvaises odeurs dans l'environnement. Deux rôles distincts sont disponibles : le joueur peut occuper une fonction de responsable QSE dans l'industrie à l'origine de l'incident ou se mettre dans la peau d'un responsable d'une association de surveillance de la qualité de l'air. Sa mission est d'enquêter sur la source de l'incident, d'en comprendre les conséquences, et d'informer sans alarmer les autorités compétentes et les riverains de la zone impactée. Ainsi le joueur par son expérience virtuelle fait la connaissance des acteurs impliqués dans de tels contextes ; il s'initie aux techniques d'investigations ; et comprend depuis plusieurs points de vue comment gérer un incident odorant. Ma contribution a été de concevoir une vidéo introductive au management des nuisances odorantes, d'imaginer les différents scénarios, de créer les contenus et dialogues (en plusieurs langues),



d'imaginer les aspects ludiques (collecte de points...) et les exercices d'évaluations. Cela a été réalisée avec la contribution de 2 collègues enseignants-chercheurs, d'une ingénieure pédagogique, et d'une dessinatrice.



Référencement du jeu sérieux : Verrielle, M. Crunaire S., Redon N., Guigon G., Vermeulen, M., Léger, C. « Les ECSPER à Smellville » (Etudes de Cas Scientifiques Pour l'Expertise et la Recherche), disponible sur <http://innovation-pedagogique.imt-lille-douai.fr/>

### Jeu Sérieux

Les Jeux Sérieux sont des applications informatiques, dont l'intention initiale est de combiner, avec cohérence, des aspects sérieux avec des ressorts ludiques issus du jeu vidéo. De nombreux travaux ont montré leur intérêt quant à la transmission de compétences et de savoirs en développant l'attractivité et en favorisant la motivation auprès des apprenants. En ajoutant cette modalité, les enseignants offrent aux utilisateurs des activités pédagogiques variées au sein de leur enseignement.

## ACTIVITES D'EXPERTISE DE LA RECHERCHE

Au travers mes activités, j'ai contribué à l'évaluation de la recherche en tant (i) que référente pour l'évaluation d'articles dans des journaux à comité de lecture ou pour des actes de conférences, (ii) examinatrice dans des jurys de thèse, (iii) évaluatrice de projets de recherche, (iv) ou experte en métrologie au titre de l'AFNOR.

➤ Jusqu'à présent, j'ai participé à 8 jurys de thèse (dont 7 en tant qu'encadrante).

➤ J'évalue des articles principalement pour Building and Environment, Env. Science and Public Health, Environmental Science and Technologies, à hauteur de 4 par an.

➤ J'évalue principalement des actes pour la conférence NOSE (pour l'éditeur AIDIC) à chaque édition. J'ai participé au comité d'évaluation des contributions pour INDOOR AIR 2016 (Ghent) et

animé une session thématique (*Impact of the outdoor air quality on indoor environments*)

➤ Je suis sollicitée par l'ADEME pour évaluer les propositions de projets sur les APR tels que CORTEA, PRIMEQUAL, AQACCIA et par l'ANRT pour l'évaluation de projets de recherche et de thèses.

➤ Je réponds aux enquêtes publiques de l'AFNOR et de l'ANSES.

## IMPLICATIONS INSTITUTIONNELLES

Je suis membre depuis cette année 2021 comité AFNOR X43B-GEO Olfactométrie dans le cadre de la révision de la norme française X43-103 qui doit étendre son périmètre à l'analyse qualitative des odeurs environnementale et qui fait l'objet d'une demande d'extension européenne.

## ACTIVITES DE DISSEMINATION DE LA RECHERCHE VERS LE GRAND PUBLIC

La mission d'un chercheur, c'est aussi transmettre les résultats de mes recherches vers le grand le grand public, les jeunes, et les acteurs socio-économiques. Je suis convaincue que la prise de conscience des enjeux de la pollution de l'air par le grand public et les jeunes générations sont des leviers forts avec des répercussions directes sur la capacité d'adaptation et de résilience de la société dans le contexte de transition écologique que nous vivons aujourd'hui. Je suis parmi celle qui veulent encourager dans mon domaine de recherche l'association de l'expertise citoyenne avec l'expertise scientifique. La production de données par le citoyen favorise non seulement la prise de conscience mais aussi le dialogue entre chercheurs et citoyen : c'est un outil concret pour répondre aux enjeux sociétaux.

C'est pourquoi, j'ai eu à cœur de divulguer mes savoirs sur des manifestations type « Fête de la science » pour laquelle j'ai conçu un atelier *Comment « sens » tu ?* qui amène à la réflexion autour des sens, des capteurs sensoriels et des similarités entre les réseaux de capteurs électronique et notre patrimoine sensoriel.

J'ai pu reproduire cet atelier lors de diverses manifestations dans des écoles et collèges de la région.

Par ailleurs, j'accueille chaque année pour quelques jours des jeunes de 3<sup>ème</sup> ou 2<sup>nde</sup> à l'occasion de leur stage de découverte du monde professionnel.

Enfin, j'interviens lors de journées techniques à destination de professionnels ou d'étudiants en étude supérieure de divers horizons pour sensibiliser aux nuisances odorantes ou à la problématique de la qualité de l'air intérieur.

Le Tableau 1- 14 liste quelques-unes de ces interventions.

Tableau 1- 14 : Interventions diverses envers la société civile et le monde socio-économique

[11]	Le traitement de données massives de mesure de la pollution pour une mesure individualisée de la qualité de l'air à la portée de tous ?, Journée des avis 2020 : L'intelligence artificielle & le big data, Université de Lille, le 5 février 2020
[13]	Quand l'activité des occupants impacte la dynamique des polluants en air intérieur : quelle démarche de qualification des produits à usage courant pour faire évoluer le cadre législatif et le discours de prévention auprès du grand public ? Journées Fiméa, Paris, 15 mars 2019
[14]	Suivre la dynamique des polluants dans les ERP : avec quels moyens et pour quels bénéfices ? Journées Fiméa, Paris, 15 mars 2018
[15]	<i>Les nouveaux enjeux de la QAI dans les bâtiments publics performants en énergie; Retour sur une expérience menée dans les collèges du Nord, Construire exemplaire, Lille, 2015</i>
[16]	Atelier Polluants non réglementés Odeurs, NH <sub>3</sub> et traceurs PM <sub>10</sub> . Journées Technique de l'Air, Rennes, octobre 2015
[17]	La réglementation sur les odeurs, Journée d'Echange sur l'Air, Saint Quentin, 15 octobre 2015
[18]	Les enjeux de la qualité de l'air dans le bâtiment, 32 <sup>ème</sup> JOURNEE TECHNOLOGIQUE : « Confort intérieur dans le bâtiment - les solutions textiles », Tourcoing, 16 octobre 2014





*Après une introduction retraçant l'évolution des enjeux liés à la qualité de l'air intérieur depuis ces 10 dernières années, cette section décrit en 3 volets comment j'ai pu y répondre et m'y adapter. Tout d'abord, en renforçant les méthodologies pour caractériser la QAI dans des environnements réels soumis à une grande variété de processus physico-chimiques. Puis en m'attardant sur certains et en étudiant leur contribution dans des conditions contrôlées à différentes échelles. Et enfin en établissant des liens avec les sciences humaines pour intégrer le citoyen au cœur de la problématique. Ces travaux seront poursuivis par de nombreux projets en cours qui constituent des perspectives à court terme, mais qui ouvre des nouveaux axes de recherche détaillés en fin de ce chapitre.*

## PARTIE B

### Qualité des environnements intérieurs : diagnostic, compréhension des déterminants et implication citoyenne



<b>DANS LE RETRO</b> .....	<b>43</b>
Retour sur 20 ans de surveillance, d'innovations instrumentales vers la compréhension des déterminants et l'établissement d'un indice de qualité de l'air intérieur.....	43
Cadre réglementaire et de prévention.....	44
La transition écologique : liens entre réglementation thermique des bâtiments et QEI.....	46
<b>B1- DES DEVELOPPEMENTS METROLOGIQUES POUR LE DIAGNOSTIC EN AIR INTERIEUR</b> .....	<b>47</b>
Développements métrologiques pour la caractérisation de l'exposition aux espèces typiques de l'air intérieur .....	47
Développements métrologiques pour la caractérisation des dynamiques de concentrations en environnement intérieur .....	49
Développements métrologiques pour la caractérisation in-situ des émissions.....	51
<b>B2- CARACTERISER LES SOURCES ET LES PUIITS EN VARIANT LES ECHELLES</b> .....	<b>53</b>
Caractérisation du transfert des COV d'un matériau source à la phase gazeuse, à l'échelle d'une enceinte de petit volume.....	54
Caractérisation de l'impact de l'utilisation des huiles essentielles en environnement intérieur : de l'émission au devenir des polluants — approche multi-échelle .....	57
Caractérisation des échanges de COV entre un matériau puits et la phase gazeuse : approche multi-échelle.....	61
<b>B3-LES PROJETS CASPA COMME SOLUTION DE REMEDIATION A LA POLLUTION EN AIR INTERIEUR</b> .....	<b>65</b>
Elaboration d'un protocole d'évaluation des performances des stations de mesures destinées à la surveillance de la QAI .....	66
Analyse psychosociologique du changement de comportement.....	67
Analyse statistique avancée des données massives de pollution de l'air intérieur .....	68
<b>DANS LE VISEUR</b> .....	<b>70</b>
<b>REFERENCES</b> .....	<b>76</b>

### Listes des Figures

Figure 2- 1 Résultats majeurs obtenus lors du projet MERMAID sur une campagne de mesure de la QAI dans des établissements scolaires à basse consommation énergétique.....	48
Figure 2- 2 Résultats majeurs obtenus lors du projet MERMAID sur une campagne de mesure de la QAI dans un collège - Profils de concentration du toluène mesuré sur une période de 2 semaines dans une salle de classe , à la bouche de soufflage du système de ventilation et à l'extérieur de la salle de classe .....	50
Figure 2- 3 Résultats majeurs obtenus lors du projet MERMAID sur une campagne de mesure de la QAI dans un collège - Profils de concentration mesurés sur une période de 2 semaines en toluène, xylènes et hexane à l'intérieur de la salle de classe et à l'extérieur du bâtiment. ....	50
Figure 2- 4 Les déterminants de la Qualité de l'Air Intérieur .....	53
Figure 2- 5 Schéma de montage expérimental de l'enceinte développée à l'INRS pour l'étude des transferts de COV de matériaux à la phase gazeuse.....	55

Figure 2- 6 Taux d'émission des COV ( $\mu\text{g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ ) pour différents TRA (h-1) mais à vitesse d'air constante au voisinage du matériau ( $0,5 \pm 0,1 \text{ m.s}^{-1}$ ) pour (a) le PBA et (b) le BB.....	56
Figure 2- 7 Profils temporels de concentration (ppb) en formaldéhyde et en terpènes, mesurés au cours de la mise en œuvre de la méthode AAVE.....	57
Figure 2- 8 Comparaison de l'évolution temporelle des taux d'émission massiques de $\gamma$ -terpinène lors de la diffusion transitoire d'huile essentielle d'arbre à thé par diffusion électrique (a) et diffusion par capillarité (b) dans la pièce expérimentale IRINA de $40 \text{ m}^3$ et la chambre d'essai d'émission de $1 \text{ m}^3$ ( $T = 23 \text{ }^\circ\text{C}$ , HR = 50 %, TRA = $0,3 \text{ h}^{-1}$ ).....	59
Figure 2- 9 Évolution temporelle des concentrations des principaux terpènes identifiés lors de l'utilisation des produits de nettoyage (a) nettoyant de surface (b) nettoyant multi-usage pour le nettoyage de surface et (c) nettoyant multi-usage pour le nettoyage des sols ( $T = 23 \text{ }^\circ\text{C}$ , HR = 50 %, TRA = $0,3 \text{ h}^{-1}$ et volume de la pièce = $40 \text{ m}^3$ ).....	60
Figure 2- 10 Schéma du couplage FLEC-PTRMS pour la caractérisation des propriétés de piégeage des COV de matériaux surfaciques....	62
Figure 2- 11 : Protocole de caractérisation des capacités de piégeage des COV par les matériaux puits — établissement de l'isotherme de Langmuir.....	62
Figure 2- 12 Quantités de toluène réversiblement et irréversiblement adsorbé à la surface de plâtre classique (GB), de plâtre modifié par l'ajout d'un agent dérivant (CGB), de plâtre modifié par l'ajout de charbon actif (PGB).....	63
Figure 2- 13 Rose de sensibilités des 5 capteurs équipant la station de surveillance de la QAI sélectionnée pour le projet QALIPSO.....	67
Figure 2- 14 Cartographie des perspectives à court, moyen et long terme sur les axes de recherche (1) développement métrologique, (2) compréhension des déterminants, et (3) solution de remédiation.....	72
Figure 2- 15 Schémas fonctionnels des dispositifs expérimentaux innovants : DIMITRI (mannequin multi-instrumenté) et VALENTINE (Halle d'essai de grand volume).....	74
Figure 2- 16 :Développement d'un nouvel axe de recherche couvrant les interactions climat / bâtiment / occupant.....	75



## DANS LE RETRO

Fin 2011, à l'aube de mon parcours de recherche en Qualité de l'Air Intérieur (QAI), l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI) fêtait ses 10 ans. Une occasion de faire le bilan sur le positionnement national de la question de la QAI au sein du paysage académique, réglementaire et institutionnel. L'occasion aussi de souligner l'apport considérable de la campagne d'observation que l'OQAI a mené en 2007 dans plus de 700 logements, compartiment de vie considéré comme prioritaire pour le temps passé par les populations (en moyenne 67%, principalement dans la chambre à coucher)<sup>1</sup>. A l'issue de cette campagne, pour la première fois, une photographie de l'état de la pollution dans les logements français était disponible. Se dégageait alors les enseignements suivants : (i) la pollution intérieur est spécifique et largement plus élevée qu'à l'extérieur ; (ii) 10% des logements sont multi-pollués, et présentent jusqu'à 8 substances prioritaires en concentrations élevées, confirmant l'inégalité des ménages face à la question sanitaire ; (iii) le formaldéhyde est présent dans 100% des logements. Ces données de campagnes associées au travail de hiérarchisation des polluants, autre apport considérable de l'OQAI pour la communauté a permis de placer la voix de la France dans les hautes instances sanitaires et a permis sa participation à des programmes européens (SINPHONIE, OFFICAIR) sur l'évaluation de la QAI dans des environnements spécifiques (écoles, crèches, bureaux).

Du point de vue de la population générale, un paradoxe subsiste : les individus s'intéressent spontanément davantage à la pollution de l'air extérieur qu'à l'air intérieur car ils ressentent physiquement les effets du premier mais pas du second<sup>2</sup>. Le simple constat d'une pollution beaucoup plus importante à l'intérieur qu'à l'extérieur en étonne plus d'un et les campagnes d'information et de sensibilisation peinent à faire évoluer les comportements de façon pérenne alors que le spectre d'action se circonscrit souvent à des pratiques de bons sens au sein du cercle personnel et familial.

Si du point de vue académique, la catégorisation des polluants de l'air intérieur est bien claire, à savoir que sont dissociées les espèces biologiques (bactéries, virus, champignons), des espèces chimiques (Composés Organiques Volatils, radon, CO, CO<sub>2</sub>) et particulaires (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>1</sub>). Les appellations « air sain » ou « air pur » fréquentes dans le langage courant pour désigner un air ne nuisant pas à la santé prêtent à confusion. Derrière ces allégations, il n'est jamais certain de savoir de quoi l'on parle, et d'autant plus depuis le début de l'épisode de pandémie liée à la COVID-19. L'action purifiante des dispositifs de traitement de l'air, de sprays aux huiles essentielles ou à base d'autres agents antibactériens n'est attribuable que si l'on se place du point de vue de la charge biologique de l'air. Si l'on se place du point de vue de la concentration en polluants d'origine chimique ou particulaires, ces mêmes éléments peuvent être à considérer comme des sources.

### **Retour sur 20 ans de surveillance, d'innovations instrumentales vers la compréhension des déterminants et l'établissement d'un indice de qualité de l'air intérieur.**

Dans la communauté académique, de nombreuses équipes, historiquement placées sur le créneau de la pollution atmosphérique ou du bâtiment dans sa globalité ont développés des axes de recherches portés (parfois exclusivement) sur la QAI. Elle est devenue une spécialité de recherche pour nombre de mes homologues et abordée via des disciplines diverses. Pour ce qui est des travaux des physico-chimistes de l'air, l'accent a d'abord été mis sur la caractérisation de la pollution dans les environnements intérieurs (2001-2011) : principalement dans les logements<sup>3,4</sup> et dans des environnements stratégiques car accueillant la population la plus sensible (crèche, EHPAD)<sup>5,6</sup>. Ces 10 dernières années (2011-2021) ont fait bouger les lignes en termes de normalisation, réglementation et acquisition de connaissances.

- (i) La mise en évidence de la diversité des sources et de la spécificité des environnements intérieurs en terme de pollution (commerces, piscines, spa, véhicules, sous-marins...) a enclenché un processus de hiérarchisation des composés ; la contribution de l'exposition aux polluants de l'air intérieur reste néanmoins à estimer au regard de l'exposition aux polluants de l'air extérieur;
- (ii) L'évolution des techniques de mesures et des outils de modélisation a permis de considérer non plus seulement des niveaux de pollutions moyens mais une cartographie spatio-temporelle des concentrations en polluants et donc la mise en évidence des processus d'émission, de transport et de transformation des espèces;



- (iii) La mise en place de décret de surveillance, d'étiquetages de produits, de labels, de valeurs guides, associée à la mise à disposition de moyens de mesures personnalisés et démocratisés (capteurs) ont permis une prise de conscience de la population même s'il subsiste encore des freins aux changements de pratiques;
- (iv) L'amélioration de l'efficacité des bâtiments notamment sur le plan énergétique dictée par l'urgence climatique change leur mode de gestion, ce qui a des répercussions directes sur la QAI, et oblige donc à considérer la problématique de manière plus transversale et intégrée.

A l'heure de mon bilan personnel, l'OQAI a 20 ans et lance sa « seconde campagne » de surveillance. A nouveau, un nombre de logements important, mais cette fois non plus une trentaine de polluants, mais 170 polluants incluant les COV (Composés Organiques Volatils) émergents, les perturbateurs endocriniens, les pesticides ; une collecte de la phase gazeuse mais aussi de la phase particulaire ; de la métrologie classique mais aussi des capteurs connectés. L'ambition de cette campagne est de mettre à jour les valeurs sanitaires mais aussi de mieux comprendre le lien entre pollution et bâtiment, activités des occupants et environnement extérieur. La construction d'un indice de qualité de l'air pour les environnements intérieurs est en jeu, une perspective éminemment d'actualité pour l'ensemble de la communauté.

**Cadre réglementaire et de prévention.** L'ensemble du cadre de réglementaire et de prévention est un des moyens de limiter l'impact de l'exposition aux polluants affectant les voies respiratoires, digestives et cutanées. Les effets sanitaires de la pollution de l'air intérieur, se comptent en milliers de morts prématurées pour l'Hexagone, or en dehors des environnements de travail à pollution spécifique où s'appliquent les valeurs limites d'exposition professionnels (VLEP), il n'existe que peu de valeurs règlementaires pour les espaces intérieurs.

En revanche, que ce soit aux Etats-Unis<sup>7</sup>, au Canada<sup>8</sup>, ou dans la plupart des pays européens (France<sup>9</sup>, Finlande<sup>10</sup>, Allemagne<sup>11</sup>...), les différentes juridictions et autorités de santé ont établi des plans nationaux en faveur de l'amélioration de la qualité de l'air intérieur et publié des valeurs guides pour nombre de substances classées prioritaires. Des variations sensibles en termes de nombres de polluants considérés et de valeurs proposées sont indéniablement à constater. Le Tableau 2- 1, au-delà de nous renseigner sur les VGAI (Valeurs Guides pour l'Air Intérieur), qui s'appliquent pour la France, éditées après 10 ans d'expertise (2007-2017) par l'ANSES (Agence Nationale de Sécurité Sanitaire), témoigne de la diversité des espèces préoccupantes, des différents modes d'exposition (aigue ou prolongée) et de leurs impacts individuels variés. Aujourd'hui, l'ANSES travaille sur la proposition d'une démarche permettant de prendre en compte les effets irritants aigus d'un mélange de substances fréquemment rencontrées dans l'air intérieur.

Tableau 2- 1 Liste des VGAI pour 12 substances jugées prioritaires et préoccupantes

Substance	Type de valeurs	VGAI (µg.m <sup>-3</sup> )	Dernière actualisation
<b>Acétaldéhyde</b>	VGAI court terme : exposition de 1 h	3 000	2014
	VGAI long terme : exposition > 1 an	160	
<b>Acroléine</b>	VGAI court terme : exposition de 1 h	6,9	2013
	VGAI long terme : exposition > 1 an	0,8	
<b>Benzène</b>	VGAI court terme : exposition de 1 à 14 jours	30	2008
	VGAI intermédiaire : exposition de 14 jours à 1 an	20	
	VGAI long terme : pour une exposition > 1 an	10	
	VGAI long terme : exposition vie entière correspondant à un niveau de risque de 10 <sup>-6</sup>	0.2	
	VGAI long terme ; exposition vie entière correspondant à un niveau de risque de 10 <sup>-5</sup>	2	
<b>Dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>)</b>	VGAI court terme : exposition de 1h	200	2013
	VGAI long terme : exposition > 1 an	20	
<b>Ethylbenzène</b>	VGAI court terme : exposition de 24h	22 000	2016
	VGAI long terme : exposition > 1 an	1 500	
<b>Formaldéhyde</b>	VGAI court terme : exposition de 2h	100	2018
	VGAI court terme : Exposition de 8h	10 000	2007

<b>Monoxyde de carbone (CO)</b>	VGAI court terme : Exposition de 1h	30 000	
	VGAI court terme : Exposition de 30 min	60 000	
	VGAI court terme : Exposition de 15 min	100 000	
<b>Naphtalène</b>	VGAI long terme : exposition > 1 an	10	2009
<b>Particules (PM<sub>2.5</sub> et PM<sub>10</sub>)</b>	Pas de VGAI ; Recommandations de la mise en œuvre des valeurs guides de l'OMS pour l'amélioration de la QAI		
	Sur 24 h pour les PM <sub>2.5</sub>	25	2010
	Sur 24 h pour les PM <sub>10</sub>	50	
	Sur le long terme pour les PM <sub>2.5</sub>	10	
	Sur le long terme pour les PM <sub>10</sub>	20	
<b>Trichloroéthylène</b>	VGAI intermédiaire : exposition de 14 jours - 1 an	3 200	
	VGAI long terme : exposition vie entière correspondant à un niveau de risque de 10 <sup>-6</sup>	1	2019
	VGAI long terme : exposition vie entière correspondant à un niveau de risque de 10 <sup>-5</sup>	10	
<b>Tétrachloroéthylène</b>	VGAI court terme : exposition de 1 à 14 jours	1 380	2010
	VGAI long terme : une exposition > 1 an	250	
<b>Toluène</b>	VGAI court terme ou long terme	20 000	2018

**En France/** La loi Grenelle 2 (articles L. 221-8 et R. 221-30 et suivants du code de l'environnement) n'a rendu obligatoire en France, qu'uniquement la surveillance de la qualité de l'air intérieur pour certains établissements recevant un public sensible i.e. les crèches, halte-garderies, écoles, collèges et lycées. L'obligation de surveillance, qui incombe au propriétaire tous les 7 ans, est respectée par (i) soit la réalisation d'une campagne de mesure de polluants ciblés ; (ii) soit par la construction d'un plan d'action sur la base d'un guide pratique édité par le Ministère de la Transition Ecologique. Les valeurs-guides pour l'air intérieur sont définies réglementairement uniquement pour le formaldéhyde et le benzène.

L'étiquetage (i) de tous les matériaux de construction, et (ii) des produits désodorisants à combustion, sont eux aussi obligatoires par l'arrêté du 19 avril 2011<sup>12</sup> et le Décret n° 2017-946 du 10 mai 2017<sup>13</sup>. Ils permettent (i) la classification des matériaux sur la base de leurs émissions établies pour 10 substances prioritaires, (ii) l'information des consommateurs de désodorisants combustibles relativement à la ventilation de la pièce après l'utilisation de ces produits ainsi qu'à la dangerosité de l'inhalation directe de la fumée émanant de ces produits.

Il faut par ailleurs considérer plus largement la problématique des bâtiments « malsains » et l'apparition d'effets indésirables liés conjointement à la santé et au confort (Sick Building Syndrome)<sup>14</sup> ainsi que la baisse des performances au travail ou à l'école. L'accompagnement des personnes touchées par ce syndrome peuvent être accompagnées en France par des conseillers en environnement intérieur sollicités par le cadre médical.

Le 4ème Plan National Santé Environnement (PNSE 4 2021-2025)<sup>15</sup> accorde une place significative à la QAI, puisque 6 actions sur 20 sont concernées par la question. Il s'inscrit dans un contexte fort d'attente citoyenne, et veut renforcer donc l'état des connaissances, mais aussi l'information et la formation de la population pour mieux comprendre les expositions, réduire les risques d'exposition à toutes les échelles du territoire. Les actions sont concrètes et à destination des jeunes, des citoyens, des consommateurs, des élus, des professionnels.

La réglementation ainsi que les plans nationaux encadrent et doivent orienter nos travaux de recherche mais sans nous limiter et ne nous empêchant pas de nous ouvrir à d'autres enjeux que strictement sanitaires. Les enjeux liés à la qualité des environnements intérieurs (QEI), c'est aussi la question du confort olfactif en lien bien évidemment avec la présence de substances chimiques, mais plus largement encore du confort thermique, acoustique, visuel.... Bref du bien-être en général. Néanmoins les travaux scientifiques tout autant que les dispositions réglementaires en lien avec la QEI englobent peu souvent l'ensemble de ces composantes. Une

première proposition d'un indice englobant les aspects thermique, acoustique, qualité de l'air, et éclairage (TAIL scheme) a émergé (en 2021) du projet européen ALDREN.<sup>16</sup>

**La transition écologique : liens entre réglementation thermique des bâtiments et QEI.** La qualité de l'air d'un bâtiment n'est pas à décorrélérer de ses caractéristiques, de sa localisation, de sa fonction et de ses occupants. Par ailleurs, les bâtiments dans lesquels nous vivons vont faire face à des modifications sévères du climat. La France n'est pas épargnée et connaît depuis ces dernières années une amplification notable et durable des événements climatiques, accentuant la contrainte environnementale imposée sur le bâti et déstabilisant potentiellement la qualité de l'air intérieur. Suite au Grenelle de l'environnement (articles 3 à 6 de la loi « Grenelle 1 » du 3 août 2009), un programme de réduction des consommations énergétiques des bâtiments est planifié. La RE 2020, parue au journal officiel le 31 juillet 2021<sup>17</sup> rentrera en vigueur à partir de 2022 ; elle fixe de nouvelles exigences de performance énergétique et environnementale. Elle introduit le concept des bâtiments BEPOS, pour Bâtiment à Energie POSitive, qui doivent produire, plus ou à égalité, l'énergie qu'ils consomment. Elle exige également la limitation des situations d'inconfort dans les bâtiments en période estivale.

Or le contrôle de la qualité de l'air dans les bâtiments par l'augmentation du taux de renouvellement d'air est l'une des stratégies les plus courantes. Or cela n'est pas sans conséquence sur le confort thermique et la consommation énergétique du bâtiment. Le pilotage et le dimensionnement des dispositifs de ventilation ne sont pas triviaux, car ils reposent sur la compréhension et la prise en compte de phénomènes multi-physiques qui ne sont que très rarement étudiés et modélisés conjointement (distribution des polluants et impact sur la santé, confort thermique et consommation énergétique ...) <sup>18,19</sup>. Assurer un haut niveau de confort dans les espaces intérieurs tout en maintenant des exigences en matière de sobriété énergétique nécessite donc aussi de renseigner et contrôler la qualité de l'air intérieur en fonction des variations climatiques extérieures qui s'imposent sur les bâtiments.

Les questions à la recherche – Ma contribution

**Comme le montre cette introduction, la question de la Qualité de l'Air Intérieur est un vaste sujet et peut être abordée différemment selon le domaine de compétences duquel on provient. Les espaces intérieurs sont multiples, présentant des fonctions et des contraintes différentes. Mais diminuer l'exposition aux polluants et garantir le confort sont les cibles communes que l'on soit législateur, fabricant de matériau, architecte, expert du bâtiment, médecin, aéralicien ou comme moi physico-chimiste de l'atmosphère. Tant sur le plan académique que politique, la nécessité de croiser les compétences et de transférer les connaissances à l'occupant est devenue évidente.**

**Ma contribution personnelle, en cohérence avec les axes de recherche poursuivis par l'équipe dans laquelle j'ai évolué, s'est amorcée par des développements métrologiques pour le diagnostic en air intérieur, la recherche de composés odorants et la qualification des émissions issus des matériaux. Par une meilleure caractérisation des émissions et des interactions gaz-surfaces, j'ai rapidement évolué vers des projets qui ont permis d'avancer sur la compréhension des déterminants de la QAI. J'ai consacré par ailleurs une place importante à l'occupant : depuis son impact jusqu'à sa perception. Les approches intégrées et/ou pluridisciplinaires (revoir encadré Partie 1 – page 14) caractérisent les 8 projets qui reposent sur cette problématique et les 7 thèses co-encadrées. Ils ont été le siège de nombreuses et diverses collaborations détaillées ci-après. La valorisation de ces travaux l'a été principalement sur le plan académique mais sans négliger la dissémination vers le grand public.**

**Les connaissances acquises, mais aussi les mutations de la société qui s'opèrent et s'accroissent dans le contexte de la transition écologique et numérique m'encouragent à envisager des projets centrés sur les interactions entre l'occupant et son environnement intérieur. La recherche de solution de remédiation à la pollution de l'air intérieur doit intégrer l'ensemble des contraintes liées à la construction d'un bâtiment et doit placer l'occupant comme acteur du changement.**



## B1- DES DEVELOPPEMENTS METROLOGIQUES POUR LE DIAGNOSTIC EN AIR INTERIEUR

L'introduction qui précède a d'ores et déjà fait mention de la diversité des substances qui cohabitent dans l'air de nos environnements intérieurs. Il est néanmoins nécessaire d'y revenir pour souligner également la spécificité de certains environnements. En effet, si certaines espèces sont ubiquitaires – et c'est principalement celles concernées par la réglementation, l'étiquetage et les VGAI – d'autres sont spécifiques à certains espaces ou activités.

Piscines, salles de sport, espaces de stockage, spa, ongleries, garages, habitacles (voiture, train, avion), tunnels ferroviaires (station métro, gares..), musées, hôpitaux sont autant d'espaces caractérisés par une empreinte de pollution bien distincte. Par ailleurs, ces environnements accueillent des occupants générateurs d'activités qui peuvent eux-mêmes être sources de polluants caractéristiques<sup>20</sup>.

*Qu'est-ce que le diagnostic QAI ? Cela recouvre de mon point de vue :*

- (i) l'identification des polluants en présence, en cherchant soit l'exhaustivité, soit le marquage de certaines typologie de sources, activités, de pratiques de construction, de ventilation..., ou encore en se focalisant sur les espèces les plus préoccupantes du point de vue sanitaire ou olfactif ;*
- (ii) la mise en évidence des sources probables et de la hiérarchisation des facteurs d'émission ;*
- (iii) la caractérisation des dynamiques spatiales et temporelles ;*
- (iv) la caractérisation de l'exposition des occupants, en tenant compte de la fréquence avec laquelle ils occupent l'espace et des activités qu'ils y font ;*

*Réussir ce diagnostic, c'est donc avant tout maîtriser la métrologie des polluants : de l'échantillonnage à l'analyse.*

Cette partie traite donc de ma

contribution au développement métrologique pour le diagnostic en air intérieur, qui se décline en 3 volets :

- le développement métrologique pour la caractérisation de l'exposition aux espèces typiques de l'air intérieur ;
- le développement métrologique pour la caractérisation des dynamiques de concentrations en environnement intérieur ;
- le développement métrologique pour la caractérisation in-situ des émissions.

*N.B. Mes activités de recherche portent quasi exclusivement sur la fraction organique gazeuse, i.e. les COV.*

**Développements métrologiques pour la caractérisation de l'exposition aux espèces typiques de l'air intérieur.** Les premiers bâtiments concernés par la réglementation thermique RT2012 ont subi de nouvelles pratiques de construction en terme d'isolation, matériaux, ventilation... Le besoin d'un bilan de la QAI dans ce type de bâtiments s'est très vite fait sentir après la mise en place de la RT2012, d'autant plus pour ceux accueillant un public sensible à savoir les établissements d'enseignement. La plupart des études de terrain de la qualité de l'air dans les écoles (écoles primaires et maternelles) avait porté jusqu'alors sur les taux de ventilation<sup>21</sup>, les paramètres de confort (HR, T°) ou les concentrations en CO<sub>2</sub><sup>22</sup>. Certaines autres avaient inclus des polluants inorganiques comme l'ozone, les NOx<sup>23</sup> et les particules. Les études qui se sont concentrées sur la caractérisation des COV rapportaient couramment des mesures de composés organiques totaux (COVT) ou de formaldéhyde<sup>24</sup>, même si les travaux les plus récents commençaient à s'intéresser aux concentrations en COV individuels<sup>25,26</sup>. Le nombre de COV ciblés variait de 75 pour les études les plus détaillées<sup>27</sup> à moins de 10.

Le projet MERMAID (Mesures Expérimentales Représentatives et Modélisation Air Intérieur Détaillée – 2012-2016) a inclus l'hypothèse d'une empreinte de pollution distincte pour les bâtiments scolaires à basse consommation énergétique (BBC, PEB et THPE). Les objectifs poursuivis par le projet consistaient donc à (i) établir la signature typique des établissements scolaires RT2012, mais également à (ii) évaluer l'exposition des occupants, et (iii) les contributions respectives de l'environnement, des occupants et de leurs activités. Une stratégie de mesure originale a été développée et déployée sur 2 périodes de 4,5 jours dans 10 bâtiments d'enseignements secondaires et supérieurs français, labellisés BBC, PEB et THPE, en distinguant les périodes occupées et inoccupées, et en équipant l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. En plus de renseigner les taux de

ventilation, les variations de température, humidité relative et concentration en CO<sub>2</sub>, les niveaux moyens de O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, de particules, de COV ont été quantifiés en utilisant des échantillonneurs passifs (Radiello).

Le protocole et les résultats de cette campagne d'envergure ont fait l'objet d'une publication (Verrièle et al., 2016). Il a été montré que la plupart des bâtiments respectaient les recommandations en termes de température et d'humidité. Les niveaux de CO<sub>2</sub>, représentatifs d'une bonne aération des salles de classes, étaient acceptables pour tous les bâtiments où la ventilation était déclarée comme opérationnelle pendant les périodes d'occupation. Une activation de la ventilation sur un planning un peu plus large que le planning d'occupation est apparue comme être le meilleur compromis entre bonne qualité d'air et économie d'énergie.

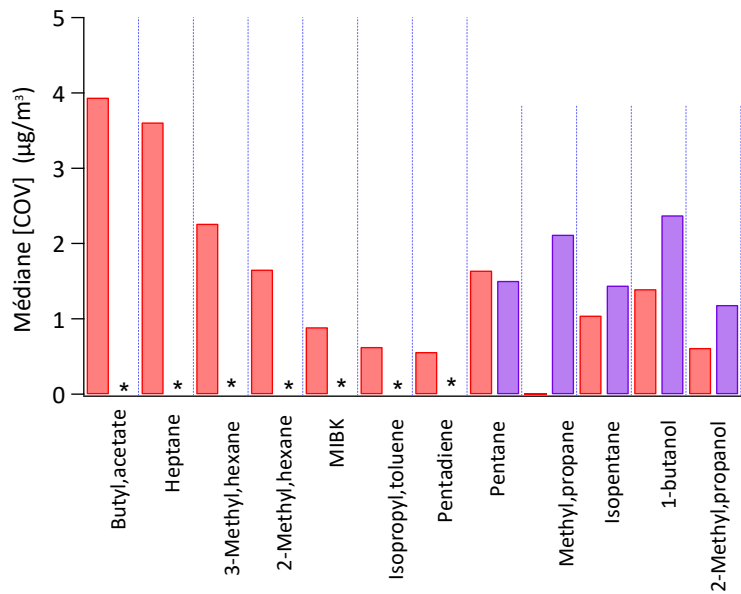
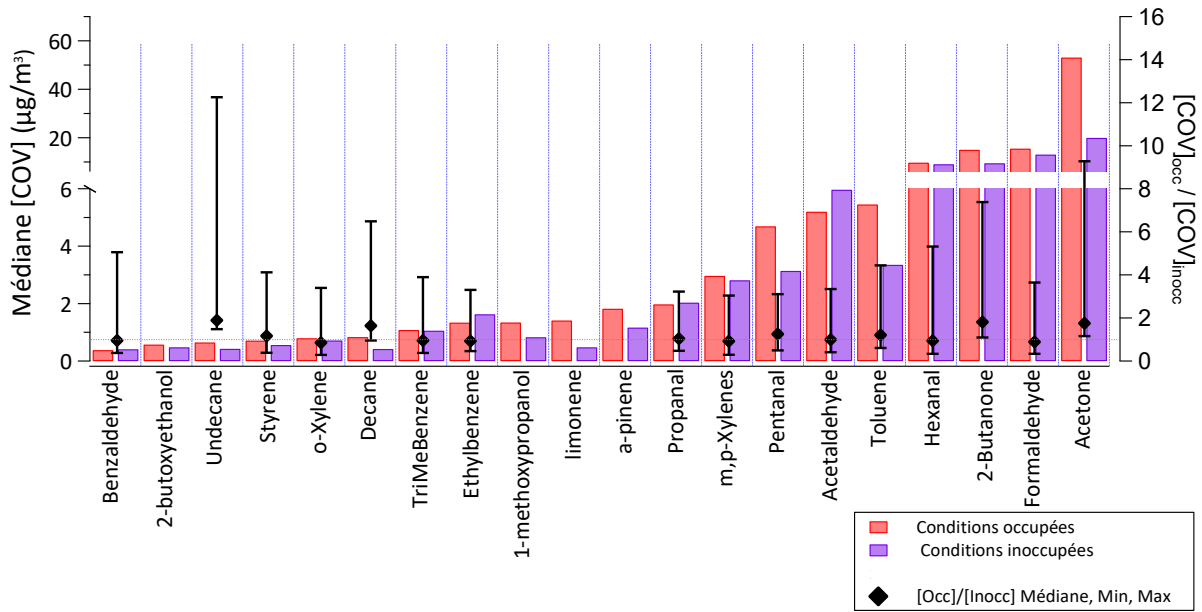


Figure 2- 1 Résultats majeurs obtenus lors du projet MERMAID sur une campagne de mesure de la QAI dans des établissements scolaires à basse consommation énergétique. La figure représente les concentrations médianes observées sur les 10 bâtiments investigués (µg/m<sup>3</sup>) (axe de gauche), les ratios de concentration entre les périodes occupées et inoccupées (axe de droite)

Le bilan des COV a concerné plus de 150 espèces différentes, ce qui est particulièrement distinctif par rapport à la littérature. La Figure 2- 1 rend compte des concentrations médianes observées en conditions occupées et inoccupées. Cela permet de distinguer celles dont la concentration dépend de l'occupation du bâtiment : acétone, acétate de butyle, méthylisobutylcétone (MIBK), heptane et méthylhexanes. Les composés majoritaires communs à l'ensemble des bâtiments investigués et les espèces quantifiées aux plus hautes teneurs sont des espèces de sources intérieures telles que l'acétone, le 2-butanone, le formaldéhyde, l'acétaldéhyde,

l'hexaldéhyde, le toluène, l'heptane et le pentanal. **Aucun profil spécifique à cette typologie de bâtiment n'a été mis en évidence et ce malgré leur modèle de construction propre. Les concentrations semblent être similaires voir légèrement inférieures aux moyennes observées sur les grandes campagnes nationales écoles et logement.**

Si l'analyse des résultats a été poussée en investiguant les ratios de concentration intérieur/extérieur, conditions occupées/inoccupées, les occurrences sur l'ensemble des bâtiments, et en tentant de dégager une typologie originale de ces environnements intérieurs, cela a reposé sur des mesures que l'on peut qualifier de semi-quantitatives. En effet, la mesure par échantillonnage passif et la détermination des concentrations repose sur une estimation des débits d'échantillonnage qui par principe se déterminent en amont des mesures, en laboratoire dans des conditions simplifiées et contrôlées. Etant donné qu'un grand nombre d'espèces ont été considérées, pour certaines jamais rapportées dans la littérature, certains débits d'échantillonnage ont été déterminés par transposition à des espèces proches. Ceci amène nécessairement une large incertitude à la mesure, mais qui dans ce contexte de campagne comparative est tout à fait acceptable. Néanmoins, des travaux ont été entamés, financés par le LCSQA (Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air) pour investiguer l'impact de la variation des conditions environnementales sur les débits d'échantillonnage. Par faute de financement, et d'écartement de la problématique QAI de la cible du LSCQA, l'étude n'a pas atteint son terme. En revanche ce type d'étude a été mené pour d'autres composés, et notamment ceux mesurés dans l'air ambiant autour de sites de gestion de déchets. Il a été montré (et publié dans Verrielle, et *al.*, 2015) que la mesure par échantillonnage passif Radiello ne peut être étendue à tout type de composés (déconseillée pour les composés types mercaptans, halogénés, et quelques oxygénés) et que le paramètre de vitesse d'air autour du préleveur est très impactant.

**Développements métrologiques pour la caractérisation des dynamiques de concentrations en environnement intérieur.** Au démarrage du projet MERMAID, peu de campagnes n'avaient encore été réalisées avec des instruments permettant un suivi des concentrations en COV de l'ordre de la minute ou de l'heure. Néanmoins des travaux, notamment ceux du CSTB réalisés dans la maison MARIA avait démontré l'utilité de ces mesures pour mettre en évidence le rôle de la réactivité sur les concentrations en terpènes émanant des produits ménagers<sup>28</sup>. C'est alors, que dans le cadre du projet MERMAID, j'ai contribué à déployer lors de 2 campagnes intensives (en 2014 et 2015) dans un collège sélectionné, un ensemble d'outils (plusieurs dizaines) permettant la caractérisation large de la dynamique temporelle des COV mais également des espèces inorganiques, particulières et radicalaires. Pour ma part, j'ai participé au déploiement d'un PTR-ToF-MS, de 2 chaînes de chromatographie en phase gazeuse (TD-GC-FID) et d'un système de chromatographie compacte. Ces mesures (dîtes on-line) ont permis (i) l'identification de dynamiques temporelles journalières et hebdomadaires typiques de polluants de sources intérieurs, majoritairement indexées sur la ventilation mécanique (et plus marginalement sur l'ouverture des portes et fenêtres), (ii) l'impact des activités de nettoyage, (iii) l'impact d'épisodes de pollution extérieure. L'exploitation des résultats a abouti sur l'établissement des dynamiques temporelles pour une centaine de polluants d'origine intérieur et extérieur, à trois points de prélèvements (intérieur salle de classe, extérieur du bâtiment, flux d'air entrant de la salle de classe).

La Figure 2- 2 illustre la dynamique temporelle du toluène (polluant de source intérieure) mesuré au centre de la salle de classe instrumentée, à la bouche de soufflage du système de ventilation, à l'extérieur du bâtiment. L'impact de la ventilation est clairement mis en évidence. Par ailleurs, la Figure 2- 3 souligne l'influence d'un épisode de pollution extérieure sur les concentrations intérieures de composés aromatiques et alcanes. L'infiltration de ces espèces vers l'intérieur, en ventilation naturelle, est constatée avec un délai par rapport aux pics de pollution extérieure.

L'analyse des séries de données temporelles ont permis, selon le groupe d'espèces considéré, d'aboutir à la mise en évidence de certaines sources ou de certains processus. Elles ont d'ailleurs été complétées par des mesures de terrain pour établir les taux d'émission et les capacités de piégeage des COV pour les surfaces majoritaires de l'environnement considéré et vis-à-vis d'une vingtaines d'espèces cibles (Thèse de Malak Rizk 2013-2015). Le protocole de ces mesures est explicité dans la partie B-3 de ce chapitre, et les résultats ont été valorisé dans le



cadre d'un article (Rizk, et al., 2018). Elles ont également servi à alimenter le modèle INCA-INDOOR (type modèle « de boîte ») développé dans le cadre du projet<sup>29</sup>.

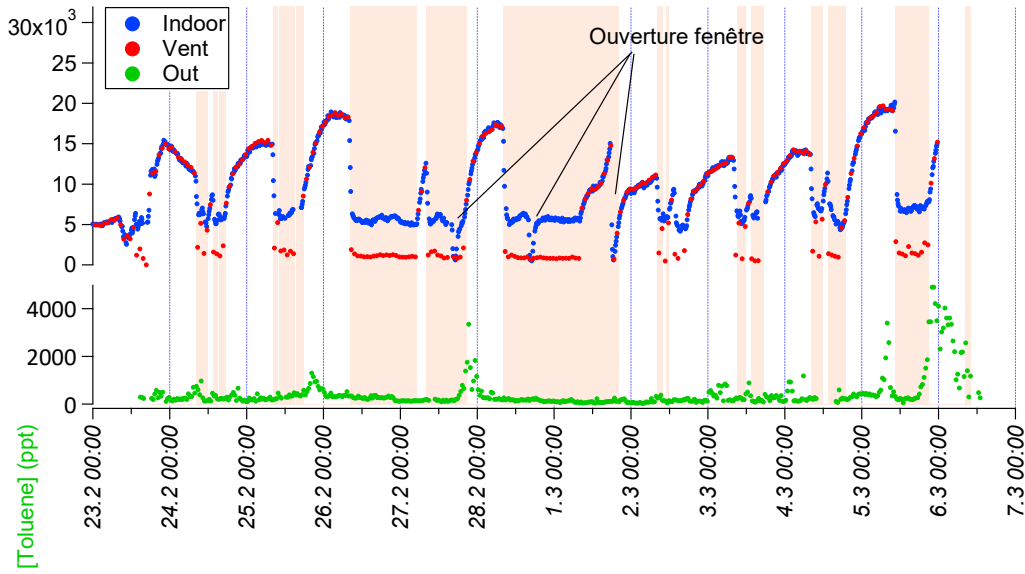


Figure 2- 2 Résultats majeurs obtenus lors du projet MERMAID sur une campagne de mesure de la QAI dans un collège - Profils de concentration du toluène mesuré sur une période de 2 semaines dans une salle de classe (points bleus), à la bouche de soufflage du système de ventilation (points rouges) et à l'extérieur de la salle de classe (points verts). Les zones orangées correspondent à des périodes de ventilation mécanique, les zones blanches à des périodes de ventilation naturelle.

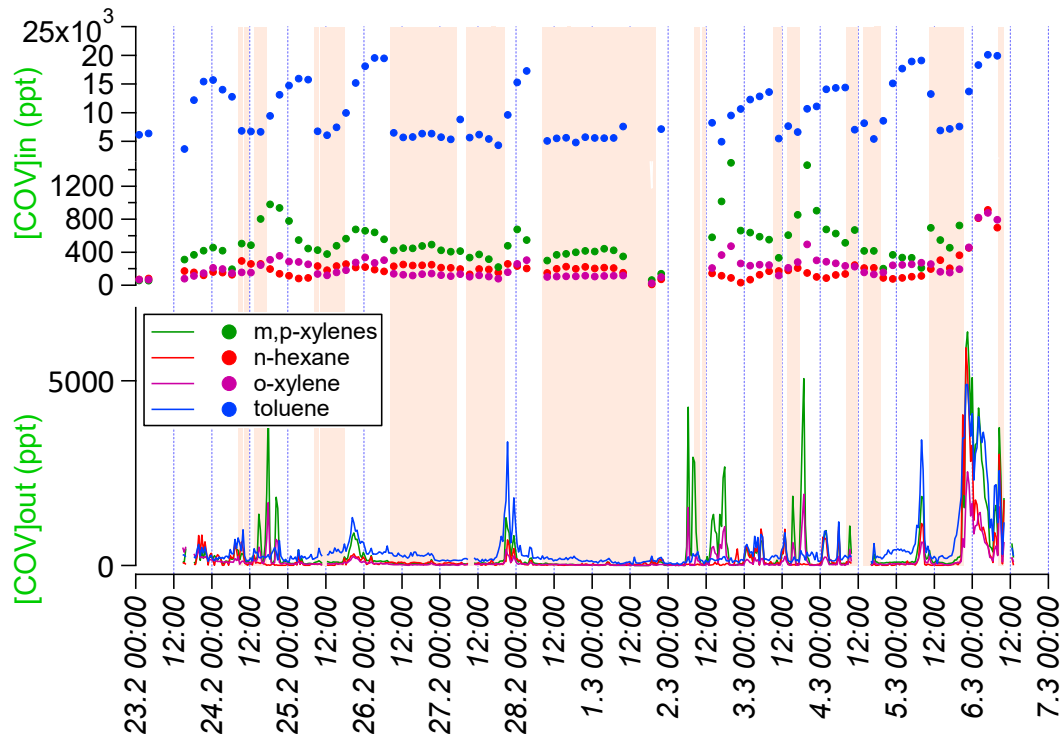


Figure 2- 3 Résultats majeurs obtenus lors du projet MERMAID sur une campagne de mesure de la QAI dans un collège - Profils de concentration mesurés sur une période de 2 semaines en toluène, xylènes et hexane à l'intérieur de la salle de classe et à l'extérieur du bâtiment. Les zones orangées correspondent à des périodes de ventilation mécanique, les zones blanches à des périodes de ventilation naturelle.

**Développements métrologiques pour la caractérisation in-situ des émissions.** Au-delà de la caractérisation des concentrations en air intérieur, l'identification des sources les plus contributrices est un aspect central de la gestion de la qualité de l'air intérieur. Divers outils permettant de réaliser une évaluation rapide et fiable des émissions surfaciques ont été développés par des équipes de recherche et transférés au secteur privé : par exemple la DOSEC (Device for On-Site Emission Control)<sup>30</sup> ou le PFS Fluoral-P<sup>31</sup> pour les mesures d'émission de formaldéhyde ; ou encore un dispositif innovant pour la caractérisation des émissions en composés semi-volatils<sup>32</sup>. Le mode de fonctionnement de ces outils est le même : l'idée est de pouvoir réaliser un prélèvement non destructif, directement sur site sans demander de compétences techniques spécifiques. L'utilisation de ces outils est particulièrement pertinente si l'on révèle au cours d'un diagnostic QAI des concentrations ambiantes préoccupantes d'un point de vue sanitaire ou olfactif par exemple : il faut alors aller plus loin et pointer de quelle(s) surface(s) il s'agit.

Des développements métrologiques ont été menés antérieurement à mon arrivée dans l'équipe afin de développer des préleveurs passifs, adaptés donc au prélèvement des émissions de surface. Des dispositifs simples, exposés sur des surfaces planes pendant quelques heures, composés d'une cloche en verre et d'une surface de piégeage, ont révélé leur potentiel pour localiser des puissants émetteurs de composés carbonylés, dont le formaldéhyde ainsi que les hydrocarbures aromatiques les plus courants. Un protocole d'étalonnage permettant de relier la quantité piégée par le préleveur avec le taux d'émission qui aurait été mesuré en laboratoire dans des conditions contrôlées selon la norme ISO 16000-9<sup>33</sup> est toutefois à mener en laboratoire en amont des mesures.

Plus facile d'utilisation que la méthode normalisée<sup>34</sup>, ayant recours à la cellule d'essai d'émission FLEC (Field and Laboratory Emission Cell) qui demande une alimentation en gaz, ces systèmes ont séduit le secteur de l'automobile. Dans le cadre de la thèse de Lorène Beauvais, financée par PSA Group, a donc été testé l'adaptabilité de ces systèmes à des surfaces de matériaux entrant dans l'habitacle (pas toujours plans, avec des rugosités importantes) et dans des conditions de température et d'humidité dépassant les niveaux ambiants. L'objectif était de mettre au point un dispositif capable de localiser les surfaces émettrices de composés non souhaités, préoccupants du point de vue sanitaire ou responsables de mauvaises odeurs. Les véhicules subissant de grandes variations d'humidité et de température et le retour d'expérience du constructeur automobile identifiant les conditions à haut taux d'humidité comme génératrices d'odeur, il fallait que le système d'échantillonnage puisse s'y adapter. Deux préleveurs dont le principe repose sur le piégeage par une molécule « de dérivation » ont été adaptés pour la mesure des composés carbonylés et des amines. Un préleveur basé sur le principe de diffusion au sein d'un adsorbant carboné a été sélectionné pour la mesure des COV, potentiellement odorants.

- (i) Une étude des performances de ces préleveurs (qualité de blancs, répétabilité, durée optimale d'échantillonnage) à différentes conditions de températures et d'humidité a été menée ;
- (ii) Les masses prélevées par ces dispositifs et les taux d'émissions déterminées en chambre d'1m<sup>3</sup> et en cellule FLEC, sur des pièces et directement au sein d'un véhicule ont été comparées ;

A l'issue des 3 années de thèse, il s'est avéré que le dispositif de préleveur passif ne pouvait être adapté aux matériaux de l'automobile et dans les conditions de température et d'humidité hautes. Les principales raisons de l'échec de cette étude de faisabilité résident dans le fait qu'il est difficile de stabiliser les émissions dans des conditions d'humidité extrêmes et que de ce fait il n'est pas rigoureux et pertinent d'établir un lien entre la quantité piégée et les quantités émises en considérant des temps d'expérimentation courts (inférieurs à 24h). Si par ailleurs, les temps d'expérimentation auraient pu être poussés, on a constaté que la masse piégée ne dépendait pas uniquement de la molécule cible mais également du matériau duquel elle était émise. Ceci rendait donc l'étalonnage du système non réaliste puisque nécessitant un nombre d'essai préalable important et « personnalisé » à chaque type de matériau.

A l'issue de ces travaux, l'usage d'un dispositif ayant recours à de l'échantillonnage actif (type cellule FLEC) a donc été recommandé comme moyen d'investigation des sources d'émission malgré les difficultés de mise en œuvre que cela pourrait engendrer. Le problème de l'étanchéité des surfaces se posant toujours, il faudrait développer un dispositif dédié aux matériaux de l'automobile.



Que retenir ?

**La métrologie des COV est le socle de compétences sur lequel repose mes activités de recherche en qualité de l'air intérieur. La difficulté réside dans la diversité des composés à prendre en compte mais également dans le grand nombre de processus physico-chimiques qui gouvernent les concentrations des polluants au sein des environnements intérieurs.**

**Si j'ai privilégié le développement de dispositifs faciles à déployer tant pour la mesure en environnement réel que pour la caractérisation des sources, c'est parce qu'ils étaient nécessaires à l'établissement de diagnostics fiables. L'évaluation de l'exposition des personnes et la mise en évidence des sources sont des éléments cruciaux.**

**Aujourd'hui, mes travaux se concentrent sur la compréhension des processus et cela passe forcément par la description des profils temporels de concentrations par des instruments à haute résolution de mesure. Les campagnes de terrain nécessitant ce type d'appareillage sont invasives, coûteuses et lourdes en termes de logistique et de personnel. Elles sont riches d'enseignement mais obligent à considérer l'ensemble du système avec toute sa complexité. C'est pourquoi elles sont pour moi à associer avec de l'expérimentation en milieu contrôlé, à différentes échelles en distinguant les processus à étudier.**

Valorisation

Rapport	ADEME. C. Schoemaeker, B. Hanoune, D. Petitprez, P. Lebègue, N. Leclerc, X. Pingenot, C. Schneider, M. Verrièle, S. Dusanter, N. Locoge, S. Le Calvé, P. Bernhardt, M. Mendez, N. Blond, D. Hauglustaine, F. Guo, I. Charpentier, P. Blondeau, M. Abadie. (2015). <i>Projet MERMAID : Caractérisation détaillée de l'air intérieur des bâtiments énergétiquement performants par couplage entre Mesures Expérimentales Représentatives et Modélisation Air Intérieur Détaillée – Rapport</i> . 178 pages.
Article	Verrièle, M., C. Schoemaeker, B. Hanoune, N. Leclerc, S. Germain, V. Gaudion, et N. Locoge. « The MERMAID study: indoor and outdoor average pollutant concentrations in 10 low-energy school buildings in France ». <i>Indoor Air</i> 26, n° 5 (2016): 702-13.
Article	Rizk, M., F. Guo, M. Verrièle, M. Ward, S. Dusanter, N. Blond, N. Locoge, et C. Schoemaeker. « Impact of material emissions and sorption of volatile organic compounds on indoor air quality in a low energy building: Field measurements and modeling ». <i>Indoor Air</i> 28, no 6 (2018): 924 35.
Manuscrit de thèse	Malak Rizk, Développement, validation et mise en œuvre sur le terrain d'une méthode de caractérisation in-situ des processus de sorption des COV par les matériaux de construction. (2015)
Manuscrit de thèse	Lorène Beauvais, Développement d'un outil de diagnostic in-situ des émissions de Composés Organiques Volatils en vue de la maîtrise de l'odeur et des concentrations en polluants dans l'habitable. (2020)



## B2- CARACTERISER LES SOURCES ET LES PUIITS EN VARIANT LES ECHELLES

Les processus qui gouvernent les concentrations en environnements intérieurs sont nombreux, complexes et interconnectés. Les quatre principaux déterminants des concentrations des polluants présents en air intérieur (Figure 2-4) sont : (i) les échanges avec l'air extérieur, contrôlés par les concentrations externes, les taux de renouvellement d'air mécaniquement induits, et l'infiltration naturelle de l'air ; (ii) les sources d'émission internes et leur taux d'émission ; (iii) les interactions entre les surfaces internes (surfaces du bâti, du mobilier, des occupants et matière particulaire) et l'air ambiant ; (iv) la réactivité en phase homogène et hétérogène. Les conditions environnementales, extérieures ou intérieures (température, humidité, lumière), sont à même d'impacter directement chacun de ces déterminants. Si aujourd'hui la communauté scientifique s'est accordée sur la définition des déterminants de la pollution tels que rappelés par Nicolas Carslow à la conférence Healthy Buildings 2021 (Oslo)<sup>35</sup>, leur compréhension est encore parcellaire. Les mesures ainsi que les travaux de modélisation réalisés dans le cadre du projet MERMAID ont pu mettre en lumière la contribution de chacun des déterminants mais la non maîtrise de l'ensemble des paramètres environnementaux et ceux liés au fonctionnement même des installations du bâtiment investigué est une limite du projet.



Figure 2- 4 Les déterminants de la Qualité de l'Air Intérieur

Les essais en chambre d'essais d'émissions permettent de définir des procédures (i) reproductibles, (ii) dans des conditions d'essais maîtrisées, d'évaluations des émissions et des puits, en conservant un coût d'essais raisonnable, des temps d'expérimentation relativement courts, et offrant une certaine flexibilité dans les protocoles. Cependant, de dimensions largement inférieures à des espaces réalistes et proposant donc des conditions expérimentales parfois éloignées de l'air intérieur, le recours à ces chambres d'essai peut induire des biais quant à la caractérisation quantitative des processus. Afin de rapprocher les conditions d'essais au plus près des conditions réelles des espaces intérieurs, il apparaît nécessaire de compléter les essais en chambre d'émission par des essais au sein de pièces expérimentales de grand volume. En relevant les challenges techniques, les approches expérimentales à l'échelle réelle permettent d'obtenir des résultats plus applicables donc plus valorisables que les études à l'échelle du laboratoire utilisant des chambres à atmosphère contrôlée non représentatives.

*L'étude des déterminants en conditions maîtrisées permet à la fois (i) de contrôler les paramètres environnementaux mais également (ii) d'étudier chaque déterminant de manière indépendante. Dans ce cadre, l'approche multi-échelle est un atout majeur. Les essais en chambre de petit volume, offrent plus de versatilité, et permettant vu du coût plus faible et des temps relativement plus courts d'expérimentation de couvrir plus de conditions expérimentales. Complétés avec des essais en pièce de volume réel, en nombre plus réduit, ils fournissent alors des résultats directement transposables à la réalité des environnements intérieurs.*

*J'ai la chance de pouvoir m'appuyer au sein du CERi sur des moyens d'instrumentation distinctifs pour l'étude des sources d'émission et puits. Ainsi l'on dispose au laboratoire d'un ensemble de 4 chambres d'essais de 30-250L, de 6 cellules d'essais d'émission (FLEC – Field and Laboratory Emission Cell), ainsi qu'une pièce expérimentale de 40m<sup>3</sup> (IRINA - Innovative Room for INdoor Air studies)*

Cette partie traite donc de ma contribution aux projets qui ont concerné la caractérisation des puits et des sources d'émission en conditions contrôlées. Elle se décline en 3 volets :

- la caractérisation du transfert des COV d'un matériau source à la phase gazeuse, à l'échelle d'une enceinte de petit volume; dans un contexte d'étude particulier que sont les espaces de commerces et de stockage ;
- la caractérisation de l'impact de l'utilisation des huiles essentielles en environnement intérieur : de l'émission au devenir des polluants ;
- la caractérisation des échanges de COV entre un matériau puits et la phase gazeuse.

**Caractérisation du transfert des COV d'un matériau source à la phase gazeuse, à l'échelle d'une enceinte de petit volume.** Suite à une campagne de mesure dans les commerces et les espaces de stockage, menée par l'INRS en 2018, il a été confirmé que les conditions de ventilation avaient un impact inégal sur les concentrations d'un COV à un autre. En effet, les données de la littérature<sup>36</sup>, confirmées par les observations de terrain montrent que le recours à la ventilation comme moyen de prévention ne pourrait dans certains cas ne pas réduire l'exposition des personnes.

Des travaux de thèses, réalisés par Florent Caron (2018-2021), ont eu pour objectifs (i) de renseigner expérimentalement les processus d'émission de COV pour des matériaux d'intérêt et leurs interactions avec la ventilation et (ii) de développer un modèle numérique prédictif de la QAI afin de proposer des pistes de prévention des risques professionnels. Ma contribution a été principalement d'encadrer le premier objectif et de m'assurer que les données produites allaient pouvoir être transférées au modèle numérique dont le développement était piloté par l'INRS.

La stratégie pour répondre à cet objectif particulier a été :

- ❶ de construire et valider une enceinte expérimentale permettant à l'échelle d'un matériau d'étudier l'impact de l'ensemble des composantes de la ventilation (vitesse d'air et taux de renouvellement) sur le transfert de COV ;
- ❷ d'améliorer la compréhension des processus de transfert en étudiant expérimentalement et distinctivement les impacts du taux de renouvellement d'air (TRA) et des vitesses d'air à la surface de matériaux plans ;
- ❸ de sélectionner la méthode expérimentale la plus performante pour décrire le transfert de COV au moyen de paramètres physico-chimiques adaptés au modèle de simulation développé.

**Enceinte développée /** L'enceinte expérimentale (Figure 2- 5), réalisée par l'atelier d'usinage de l'INRS de Nancy, et hébergée le temps de la thèse au CERi EE comprend (i) un caisson en aluminium de 128L, (ii) un système d'alimentation et de régulation d'air, (iii) un système de régulation et de contrôle des conditions de température, d'humidité et de pression et (iv) un système de brassage de l'air. Le dispositif a permis d'accueillir des essais d'émission selon 2 configurations distinctes : « parfaitement mélangée » correspondant à un mode où le brassage de l'air est induit par un ventilateur ou « ventilée » où le renouvellement d'air induit à lui seul la circulation de l'air dans la chambre. Ainsi sont atteignables des taux de renouvellement entre 0 et 18,75 h<sup>-1</sup> et des brassages induisant des vitesses horizontales jusqu'à 3 m.s<sup>-1</sup>.

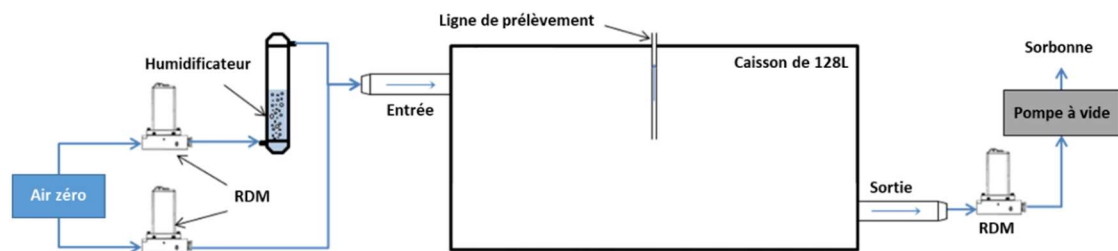


Figure 2- 5 Schéma de montage expérimental de l'enceinte développée à l'INRS pour l'étude des transferts de COV de matériaux à la phase gazeuse (Thèse de Florent Caron)

Trois lignes d'échantillonnage ont permis de connecter la chambre aux dispositifs d'analyse du CERI EE: instrumentation dites « off-line » associant une phase de prélèvement sur adsorbant puis une phase différée d'analyse de l'échantillon par chromatographie et instrumentation dite « on-line » : SIFT-MS.

**Influence de l'aéroulque sur les émissions de COV issus de matériaux de construction à l'échelle de l'enceinte expérimentale /** Afin d'améliorer la compréhension des processus de transfert de COV, les impacts du TRA et la vitesse d'air au voisinage d'un matériau sur les taux d'émission qui le caractérise ont été évalués expérimentalement dans différents régimes aéroulques et pour deux matériaux modèles un Panneau de Bois Aggloméré (PBA) et un plancher de Bois Brut (BB). L'évaluation des émissions a concerné des aldéhydes et cétones de moins de 6 atomes de carbone, dont le formaldéhyde, des terpènes, et l'acide acétique. Le protocole d'étude a inclus (i) des essais à TRA constant et vitesse d'air variables ; (ii) inversement des essais à vitesse d'air constante et TRA variables. Des essais complémentaires ont permis d'inclure l'étude de la variabilité induite par (i) le lot d'échantillonnage des matériaux, (ii) le vieillissement du matériau, et (iii) la température ; travail préliminaire qui s'est révélé indispensable permettant d'éviter, de limiter ou de prendre en compte les biais expérimentaux pouvant potentiellement impacter les résultats de l'étude.

Les résultats majeurs de ce travail sont les suivants :

- (i) La vitesse d'air au voisinage de leur surface n'induit aucune influence sur les taux d'émissions des COV suivis pour les matériaux considérés.
- (ii) En revanche, les taux d'émission de plusieurs COV issus du PBA et du BB croissent significativement lorsque le TRA est augmenté. Pour le BB, les émissions d'acétaldéhyde et de formaldéhyde présentent une sensibilité positive au TRA, alors que seule l'émission de formaldéhyde issu du PBA est accrue par l'augmentation du TRA. L'analyse des émissions d'acétaldéhyde et de formaldéhyde montre que le comportement d'émission de ces COV vis-à-vis des conditions de TRA dépend à la fois de la nature du COV et de celle du matériau source. (Figure 2- 6)

Ces résultats confirment l'importance de renseigner les interactions entre la ventilation et les émissions de COV. Ils laissent également présager de la prévalence de la capacité diffusionnelle d'un COV dans la structure interne d'un matériau vis-à-vis de son comportement d'émission. La prise en compte de comportements d'émission distinctifs est donc nécessaire pour la mise en place de stratégies de ventilation, comme moyen de prévention. L'augmentation des débits ne peut être la seule solution ; l'optimisation de l'agencement de l'environnement intérieur ou des paramètres environnementaux sont d'autres pistes qui demandent à être évaluées. Or, déterminer expérimentalement l'efficacité de ces stratégies peuvent s'avérer lourdes et coûteuses et reposant sur des cas d'études parfois trop marginaux. C'est pourquoi le développement d'un modèle de simulation numérique permettant de tester une multitude de cas d'étude peut s'avérer salvateur. En revanche, la première étape de développement de ces modèles repose sur le choix de paramètres permettant de décrire les processus d'émission intrinsèquement aux conditions expérimentales. Ces paramètres doivent néanmoins être obtenus expérimentalement, ce qui a fait l'objet des travaux décrits ci-après.

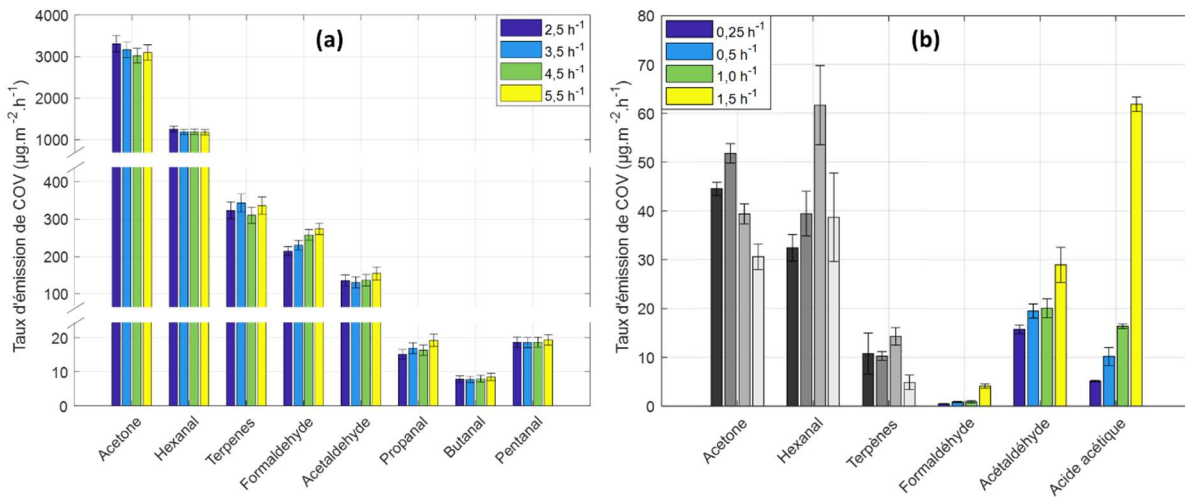


Figure 2- 6 Taux d'émission des COV ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ) pour différents TRA ( $\text{h}^{-1}$ ) mais à vitesse d'air constante au voisinage du matériau ( $0,5 \pm 0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) pour (a) le PBA et (b) le BB.

Sélection d'une méthode expérimentale pour décrire le transfert de COV au moyen de paramètres physico-chimiques adaptés à un modèle de simulation CFD/ Les modèles de transferts des COV d'un matériau à la phase gazeuse prennent généralement en considération 3 paramètres clés de l'émission<sup>37</sup> :  $K_i$ ,  $C_{0,i}$ ,  $D_i$ .

Le **coefficient de partition**  $K_i$  caractérise la capacité d'un COV  $i$  à être transporté de la phase adsorbée à la surface d'un matériau à la phase gazeuse selon un équilibre réversible de concentration entre le matériau et l'air ambiant.

La **concentration émissible**  $C_{0,i}$  ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) correspond à la concentration en COV  $i$  présente dans un matériau considéré comme étant la fraction pouvant être émise à une température et humidité donnée. Elle se distingue de la *concentration totale présente au sein du matériau étant la somme de la fraction irréversible ou immobile, nécessitant une extraction forcée et de la fraction réversible ou mobile pouvant être émise naturellement sous des conditions environnementales définies.*

Le **coefficient de diffusion** au sein du matériau  $D_i$  ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ) est utilisé par la seconde loi de Fick en considérant une diffusion en COV  $i$  unidirectionnelle et constante dans un matériau homogène.

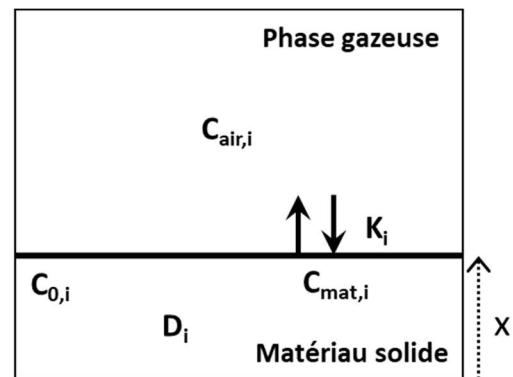


Figure 2- 7 Schéma théorique du transfert de COV d'un matériau plan à la phase gazeuse

Pour déterminer expérimentalement ces paramètres d'émission, plusieurs méthodes sont disponibles dans la littérature : parmi elles, les méthodes C-history<sup>38</sup> et AAVE<sup>39</sup> (Alternately airtight/ventilated emission method). Elles proposent un schéma expérimental impliquant un essai d'émission en enceinte, ainsi qu'une exploitation des profils de concentrations permettant de déterminer simultanément les trois paramètres. Le travail réalisé lors de la thèse de F. Caron a permis une étude comparative des performances et de la précision de ces deux méthodes en s'appuyant sur des essais d'émission sur un PBA, très couramment mis en œuvre et renseigné dans la littérature.

Les profils expérimentaux permettant la comparaison des méthodes ont été obtenus en exposant une planche de PBA dans l'enceinte et en alternant les conditions de ventilation entre phases renouvelées et phases étanches, sous un brassage de l'air permanent. La Figure 2- 7 donne un exemple de profils obtenus avec le PBA pour 2 COV types, le formaldéhyde et les terpènes. Ces espèces ont deux comportements distinctifs : (i) les cinétiques de concentrations marquées par des ruptures engendrées par le changement de phase de ventilation n'ont pas la même amplitude temporelle, (ii) la différence de concentrations après rétablissement des équilibres est

différente d'un COV à l'autre, (iii), l'épuisement du matériau au cours des différentes alternances n'est pas du même ordre de grandeur.

Après exploitation de ces profils selon les méthodes C-history et AAVE (Notons que la méthode C-history ne requiert d'exposer le matériau qu'en conditions renouvelées alors que la méthode AAVE requiert au moins 5 alternances et donc un temps d'expérimentation de plusieurs jours), les différences de comportements se confirment au travers les grandeurs de  $K_i$ ,  $C_{0,i}$ ,  $D_i$ . Toutefois, les deux méthodes donnent des valeurs différentes qui ont été analysées au regard de la reproductibilité entre essai mais aussi du comportement global des mêmes COV sur les essais d'émission faisant varier les taux de renouvellement d'air. En conclusion, de cette analyse la méthode AAVE a été considérée comme plus performante, même si elle requiert un temps d'expérimentation long. Elle a d'ailleurs montré son succès d'application également sur un matériau original : un bien de consommation réel, complexe et représentatif de produits manufacturés : une paire de chaussures. Le choix de ce produit reposait sur un besoin formulé plus largement autour du projet de thèse de Florent Caron ; puisqu'il avait été noté que ce type de chaussures était une source d'émission significative dans un contexte particulier qu'est la protection du travailleur en magasin de sport.

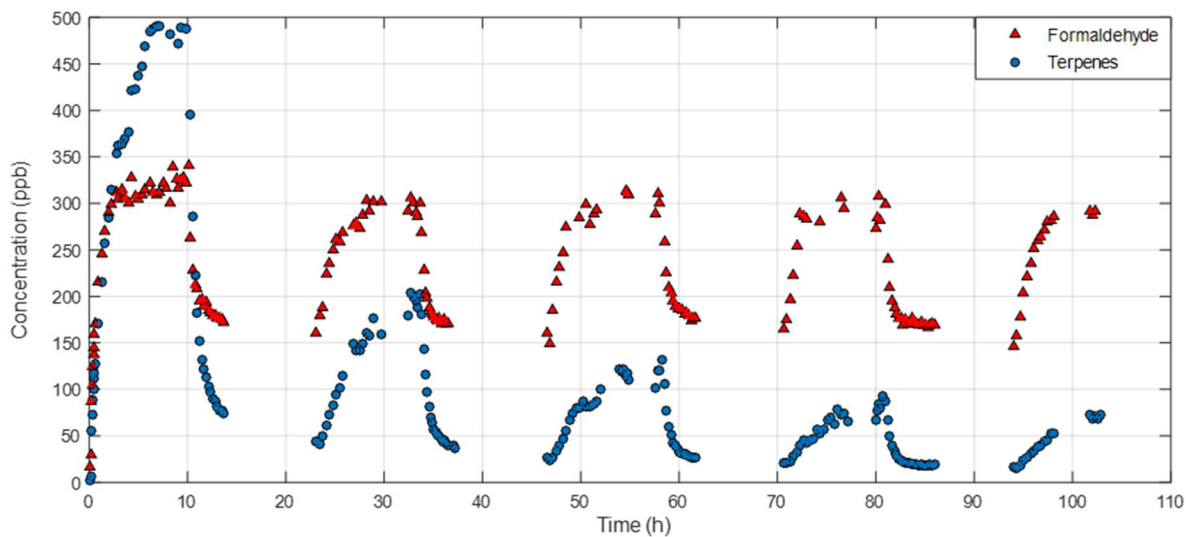


Figure 2- 7 Profils temporels de concentration (ppb) en formaldéhyde et en terpènes, mesurés au cours de la mise en œuvre de la méthode AAVE ( $T = 21 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$  ;  $HR = 50 \pm 5 \%$  ;  $TRA = 2,3 \pm 0,1 \text{ h}^{-1}$  lors des phases d'émission sous condition renouvelée).

L'ensemble du travail abordé dans les 2 sections précédentes ont fait l'objet d'une publication (Caron, et al., 2020). Les travaux de simulation numérique qui ont fait suite à ces essais (et dont les résultats ne sont pas présentés ici car y ayant peu contribué) ont montré la pertinence des paramètres choisis pour implémenter des modèles de prédiction de la QAI en vue de proposer des solutions de prévention basées sur la ventilation.

**Caractérisation de l'impact de l'utilisation des huiles essentielles en environnement intérieur : de l'émission au devenir des polluants – approche multi-échelle.** La section précédente a montré l'importance de caractériser les émissions de matériaux en allant bien plus loin que la détermination des taux d'émission. C'est le cas également pour les émissions issues de l'activité des occupants, puisqu'une fois émis en phase gazeuse, les polluants sont à même de réagir avec les oxydants de l'air et/ou d'interagir avec les surfaces de l'air intérieur. C'est ainsi que le projet ESSENTIEL a cherché à caractériser de manière globale l'impact de l'utilisation d'huiles essentielles sur la qualité de l'air intérieur en intégrant un volet « émission » ainsi qu'un volet « devenir des polluants ».

Au-delà de l'intérêt scientifique que cela représente, le projet ESSENTIEL a un impact sociétal fort. En effet, désireux d'adopter un mode de vie écologique et durable, les occupants de la maison de demain prônent l'entretien de la maison « au naturel » et l'usage des huiles essentielles, à diffuser dans l'air ambiant ou à inclure dans les produits de nettoyage afin « d'assainir l'air de la maison ». C'est sur ce point que ces comportements



nouveaux sont parfois controversés et doivent être interrogés. Si les huiles essentielles disposent de propriétés antibactériennes et sédatives, le caractère irritant et allergisant des terpènes qu'elles contiennent, ainsi que leur réactivité avec les oxydants de l'air intérieur, questionnent leur impact sur la qualité de l'air intérieur. Et bien que d'origine naturelle, ces substances sont potentiellement des sources massives de composés organiques volatils (COV) terpéniques, dont les émissions et le devenir dans les espaces intérieurs sont à renseigner.

En préalable au projet, une revue massive (122 articles, parus de 1992 à nos jours) de la littérature a été menée sur le sujet (Angulo, et al., 2020). L'analyse de ces documents a permis de :

- Identifier la composition des produits de nettoyage et d'assainissements, les habitudes d'utilisation et l'exposition des usagers en abordant les données réglementaires ;
- Donner un aperçu global des méthodologies expérimentales utilisées pour la mesure de ces émissions, en abordant les paramètres opératoires, les chambres expérimentales, les méthodologies d'application et les stratégies de mesures ;
- Comparer ces données par catégories de produits : huile essentielle, produit de nettoyage, produit parfumant et assainissant ;
- Aborder la question de la réactivité des terpènes contenus dans les produits investigués.

La démarche adoptée durant le projet a ensuite visé à proposer des protocoles d'essais préconisant des scénarii réalistes d'utilisation de produits ménagers à base d'huiles essentielles dans les environnements intérieurs afin de fournir des facteurs d'émissions représentatifs de leur mise en œuvre réelle.

Le projet ESSENTIEL bénéficiant des infrastructures de l'IMT Nord Europe et du CSTB a permis 4 types de caractérisation :

- ❶ La détermination de la teneur en terpènes contenus dans les produits ménagers sous forme liquide ;
- ❷ L'évaluation de la fraction volatilisable des produits ménagers, au moyen d'une micro-chambre d'émission ;
- ❸ L'évaluation des émissions liées à l'utilisation des produits ménagers, mis en œuvre selon un protocole réaliste dans une chambre d'1 m<sup>3</sup> sous des conditions contrôlées;
- ❹ L'évaluation des émissions liées à l'utilisation des produits ménagers, mis en œuvre selon un protocole réel dans une pièce expérimentale de 40m<sup>3</sup> sous des conditions contrôlées ;

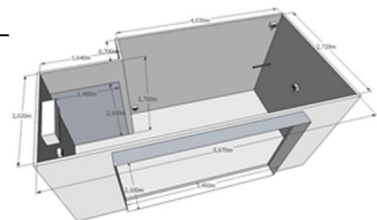
Ces caractérisations ont concerné un panel de produits composé de produits de nettoyage, désodorisants-purifiants et huiles essentielles pures potentiellement diffusées par des systèmes différents.

Par ailleurs, le projet a renseigné les interactions entre le limonène (terpène modèle) et 10 surfaces représentatives des environnements intérieurs (coefficients de partition gaz / surfaces), et permis des essais d'émission en conditions oxydantes permettant d'évaluer la réactivité de terpènes issus de la diffusion d'huile essentielle.

**IRINA**, pièce expérimentale de 40m<sup>3</sup>. Elle permet d'étudier des dispositifs à l'échelle 1 aussi bien en termes d'émission que de traitement d'air. Elle a bénéficié d'une validation métrologique<sup>40</sup> sur quatre points clés :

- ❶ Taux de renouvellement de la pièce ;
- ❷ Niveaux de blancs d'O<sub>3</sub>, COV, particules ;
- ❸ Homogénéité des concentrations ;
- ❹ Contribution des pertes aux parois.

Elle est équipée de systèmes permettant l'injection reproductible de gaz (COV, ozone, CO<sub>2</sub>), mimant des épisodes de pollution réalistes, mais peut également accueillir des matériaux (sources et puits) de grande taille, des systèmes réels de traitement d'air, ou des activités domestiques (ménage, séchage linge, ...). Elle est reliée à l'ensemble du parc analytique du laboratoire (SIFT-MS, analyseur de gaz, échantillonnage sur cartouches, GC online) pour la caractérisation des profils de concentration. Des capteurs permettent la caractérisation de la température, humidité, COV. Une climatisation, bouclée sur elle-même permet de travailler sur un mode de ventilation naturelle ; une veine associée à un banc de traitement des effluents permet de travailler sur des taux de ventilation forcée, à haut taux de renouvellement.



**Diffusion d'huile essentielle en air intérieur/** L'étude des processus de diffusion d'huile essentielle à l'échelle réelle a confirmé qu'elle représente une source substantielle de terpènes en air intérieur. Les concentrations auxquelles les occupants sont exposés peuvent varier de quelques centaines à plusieurs milliers de ppb selon le type de diffuseur que l'on utilise (diffusion transitoire par chauffage ou nébulisation ou diffusion continue par capillarité). La durée d'impact varie de quelques heures avec les dispositifs transitoires, et jusqu'à plusieurs dizaines de jours pour les dispositifs de diffusion continue. Les émissions liées à l'utilisation d'un diffuseur électrique étudiées en pièce de 40 m<sup>3</sup> atteignent des valeurs maximales de l'ordre de 2000 mg/h par diffuseur (sommes des terpènes émis), dans l'heure suivant le démarrage du système. La diffusion continue est en revanche caractérisée par des taux d'émission plus faibles, environ 400 mg/h par diffuseur, mais sur une durée beaucoup plus longue : plusieurs dizaines de jours.

Par ailleurs, la comparaison des résultats obtenus dans la pièce expérimentale de 40 m<sup>3</sup> avec ceux obtenus en utilisant la chambre de 1 m<sup>3</sup> (Figure 2- 8) indique que le volume de l'enceinte impacte : (i) les niveaux de concentration des terpènes émis ; (ii) les profils temporels des taux d'émission, y compris la durée du processus d'émission ; (iii) la durée d'impact sur la qualité de l'air intérieur. Les travaux conduits sur la diffusion d'huiles essentielles qui ont été menés pour la première fois dans des enceintes de 1 m<sup>3</sup> et de 40 m<sup>3</sup> avec des protocoles équivalents et réalistes, montrent donc que les grandeurs caractérisant le processus de diffusion dépendent directement et très fortement du volume de l'enceinte utilisée.

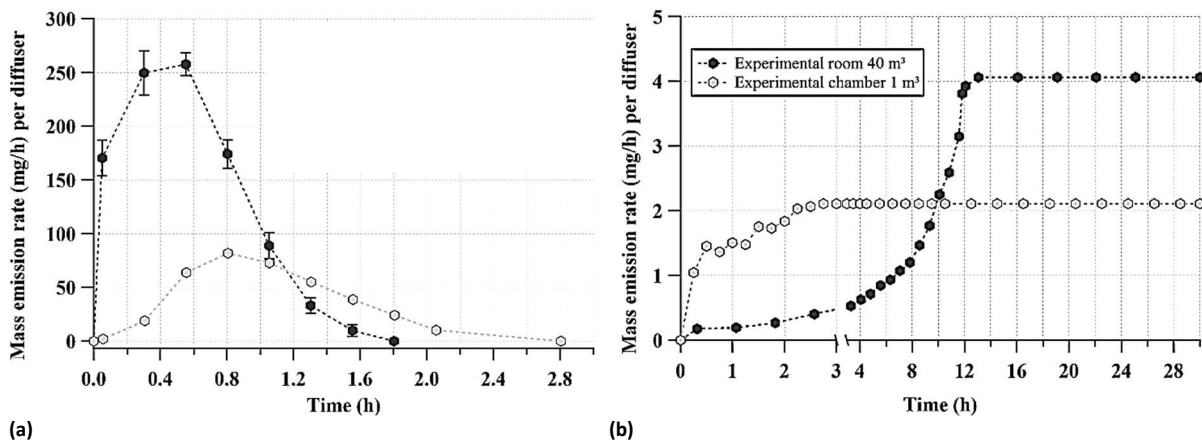
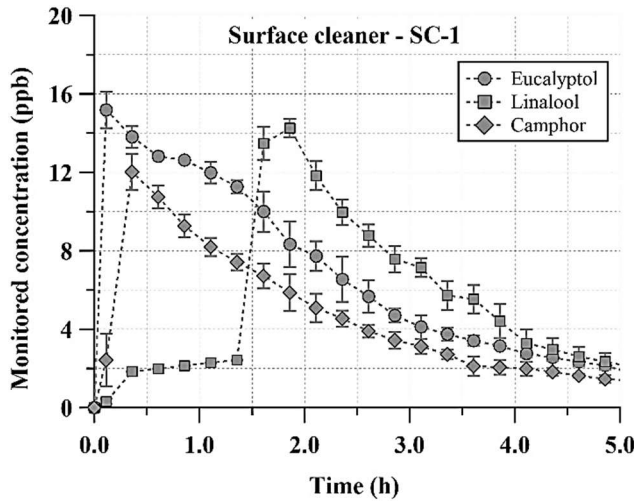


Figure 2- 8 Comparaison de l'évolution temporelle des taux d'émission massiques de  $\gamma$ -terpinène lors de la diffusion transitoire d'huile essentielle d'arbre à thé par diffusion électrique (a) et diffusion par capillarité (b) dans la pièce expérimentale IRINA de 40 m<sup>3</sup> et la chambre d'essai d'émission de 1 m<sup>3</sup> (T = 23 °C, HR = 50 %, TRA = 0,3 h<sup>-1</sup>).

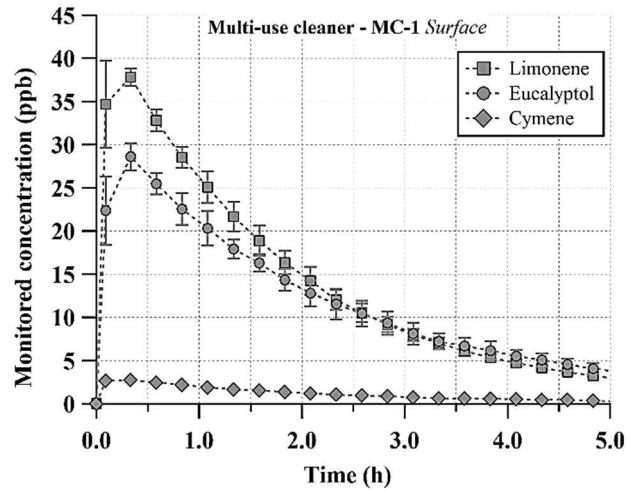
**Mise en œuvre de produits de nettoyage à base d'huiles essentielles en air intérieur/** Les investigations menées dans le projet ESSENTIEL ont confirmé également que l'activité de ménage impliquant l'utilisation de produits de nettoyage à base d'huile essentielle peut libérer des concentrations de plusieurs dizaines à quelques centaines de ppb de COV terpéniques, dépassant ainsi les limites d'exposition recommandées par l'Union Européenne (Figure 2- 9). Plusieurs facteurs ont été identifiés comme les déterminants principaux du transfert de masse des terpènes depuis la phase liquide des produits de nettoyage appliqués vers la phase gazeuse :

- La concentration massique des terpènes individuels dans la phase liquide des produits ;
- La formulation du produit de nettoyage, dont les solvants, qui peut induire des interactions entre les terpènes et les constituants du nettoyant, avec un impact certain sur la dynamique des émissions ;
- La volatilité propre à chaque terpène ;
- Le protocole d'application, c'est-à-dire la procédure de rinçage, la dilution du produit, la quantité de produit appliquée ;
- Les paramètres environnementaux à l'intérieur de la pièce de volume réel, notamment l'humidité relative.

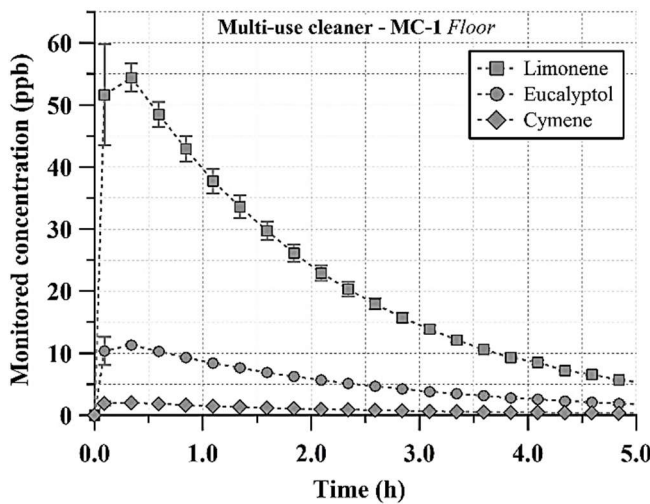




(a)



(b)



(c)

Figure 2- 9 Évolution temporelle des concentrations des principaux terpènes identifiés lors de l'utilisation des produits de nettoyage (a) nettoyeur de surface (b) nettoyeur multi-usage pour le nettoyage de surface et (c) nettoyeur multi-usage pour le nettoyage des sols ( $T = 23$  °C,  $HR = 50$  %,  $TRA = 0,3 \text{ h}^{-1}$  et volume de la pièce =  $40 \text{ m}^3$ )

Les profils de concentrations obtenus, outre nous renseigner sur l'exposition de la population lors d'une activité de ménage, ont laissé apparaître l'influence d'agents de formulation sur la libération des terpènes et du formaldéhyde. En effet, la présence de libérateurs de formaldéhyde dans la formule en tant que conservant et de produits encapsulants agissent comme des retardateurs du point de vue respectifs de l'émission de formaldéhyde et terpènes. Si ces processus rallongent la perception de « propreté » suite à l'action de ménage, ils prolongent également l'exposition.

Tout comme pour la diffusion d'huile essentielle, pour garantir une évaluation représentative de l'impact de l'activité de nettoyage sur la QAI et de l'exposition individuelle aux COV émis, il a été confirmé que la caractérisation des émissions doit préférentiellement être effectuée dans une chambre de volume réaliste, et intégrant des protocoles d'application complets pour être représentatifs de l'activité de ménage dans son intégralité.

**Le devenir des terpènes en air intérieur/** Si les résultats obtenus montrent que le recours à des pièces expérimentales de volume réel permet de fournir des données pertinentes et représentatives, il est apparu aussi que la contribution des parois de l'enceinte doit être caractérisée avec précision pour fournir des taux d'émission justes. Les taux de dépôt sur les parois représentent un puits en COV terpéniques, équivalent pour certains au renouvellement d'air de la pièce. Ces données soulignent la nécessité de mieux comprendre le devenir des terpènes en air intérieur.

À cet égard, le projet a fourni des données quantitatives permettant de décrire les processus de perte des terpènes par sorption et par réaction afin d'améliorer l'intégration de ces termes puits dans les modèles dédiés à l'air intérieur, et ainsi leur représentativité et notre compréhension du devenir des COV, particulièrement terpéniques.

La détermination du coefficient de partition du limonène pour une sélection de dix matériaux typiques des environnements intérieurs a permis un classement quantitatif des principaux puits de terpènes. Les résultats révèlent des comportements très différents entre les matériaux sélectionnés en termes de quantité de limonène piégée. En effet, les coefficients de partition varient de  $0,010 \pm 0,001$  m pour du verre à  $1000 \pm 50$  m pour une plaque de plâtre dépolluante. Le verre et le polyester ont été classés comme des puits mineurs, tandis que le coton et le plâtre, sont clairement identifiés comme des puits majeurs. Ces derniers affectent potentiellement la concentration en phase gazeuse. En outre, l'étude de la réversibilité de la fraction absorbée fournit des informations sur les processus consécutifs à la sorption. Fait intéressant, les matériaux classés comme puits modérés présentent des comportements mixtes puits / source en fonction de la concentration en phase gazeuse. Ces matériaux peuvent agir comme des tampons, ou des modérateurs, de la concentration résultante en terpène en air intérieur.

L'étude de la réactivité des terpènes en air intérieur en conditions réalistes a été conduite par la mise en œuvre d'un diffuseur continu d'huile essentielle au sein de la pièce expérimentale IRINA dans laquelle une injection ponctuelle d'ozone a été réalisée. Le pic d'ozone, typique d'un épisode de pollution intérieur observé en période estivale est à même de déclencher un processus réactif en air intérieur. Les résultats montrent une consommation rapide et massive des réactifs, qui conduit à la formation d'acétone et de formaldéhyde, ainsi que de particules ultrafines (PM<sub>1</sub>). Les deux caractéristiques majeures des processus réactifs étudiés sont leur dynamique temporelle très rapide et des rendements de formation des sous-produits importants. Les concentrations en formaldéhyde et acétone, respectivement augmentées à  $10 \pm 4$  et  $25 \pm 5$   $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , restent constantes dans la pièce expérimentale IRINA plus de 2 h après l'injection d'ozone. La concentration massique en PM<sub>1</sub> est supérieure à  $100$   $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  au cours des 2 h suivant l'injection d'ozone. L'impact QAI du processus est limité dans le temps par la quantité finie d'ozone injectée. Si le scénario montre un impact QAI du processus réactif, il ouvre aussi la question de l'exposition des occupants en cas d'apport régulier d'ozone sur plusieurs heures.

Le projet ESSENTIEL a fait objet d'une large valorisation : 7 articles (4 acceptés, 3 en préparation), dont un article de review, de nombreuses communications lors de congrès internationaux et communiqué de presse (JNQA du 14 octobre 2021) et un rapport rassemblant l'ensemble des résultats disponibles sur la Librairie de l'ADEME dès la fin 2021. On peut d'ailleurs y retrouver un grand nombre de recommandations à destination des pouvoirs publics et de la population générale vis-à-vis (i) des méthodologies d'évaluation des émissions liées aux produits ménagers dans le cadre notamment de normalisation, (ii) des précautions d'usage de ces produits.

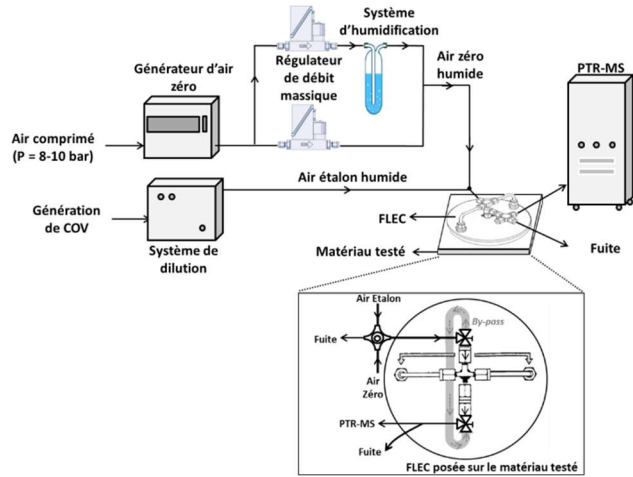
**Caractérisation des échanges de COV entre un matériau puits et la phase gazeuse : approche multi-échelle.** S'il a résidé au sein du projet ESSENTIEL, une volonté de travailler à la fois sur les émissions mais aussi sur le devenir des polluants, c'est qu'antérieurement à ce projet, j'ai également travaillé à des méthodologies de caractérisation des puits. Cet axe scientifique a été initié à ma prise de poste, simultanément au démarrage du projet MERMAID dont les résultats ont été présentés ci-avant.

Dans un premier temps, notre volonté a été (dans le cadre de la thèse de M. Rizk) de développer un dispositif basé sur la cellule d'essai d'émission (FLEC) permettant de caractériser in-situ les propriétés de piégeage de matériaux surfaciques présents dans un environnement intérieur. Cet objectif de développement se justifiait par le besoin de données représentatives permettant d'alimenter le modèle INCA-INDOOR sur le déterminant « interactions avec les surfaces ». Ainsi, il s'agissait d'évaluer quelle serait la contribution de ce déterminant sur les concentrations de l'air intérieur.

A l'issue de la thèse de Malak Rizk, on disposait alors d'un dispositif FLEC-PTR-MS (Figure 2- 10) formé de trois grandes parties regroupant un système de génération de mélanges gazeux, une cellule FLEC comme enceinte

d'échantillonnage et un analyseur rapide pour la mesure des concentrations en COV. Les travaux de thèse ont compris le développement de l'outil, totalement original, l'élaboration d'un protocole expérimental, l'évaluation des performances de la méthode sur des matériaux et COV modèles en conditions contrôlées et l'application sur le terrain (voir partie B-1).

Figure 2- 10 Schéma du couplage FLEC-PTRMS pour la caractérisation des propriétés de piégeage des COV de matériaux surfaciques



Le caractère novateur du développement résidait dans la possibilité, sous réserve de moyens logistiques importants, de transporter le dispositif sur le terrain et permettait une mesure sur des temps d'expérimentation bien plus courts que ceux observés dans la littérature. En effet, la caractérisation des propriétés de piégeage respectait un protocole bien connu, consistant à une alternance d'exposition d'une surface à un air chargé de COV (phase d'adsorption) puis à un air propre (phase de désorption), sous des conditions de température et d'humidité constantes<sup>41</sup>. Des essais sur 3 matériaux modèles ont pu montrer que le dispositif développé réduisait de plus de 90% les temps d'expérimentation, par le fait que la cellule FLEC montre un ratio *surface exposée / volume d'enceinte* très haut par rapport aux chambres d'essai d'émission ne serait-ce que de quelques dizaines de litres. La justesse de la méthode a été prouvée par comparaison avec des essais en chambre de 36L qui donnait les mêmes valeurs de coefficient de partition K que ceux obtenus en FLEC. En revanche, la méthode présentait des limites quand il s'agissait de s'intéresser à des matériaux fortement poreux (type plâtre, dalle de plafond) pour lesquels il n'était pas possible d'obtenir une étanchéité. Le recours à une éprouvette cylindrique était alors nécessaire mais ramenant la méthode à un statut de méthode destructive et non-transposable sur le terrain. Ces travaux ont donné lieu à 5 articles (dont 2 *Data in Brief*) parus entre 2016 et 2018.

Forts de ces développements métrologiques, nous avons poursuivi les travaux sur cette problématique dans le cadre du projet PsyCHO. Nos résultats avaient entre temps trouvé écho dans le travail de thèse de F. Batault encadré par mes collègues qui portait alors sur l'influence de l'adsorption sur le traitement photocatalytique de COV. La mise en commun des travaux a permis la mise au point d'un protocole optimisé des capacités de piégeage par la réalisation d'une courbe de percée (Figure 2- 11). Ce protocole, qui repose sur l'établissement de l'isotherme de Langmuir, consiste à exposer un matériau surfacique, placé dans une éprouvette cylindrique en inox, sous une cellule FLEC à des concentrations croissantes en COV. Puis après stabilisation des concentrations il est exposé à de l'air propre sous température ambiante. Les concentrations sont mesurées à l'aide d'un analyseur rapide de COV, ici un SIFT-MS. Ce protocole permet d'accéder à différentes grandeurs qui caractérisent les propriétés de piégeage du matériau : le coefficient de partition K (m) qui représente la fraction de COV piégée par le matériau par rapport à la quantité présente en phase gazeuse ;  $q_{rev}$  ( $\mu\text{mol.m}^{-2}$ ) qui représente la quantité de COV réversiblement piégée par le matériau (en surface ou au sein de sa structure) ;  $q_{irr}$  ( $\mu\text{mol.m}^{-2}$ ) qui représente la quantité de COV irréversiblement piégée par le matériau, et potentiellement libérable par une élévation de la température ou de la pression.

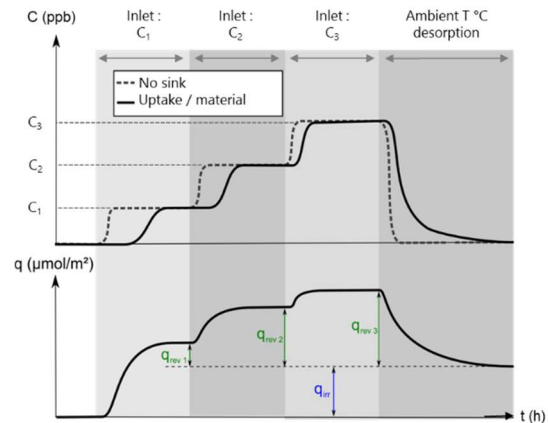


Figure 2- 11 : Protocole de caractérisation des capacités de piégeage des COV par les matériaux puits – établissement de l'isotherme de Langmuir

Ce protocole a été appliqué à des matériaux dits « puits », tels que des plâtres, dans leur formulation classique mais également modifiée (dits plâtre dépolluants). Les expérimentations peuvent considérer des COV individuels, utilisés alors comme des espèces « sondes » et permettant le classement des plâtres selon leur caractère dépolluant. Il est également permis de se projeter sur des comportements à long terme à partir de l'estimation des quantités réversiblement et irréversiblement adsorbés (Figure 2- 12). Enfin, des essais considérant des mélanges de COV permettent de se rapprocher des conditions de l'air intérieur et d'investiguer les compétitions d'adsorption à la surface des matériaux.

Les résultats obtenus sur ce volet ont été valorisés dans Thevenet, et al. 2018 et ont permis d'approcher Saint Gobain Recherche qui finance actuellement une bourse, et encadrement de thèse CIFRE sur la compréhension du comportement de matériaux à base inorganique vis-à-vis de la QAI. Ces travaux se place à l'interface de l'axe de recherche « Compréhension des déterminants de la QAI » et « Solutions de remédiation à la pollution de l'air intérieur »

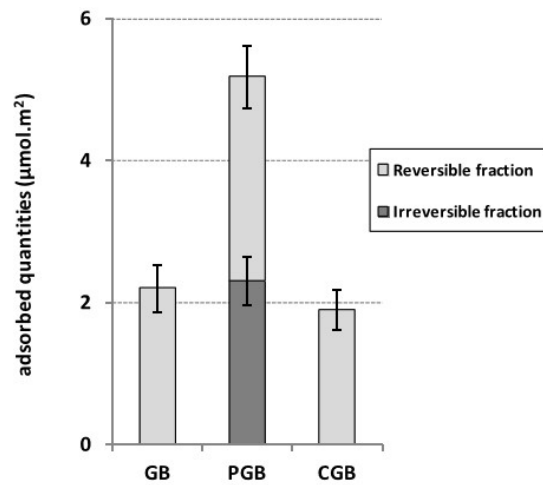


Figure 2- 12 Quantités de toluène réversiblement et irréversiblement adsorbé à la surface de plâtre classique (GB), de plâtre modifié par l'ajout d'un agent dérivant (CGB), de plâtre modifié par l'ajout de charbon actif (PGB)

**Que retenir ?**

**Les travaux présentés dans cette section démontrent mon implication forte sur les 5 dernières années dans des projets portés sur la caractérisation des sources et des puits en conditions contrôlées. Ma contribution majeure dans ces projets a d'abord été d'apporter mon savoir-faire métrologique pour la mesure des concentrations mais également pour l'établissement de protocoles représentatifs de la réalité des environnements intérieurs.**

**Ce souci de représentativité est poursuivi pour deux raisons principales :**

- la première : car ces essais de caractérisation sont d'abord à destination des agences de prévention et d'évaluation des risques telles que l'ANSES, l'INRS ou l'INERIS qui sont à même d'intégrer ces données à des calculs d'estimation de l'exposition aux polluants de la population ou des travailleurs.
- la seconde : car la compréhension des deux déterminants majeurs de la QAI que sont les sources et les puits permet d'affiner les modèles de prédiction : tant en fournissant des données d'entrée, qu'en améliorant la représentation des processus qui gouvernent la QAI.

**La raison d'être majeure de l'ensemble de ces projets vise à l'amélioration de la QAI par ces deux leviers importants que sont la diminution des sources de pollutions et la remédiation par le traitement de l'air intérieur. Néanmoins, ces solutions destinées à protéger l'occupant des espaces intérieurs le rendent passif et observateur du changement. C'est pourquoi, en complément j'ai voulu m'intéresser à des solutions qui rendent l'occupant acteur du changement.**

**Valorisation**

Rapport à paraître	F. Thevenet, M. Verrielle, M. Nicolas, S. Angulo-Milhem, P. Harb, F. Caron, (2021) Huiles essentielles et qualité de l'air intérieur, Emissions et transformations des composés organique volatils terpéniques issus de produits ménagers, ESSENTIEL, , Rapport
Article	Thevenet, F., M. Verrielle, P. Harb, S. Thlajeh, R. Brun, M. Nicolas, et S. Angulo-Milhem. « The indoor fate of terpenes: Quantification of the limonene uptake by materials ». Building and Environment 188 (2021).

Article	Angulo-Milhem, S., M. Verrielle, M. Nicolas, et F. Thevenet. « Indoor use of essential oil-based cleaning products: Emission rate and indoor air quality impact assessment based on a realistic application methodology ». <i>Atmospheric Environment</i> 246 (2021).
Article	Angulo-Milhem, S., M. Verrielle, M. Nicolas, et F. Thevenet. « Indoor use of essential oils: Emission rates, exposure time and impact on air quality ». <i>Atmospheric Environment</i> 244 (2021).
Article	Angulo Milhem, S., M. Verrielle, M. Nicolas, et F. Thevenet. « Does the ubiquitous use of essential oil-based products promote indoor air quality? A critical literature review ». <i>Environmental Science and Pollution Research</i> 27, no 13 (2020): 14365-411.
Article	Caron, F., R. Guichard, L. Robert, M. Verrielle, et F. Thevenet. « Behaviour of individual VOCs in indoor environments: How ventilation affects emission from materials ». <i>Atmospheric Environment</i> 243 (2020).
Article	Thevenet, F., O. Debono, M. Rizk, F. Caron, M. Verrielle, et N. Locoge. « VOC uptakes on gypsum boards: Sorption performances and impact on indoor air quality ». <i>Building and Environment</i> 137 (2018): 138-46.
Article	Rizk, M., F. Guo, M. Verrielle, M. Ward, S. Dusanter, N. Blond, N. Locoge, et C. Schoemaeker. « Impact of material emissions and sorption of volatile organic compounds on indoor air quality in a low energy building: Field measurements and modeling ». <i>Indoor Air</i> 28, no 6 (2018): 924-35.
Article	Rizk, M., M. Verrielle, Mendez, M., Blond, N., S. Dusanter, C. Schoemaeker, Blondeau, P., S. Le calve, et N. Locoge. « Fast sorption measurements of VOCs on building materials: Part 2 - Comparison between FLEC and CLIMPAQ methods ». <i>Building and Environment</i> 99 (2016): 239-51.
Article	Rizk, M., M. Verrielle, S. Dusanter, C. Schoemaeker, S. Le calve, et N. Locoge. « Fast sorption measurements of volatile organic compounds on building materials: Part 1 - Methodology developed for field applications ». <i>Building and Environment</i> 99 (2016): 200-209.
Manuscrit de thèse	Florent Caron, Caractérisation des mécanismes de transfert de COV à l'interface matériau-air pour le développement de modèles numériques prévisionnels de la qualité de l'air intérieur. (2021)
Manuscrit de thèse	Shadia Angulo, Emissions of terpenes from the use of essential-oil-based household products under realistic conditions: impact on indoor air quality.(2019)
Manuscrit de thèse	Malak Rizk, Développement, validation et mise en œuvre sur le terrain d'une méthode de caractérisation in-situ des processus de sorption des COV par les matériaux de construction. (2015)



### B3-LES PROJETS CASPA COMME SOLUTION DE REMEDIATION A LA POLLUTION EN AIR INTERIEUR

Les travaux présentés dans les sections précédentes, par l'apport de connaissances nouvelles et par le développement de méthodologies originales se positionnent directement en soutien aux politiques publiques, aux projets de réglementation ainsi qu'au cadre de normalisation. Toutefois, ils permettent dans une bien moindre mesure la sensibilisation directe de la population générale. Or, l'acceptation des politiques publiques, tout comme l'adaptation à la transition écologique que nous vivons, ne sont possibles que pour des citoyens sensibilisés aux questions environnementales. Les sciences participatives qui permettent d'associer des citoyens non-experts à la production de connaissances scientifiques sont un levier fort : elles permettent « l'encapacitation » de la population à travers une meilleure connaissance des enjeux environnementaux et une réappropriation de la démarche scientifique<sup>42</sup>.

Le développement technologique d'une nouvelle gamme d'instruments miniaturisés et nomades (qu'on désigne sous le terme de microcapteurs) permet désormais la mesure indicative de la pollution par tout à chacun, ou a minima par une population technophile. La « captologie citoyenne », tel que définie par L. Allard (2015)<sup>43</sup> ou « la production de ses propres outils de captation et l'interprétation de ses propres données » incite le citoyen sans le contraindre à agir et à adapter ses pratiques en faveur de son environnement. Ce champ de recherche émergent se situe à la croisée de plusieurs disciplines sociologiques. Cependant, il pose aussi (i) de nouveaux défis technologiques quant à la mise à disposition des données, à la fiabilisation et à la vulgarisation de la mesure ; (ii) de nouvelles questions sur l'impact sociétal de ce type de projets alliant sciences et citoyens. Un travail de recherche alliant chercheurs en sciences dures et sciences humaines est indispensable pour répondre à ces enjeux.

Au périmètre de mon équipe, les premiers liens avec des chercheurs en sciences humaines ont été établis en 2007 dans le cadre de la création de l'IRENI (Institut de Recherches en ENvironnement Industriel), projet phare en ex-région Nord Pas-de-Calais du CPER 2007-2013. L'IRENI a alors fédéré sur un même site d'étude des recherches sur la qualité de l'air mais aussi sur les impacts sanitaires, socio-économiques et juridiques induits. En 2017, ces échanges se sont prolongés par un projet partenarial public-privé, VEIL'Air (Développement et validation d'un système multi-capteurs pour l'évaluation de l'exposition individuelle aux polluants de l'air) impliquant le CERI EE, le laboratoire de sciences humaines TVES (Université du Littoral Côte d'Opale), et la start-up CozyAir. C'est alors que le premier projet « CASPA » (CApteurs et Sciences PARTicipative) de l'équipe a été lancé, avec des objectifs centrés sur l'enjeu de la pollution atmosphérique et sur le potentiel émergent des micro-capteurs à modifier les perceptions et inciter au changement de comportement.

En 2019, bénéficiant de l'expérience de mes collègues, j'ai étendu ces approches au domaine de la QAI. J'étais alors forte du constat que les projets CASPA avaient fait leurs preuves pour l'amélioration des connaissances des perceptions citoyennes et des comportements vis à vis de la qualité de l'air<sup>44</sup>. La mesure individuelle a un potentiel certain pour mettre en lumière des pratiques polluantes et peut être un des moyens clés de sensibilisation. Malgré cela, seulement 18% des projets CASPA recensés dans la littérature internationale en 2019 intégraient la QAI dans leur périmètre<sup>45</sup>. J'ai alors proposé (et coordonné) le projet QALIPSO (Qualité de l'Air dans les Logements Individuels et analyse Psycho-Sociologique du comportement des Occupants) dans le cadre de l'APR ADEME DIQACC (Données individuelles de la qualité de l'air et changement de comportements). Le projet QALIPSO est entièrement centré sur les environnements intérieurs, et plus particulièrement les logements. Il associe des compétences en sociologie apportées par Atmo Hauts de France, en métrologie des micro-capteurs (compétences développées au CERI EE depuis de nombreuses années et renforcées dans le cadre des travaux demandés par le LCSQA), ainsi qu'en sciences de la donnée (domaine nouvellement abordé au CERI EE). Sur ce projet, je coordonne les différentes parties et j'apporte la connaissance technique des sources d'émission en lien avec la métrologie capteurs. Je peux ainsi orienter par ma connaissance des enjeux globaux de la QAI les approches sociologiques et le traitement intelligent des données massives.

L'objectif général du projet QALIPSO est de définir l'accompagnement nécessaire à une famille pour la mise à disposition d'une station de mesure de la qualité de l'air intérieur en vue d'identifier et de réduire les sources de



pollution de son logement. Cet objectif général se scinde en deux sous-objectifs distincts abordant d'une part la question des déterminants des impacts sur le changement de comportement (i.e. définir quelles modalités d'accompagnement, il est nécessaire d'adjoindre à une donnée de qualité de l'air pour induire chez l'utilisateur lambda un changement de comportement) et d'autre part les leviers d'actions pour mobiliser des populations moins volontaires (i.e. étudier l'apport de la mise à disposition d'un objet numérique pour sensibiliser les populations défavorisées à la question de la qualité de l'air intérieur et mettre à l'épreuve un accompagnement personnalisé).

*Le projet QALIPSO pose des questions sur trois plans distincts :*

- (i) Sur le volet métrologique : Les performances des stations de mesures destinées aux environnements intérieurs sont-elles suffisantes pour fournir une mesure indicative du niveau de pollution dans les logements ? Permettent-elles la discrimination des sources ?*
- (ii) Sur le volet sociologique : Comment aider les occupants d'un bâtiment à agir dans leur environnement domestique pour moins s'exposer aux pollutions ? Comment les accompagner dans l'intégration d'une station de mesure ?*
- (iii) Sur le volet des données massives : Comment utiliser et interpréter les données produites par les stations ? Peut-on distinguer des signatures de pollution ? Des indicateurs de changement de comportements ? Sont-elles suffisantes pour la création d'un indice QAI ?*

Quarante familles, recrutées sur le territoire de l'agglomération douaisienne, considérées comme défavorisées à la question de la qualité de l'air, ont été recrutées et équipées de stations microcapteurs pendant une période de 4 mois (Nov 2019 – Mars 2020). Les participants ont été répartis selon 4 groupes et accompagnés de manière différenciée : (i) Groupe 1 - chaque logement s'est vu remettre à l'installation de la station de surveillance, un support d'information précisant les origines de la pollution intérieure ; (ii) Groupe 2 - chaque logement a reçu la visite d'une conseillère en environnement intérieur (CEI); celle-ci a réalisé un diagnostic personnalisé du logement, avec ses occupants, en repérant avec eux les éventuelles sources de pollution; (iii) Groupe 3 - les interactions/échanges entre les expérimentateurs de ce groupe ont été facilités par une plateforme d'échanges pour partager leurs expériences, leurs observations et les solutions testées ; (iv) Groupe 4- aucun accompagnement n'a été proposé à ce groupe ; la station a été installée dans les logements sans diffuser d'information aux occupants, autres que des recommandations techniques.

Au-delà du consortium réuni pour le projet et de mes collègues impliqués dans le projet, j'ai pu m'appuyer :

- pour le volet métrologique sur David UMBA KALALA, doctorant co-financé par l'ADEME et la région Hauts de France ; il travaille sur le sujet de thèse QOUSTO (Qualification d'Outils nUmériques pour une Surveillance personnalisée et citoyenne de l'expOsition aux polluants de l'air)
- ainsi que sur Abdelrahman EID, post-doctorant, data scientist, recruté dans le cadre du projet pour exploiter la base de données massives. Les résultats disponibles à ce jour concernent le volet métrologique ainsi que le volet sociologique.

**Elaboration d'un protocole d'évaluation des performances des stations de mesures destinées à la surveillance de la QAI.** Une station disponible commercialement a été choisie afin d'équiper les familles participantes au projet QALIPSO. Un cahier des charges précis a été élaboré afin de définir les polluants cibles mais également les contraintes en termes d'interactions possibles entre la station et son utilisateur (indicateur lumineux, plateforme de mise à disposition des données). Les COV faisaient bien évidemment partis des polluants hautement prioritaires pour ce projet ; la station choisie comportait donc 5 capteurs distincts sensibles aux COV : 1 capteur électrochimique et 4 capteurs à oxydes métalliques. Les informations sur les performances de ces capteurs sont peu nombreuses, et afin d'interpréter correctement les données collectées dans le cadre du projet, il a été nécessaire d'effectuer un état des lieux métrologique des capteurs en amont et en aval de leur déploiement. Le défi était de taille puisqu'il fallait procéder à l'évaluation simultanée de 45 stations, soumis à des niveaux de COV variés, aux concentrations variables.

Les objectifs étaient multiples : (i) évaluer la reproductibilité entre systèmes ; (ii) évaluer la sensibilité à différentes familles de COV représentatives des différentes sources susceptibles d'être émises dans les habitations ; (iii) évaluer l'impact des conditions environnementales que sont la température et l'humidité

relative sur le comportement des capteurs ; (iv) évaluer les dérives et/ou vieillissement de chaque référence de capteur avant et après déploiement.

Ce défi technique a été rendu possible par l'utilisation de la pièce IRINA telle que décrite dans la section précédente qui a accueilli les 45 systèmes et a permis leur exposition à des déclins de concentrations (200 – 20 ppb) pour 5 COV cibles de l'air intérieur (toluène, limonène, acétone, éthanol, formaldéhyde) générés indépendamment et en mélange. Les déclins de concentrations ont été caractérisés par un spectromètre de masse (SIFT-MS) et comparés aux signaux collectés par les 5 capteurs. **Cette approche tout à fait originale de par le nombre de stations considérées ainsi que par les espèces sélectionnées** a permis d'aboutir entre autres à l'établissement de roses de sensibilités présentées par la Figure 2- 13. En outre, et par-delà même de cette qualification métrologique dont le protocole et les résultats originaux font l'objet d'un article en préparation, on peut en tirer des informations essentielles à considérer lorsque l'on veut utiliser cette station microcapteurs en air intérieur :

- la sensibilité du capteur électrochimique n'est pas équivalente d'un COV à un autre, et le signal qu'il renvoie ne peut donc être considéré comme un indicateur quantitatif d'exposition fiable au regard des concentrations totales en COV présents dans l'air intérieur ; il est probable qu'il soit plus sensible à certaines sources qu'à d'autres et qu'il en néglige certaines ;
- la réponse des capteurs à oxydes métalliques n'est pas linéaire à la concentration en COV à laquelle ils sont exposés ; les sensibilités sont différentes d'un type de capteur à un autre, et d'un type de COV à un autre. En revanche, les sensibilités ne sont pas suffisamment différentes pour considérer la sélection de ces 4 capteurs comme capable de discriminer les sources de pollution.

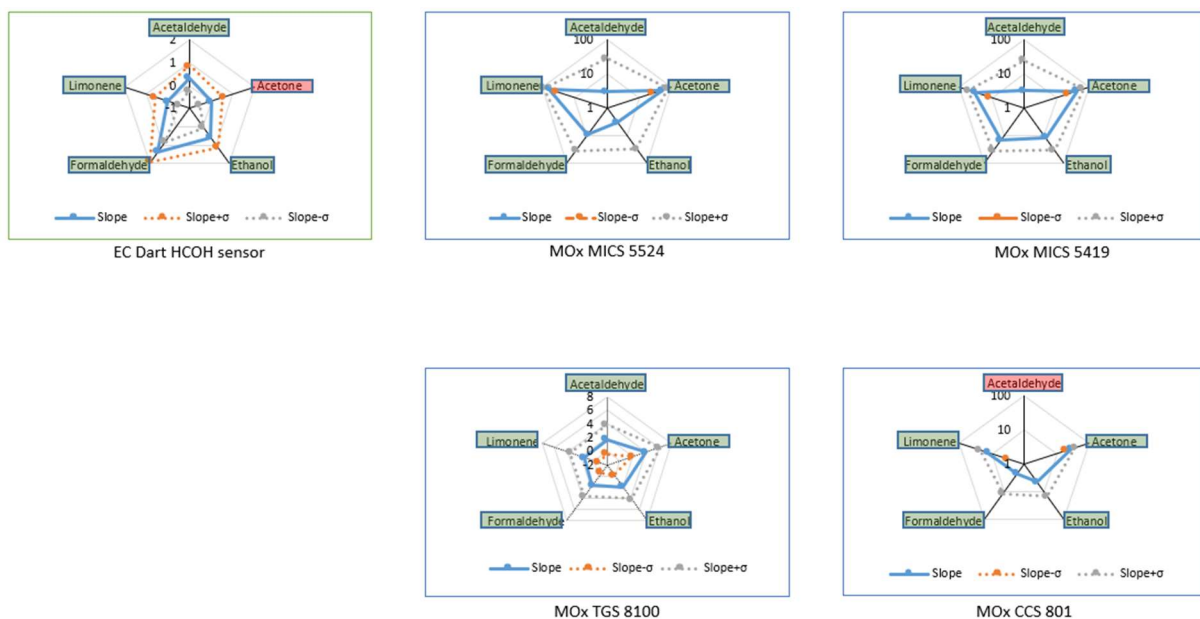


Figure 2- 13 Rose de sensibilités des 5 capteurs équipant la station de surveillance de la QAI sélectionnée pour le projet QALIPSO. Les traits pleins indiquent la sensibilité de chaque capteur : électrochimique (EC Dart HCHO sensor) et à oxydes métalliques (Mox) ; les traits en pointillés indiquent la variance de sensibilités entre les 45 systèmes considérés.

La synthèse de ces résultats offre un éclairage essentiel à l'interprétation des données collectées lors des expérimentations terrain et s'avère absolument nécessaire avant chaque déploiement. D'autre part, elle permet de faire évoluer les technologies, en partenariat avec les concepteurs de ces stations trop peu souvent équipés de dispositifs de qualification.

**Analyse psychosociologique du changement de comportement.** Après synthèse des 80 entretiens menés en tête à tête en amont et en aval du déploiement des stations microcapteurs, il est confirmé que l'accès à une donnée individualisée et en temps réel a permis aux participants d'acquérir de nouvelles connaissances vis-à-vis de la qualité de l'air intérieur. Elle a permis une identification plus complète des sources de pollution au sein des logements. A ce titre, la station a été perçue comme un bon outil de sensibilisation, ludique et pédagogique.



Les expérimentateurs du projet QALIPSO estiment majoritairement avoir été rassurés sur la qualité de l'air à l'intérieur de leurs logements, qu'ils estimaient, a priori, moins bonne. A noter cependant, dans le cas où l'utilisateur n'arrive pas à mettre en lien l'évolution de la donnée avec une potentielle source de pollution, la mesure devient source de stress et d'anxiété. Une large majorité des participants du projet estime avoir fait évoluer ses comportements et souhaite persister dans cette voie. Alors que la station semble avoir eu un impact modéré sur les comportements de réduction des émissions au sein des logements des participants (habitudes de ménage, choix des produits d'entretiens et parfums d'ambiance principalement), il apparaît qu'elle ait eu une forte influence sur les pratiques visant à la réduction de leur exposition grâce à une modification des pratiques d'aération (meilleure appréciation des effets de l'aération et adoption de nouvelles stratégies).

En termes d'accompagnement, la plaquette d'information et la visite ont été les accompagnements les plus plébiscités et ceux qui se détachent le plus en termes d'informations délivrées et de comportements adoptés pour améliorer l'air dans les logements. La visite de la conseillère en environnement intérieur a été saluée pour son aspect individualisé et personnalisé. Elle permet d'atteindre systématiquement l'individu en lui dispensant une information correspondant à ses besoins et ses contraintes. Cependant, elle ne lui a pas fourni d'informations lui permettant d'interpréter les résultats (ce qui a été regretté).

**Analyse statistique avancée des données massives de pollution de l'air intérieur.** L'analyse fouillée des données par des méthodes statistiques avancées (analyse supervisée, clustering...), a été menée sur l'année 2021. Différentes pistes méthodologiques ont été investiguées afin de mettre en évidence des profils de sources, des profils d'utilisateurs, des indicateurs de changement de comportement. L'aboutissement de ces méthodologies vers des résultats exploitables a été un travail de longue haleine. En effet, la première étape du travail, et non loin d'être négligeable, a été d'instaurer un dialogue entre notre équipe de physico-chimistes et data scientist afin d'établir la démarche scientifique.

L'application des méthodologies de statistiques avancées aux données de pollution massive issues de la métrologie microcapteurs est tout à fait originale. Elle ouvre de nouvelles perspectives et nous fait porter un nouveau regard sur les données dont nous disposons. La synthèse de ces résultats récemment obtenus est attendue dans les prochains mois et n'est pas traitée dans ce manuscrit. Dans les prochains mois, il s'agira pour moi sur ce projet QALIPSO que je coordonne d'assurer la mise en perspective des résultats issus du traitement statistique des données avec les conclusions émanant sur le plan sociologique.

Par ailleurs, un autre projet CASPA est en cours au sein de l'équipe. Il s'agit du projet CERb'AIR, dont les résultats sont en cours d'acquisition. Ce projet propose un démonstrateur sur plusieurs dizaines d'individus de la potentialité du changement de comportement associé à l'utilisation d'un système d'évaluation en temps réel de l'exposition aux polluants de l'air. Ce projet porte sur les 2 compartiments de l'air (air ambiant / air intérieur) et bénéficiera sur le plan méthodologique des apports des projets QALIPSO et VEILAIR.

Que retenir ?

**Les projets CASPA sont véritablement des leviers pour la prise de conscience de la population vis-à-vis des enjeux environnementaux. Cela se vérifie également pour les enjeux liés à la QAI, pour laquelle les actions à mettre en œuvre sont circonscrites au cercle personnel et familial, à la différence des actions collectives à élaborer en faveur de l'amélioration de la pollution atmosphérique.**

**L'essor technologique des micro-capteurs est un élément de contexte favorisant l'expertise citoyenne. Le rôle des physico-chimistes de l'atmosphère doit résider non seulement dans la caractérisation des systèmes de mesures, dans l'encadrement de leur bon usage en vue d'effectuer des mesures de niveaux de pollution mais aussi dans l'interprétation des données massives produites par ces objets qui ne sont que trop peu exploitées encore.**

**Au-delà de leur intérêt sociologique, les projets CASPA sont les briques de construction d'un futur indice de qualité de l'air intérieur, qui sera forcément issu d'une mesure indicative par ces systèmes émergents. La sélection de capteurs intégrés dans les stations de mesure a un impact majeur. La fiabilité des systèmes n'est pour l'instant pas suffisante et pourtant l'information est d'ores et déjà dans les mains du grand public.**

**Un travail collaboratif entre sociologues, métrologues et experts de la donnée doit pouvoir répondre à l'enjeu de la mise à disposition des informations issues des stations de surveillance de la QAI.**

Article en écriture | Umba Kalala, D., N. Redon, M. Verrielle, S. Crunaire, N. Locoge, Characterizing multi sensor platforms performance to investigate indoor air quality events

#### Valorisation

Rapport à paraître en 2022 | ADEME. Verrielle, M., Redon, N., Crunaire, S., Roussel, L., Dion, V.,. (2022). Projet QALIPSO : Qualité de l'Air dans les Logements Individuels et analyse Psycho-Sociologique du comportement des Occupants– Rapport



## DANS LE VISEUR

Le bilan de mes activités me permet de me projeter vers des perspectives à court, moyen et long terme pour répondre à la question scientifique majeure que je souhaite poursuivre :

Comment mieux renseigner l'exposition des occupants aux polluants de l'air intérieur et identifier les leviers pour la réduire dans un contexte de transition écologique et de changement climatique ?

De cette question, émanent plusieurs sous-sujets tels que :

- Quel est le rôle de l'occupant : en tant que source et puits de polluant mais également en tant qu'acteur de changement et levier pour l'amélioration de la qualité de l'air ?
- Comment apporter une réponse qui tient compte de l'ensemble des dimensions de la QEI ? Ou comment passer d'une approche multidisciplinaire à une réponse interdisciplinaire ?

A court terme (3 ans), les projets CERb'AIR, Q-WaSH, CELLUL'AIR, les thèses ILINQA, QOUSTO et INDEX déjà engagés contribueront à répondre à cette question et enrichiront plus encore les axes de développements métrologiques, connaissances des déterminants de la QAI et remédiation à la pollution (Figure 2- 14). Ces projets reposent sur les compétences distinctives du CERI EE et sont menées avec des partenaires historiques.

A moyen terme, je souhaite développer un nouvel axe, centré sur Confort et Qualité de l'Air en environnement intérieur : interactions climat - bâtiment - occupant. Pour cela, je compte développer en interne les interactions avec mes collègues de l'entité ECSP (Efficacité Énergétique des Composants, Systèmes et Procédés) intégrée au CERI EE depuis 2019 mais aussi des partenaires internationaux complémentaires.

### Renforcement des axes Métrologie / Compréhension des déterminants / Remédiation à la pollution.

① & ② Sur le volet métrologique et la connaissance des déterminants, le projet de thèse ILINQA, ainsi que le projet Q-WaSH initiés en 2020 renseigneront (i) la contribution des émissions liées aux produits ménagers aux concentrations intérieures en formaldéhyde ; (ii) et les émissions de COV et d'eau liées au séchage du linge. Ils se placent dans la continuité du projet ESSENTIEL, et reposent sur des méthodologies de caractérisation à échelle réelle qui ont été développées dans ce projet. Renseigner les sources de polluants associées aux pratiques et aux choix de consommation des occupants nécessite des développements métrologiques spécifiques. Le projet ILINQA inclura le développement d'une méthode pour doser les libérateurs de formaldéhyde dans les produits ménagers, et renseigner leur dégradation au cours de leur période d'utilisation. Aussi, un protocole spécifique sera mis en œuvre pour évaluer les cinétiques d'émission du formaldéhyde au cours d'une action de nettoyage réelle.

Ce savoir-faire expérimental est un point distinctif de l'équipe sur le plan national mais également international. Les données que produise ce type d'approches sont particulièrement précieuses pour la communauté des chercheurs qui travaillent sur la QAI. Les agences d'évaluation du risque sanitaire nationales et internationales intégreront les taux d'émission évalués dans des conditions réelles dans les modèles d'évaluation des risques sanitaires liées à l'activité domestique. Les physico-chimistes et modélisateurs spécialistes de la réactivité de l'air intérieur sont en demande (i) de données représentatives pour alimenter les modèles de chimie de l'air intérieur mais également (ii) de mesures en milieu contrôlé pour comparer aux données de sortie. Des contacts ont été pris sur ce volet avec l'Université de York (équipe de Nicolas Carslow et Terry Dillon) ; un accueil de post-doctorant yorkais permettra d'inclure les données produites dans le projet ESSENTIEL au modèle OD INCHEM-Py qui inclut un mécanisme de chimie détaillé<sup>46</sup>. Cette collaboration sera potentiellement poursuivie en proposant le même type d'approche que les projets ESSENTIEL, Q-WASH et ILINQA mais qui concerneront des activités de cuisson ou de désinfections de surface avec des agents bactéricides (contexte COVID). Cela impliquera donc de renforcer encore les moyens métrologiques pour renseigner dans IRINA la fraction particulaire.

Par ailleurs sur la base des méthodologies expérimentales développées dans la thèse de Raphaël Brun et des connaissances acquises par mes collègues du CERI EE sur les émissions de COV par les matériaux bio-sourcés,

l'équipe envisage de développer un projet ou ensemble de projets centrés sur l'impact des éco-matériaux, particulièrement les bétons bio-sourcés, sur les environnements intérieurs. Les bétons bio-sourcés, en répondant aux exigences de préservation des ressources et de développement durable, sont de bons candidats pour les bâtiments du futur. La question de l'innocuité de leurs émissions ainsi que de leurs impacts olfactifs sur la qualité de l'air intérieur est traitée actuellement dans le projet CELLUL'AIR. Ce projet est soutenu financièrement en interne par IMT Nord Europe, et mené en partenariat avec le CERI Matériaux et Procédés qui produit et caractérise ces bétons du point de vue structural. Par ailleurs, leurs propriétés morphologiques et leurs compositions en font des matériaux « puits », capables d'absorber et de restituer de grandes quantités d'eau en fonction des conditions environnementales auxquelles ils sont soumis. Ils agissent donc comme des régulateurs d'humidité. Malgré des échelles de concentrations moindres, le même processus d'échange a lieu avec ces matériaux pour les COV. Les bétons pourraient alors être envisagés aussi comme des régulateurs de pollution et potentiellement limiter les teneurs en polluants. Ces hypothèses ont besoin d'être investiguées, et l'Université Jules Verne qui travaille sur les transferts hydriques au sein de ce type de matériaux, à des échelles réelles, constitue un partenaire de choix. Un projet ANR JCJC a été déposé en 2020, retenu en liste complémentaire et nous sommes donc en attente du financement de cet axe de travail.

Ces projets s'intègrent à la jonction des axes de recherche qui concerne les déterminants de la QAI et les solutions de remédiation, mais les sujets devront être soutenus par des développements métrologiques innovants et éprouvés.

⑤ Sur l'axe « remédiation à la pollution » vu du côté des sciences participatives, l'enjeu à court terme est d'identifier des méthodes statistiques pertinentes pour le traitement de données massives afin d'extraire l'information des campagnes ayant recours à de la métrologie microcapteurs. Les bases de données produites par le déploiement de microcapteurs nécessitent d'être segmentées pour déterminer des séquences cloisonnées dans le temps et dans l'espace et donc discriminer des environnements et des périodes temporelles à haut risque d'exposition. Il s'agit aussi de développer des algorithmes permettant l'identification de séquences de pollution récurrentes aux différentes typologies d'environnement : extérieur vs intérieur, intra et inter-logements, modes de transport, etc. Plusieurs typologies ou signatures de pollution devraient émerger de cette analyse, à nous de leur donner une signification physique au regard des modes de vie et des types de polluants auxquels on identifie qu'un individu aura été soumis. Dans un second temps, en conservant des méthodes de traitement de données plus classiques (traitement statistique des dépassements de seuils, établissement de profils temporels indicatifs de pollution), des paramètres tels que la fréquence de pics de pollution, leurs seuils minimaux et maximaux, la durée des épisodes, sont à tester en tant qu'indicateurs potentiels d'observation du changement de comportement. La mise en regard de l'exploitation de ces données avec les observations qualitatives issues des approches sociologiques est alors l'étape ultime. Ce travail a été amorcé à travers les projets QALIPSO, CERb'AIR et la thèse QOUSTO.

Les attentes liées à l'établissement d'un indice d'exposition en environnement intérieur sont très fortes au périmètre national (PNSE 4) comme international. Cela était clairement intégré à l'appel à projet européen dans le cadre du call EN Horizon Europe Work Programme 2021-2022 4. Health. L'approche que nous voulons soutenir au CERI EE se distingue de ce qui peut être soutenu au niveau national par l'OQAI ou les AASQA qui veulent se rapprocher d'un indice basé sur des concentrations de polluants cibles, réglementés (benzène, formaldéhyde, CO<sub>2</sub>, ...) tel que aussi proposé par l'indice européen TAIL<sup>16</sup>. De notre point de vue, cette indice est difficilement accessible par une métrologie microcapteur et trop peu représentatif de la diversité des polluants et de la variabilité des concentrations en air intérieur. Il serait préférable de construire un indice permettant au-delà de la quantification de l'exposition à des polluants cibles, d'identifier à quelles sources spécifiques l'occupant est exposé. Il serait alors un index favorisant la prise de conscience de l'occupant, déclencheur d'un changement de comportement en faveur de l'amélioration de la qualité de l'air de son logement. Un tel index ne peut s'établir qu'en travaillant sur les caractéristiques intrinsèques des données issues des microcapteurs. A partir de 2022, sera initié un travail de thèse (INDEX) sur ce sujet, en partenariat avec Telecom Sud Paris. Les compétences mobilisées sur cette thèse seront principalement liées à la science des données, et il s'agira pour moi, en co-dirigeant la thèse, d'apporter ma connaissance des enjeux globaux liées à l'exposition aux polluants de l'air intérieur pour orienter les choix des travaux en cours.

Si Telecom Sud Paris est le partenaire que nous avons choisi pour travailler sur cette problématique, je veux également soutenir le recrutement au sein même du CERI EE d'Enseignant-Chercheurs en science de la donnée. C'est une demande émanant de plusieurs collègues des Groupes Thématiques QAI et Sources et Impacts. De mon point de vue, il s'agit d'apporter plus que des méthodes multidisciplinaires mais des réponses interdisciplinaires qui associent les savoirs et méthodes de la science de l'atmosphère et de la donnée pour résoudre les enjeux de la pollution de l'air. La définition d'un profil de poste pour le recrutement en 2022 d'un Enseignant Chercheur ou Ingénieur de recherche a été amorcé en 2021 ; démarche à laquelle j'ai contribué.

L'intégration au sein du CERI EE de *data scientists* au côté des spécialistes de la QAI est nécessaire pour apporter des réponses concrètes quant à l'auto-gestion de la QAI des logements par les citoyens. C'est une perspective que je nourrie à long terme de fédérer un groupe de chercheurs, de compétences diverses autour de cette question.

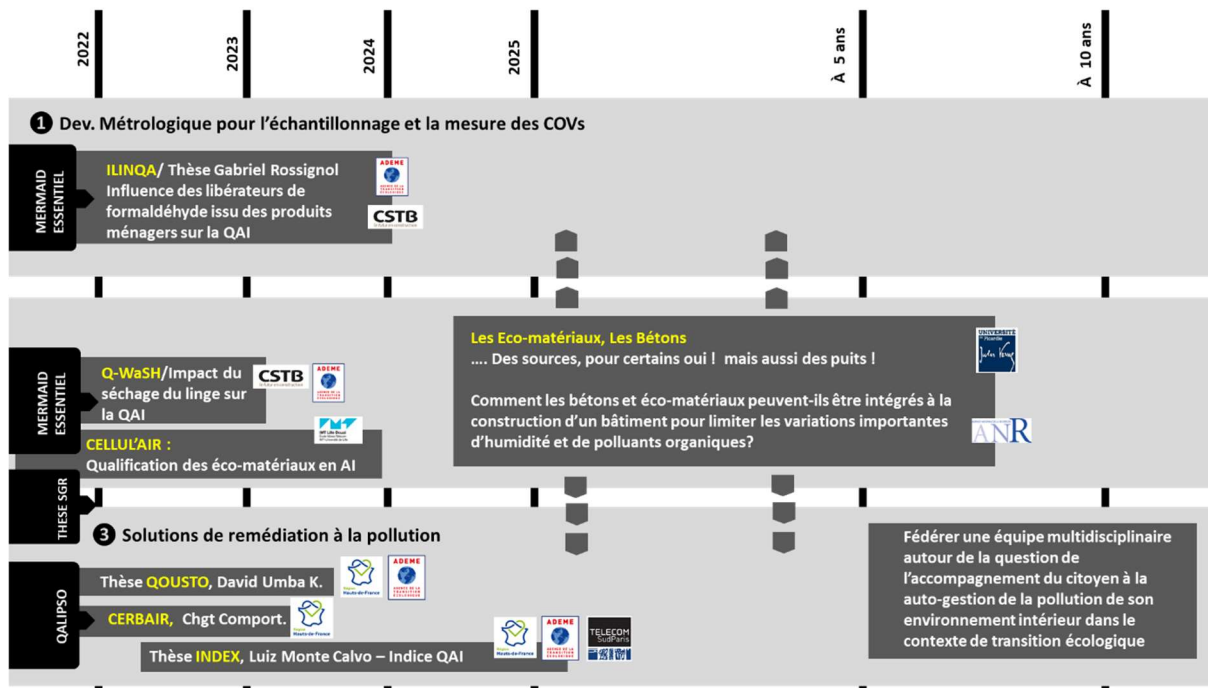


Figure 2- 14 Cartographie des perspectives à court, moyen et long terme sur les axes de recherche (1) développement météorologique, (2) compréhension des déterminants, et (3) solution de remédiation

**Confort et Qualité de l'Air en environnement intérieur : interactions climat - bâtiment - occupant.** Les projets ITAQ et ITAQ<sup>2</sup> couvrant la période 2019 -2023 ont initié les réflexions et les collaborations avec l'entité ECSP aboutissant au développement d'un outil de modélisation basé sur l'utilisation de codes CFD pour décrire les processus déterminants de la QAI à l'échelle de la pièce IRINA. Il a permis aussi de compléter l'équipement de la pièce expérimentale IRINA et d'un bâtiment démonstrateur à énergie positive (BE+) par une instrumentation mixte capables de renseigner à la fois les concentrations en polluants et les caractéristiques thermo-fluidiques. Aujourd'hui, ces développements sont soutenus par le recrutement d'un ingénieur Recherche & Développement qui sera en charge du pilotage de ce bâtiment, utilisé à la fois sur le volet Recherche mais également Enseignement.

Le nouvel axe de recherche que j'envisage de développer sera bâti sur un ensemble d'éléments cohérents couvrant mes activités de recherche et d'enseignement :

❶ Le dépôt conjoint d'un projet ANR et d'un projet Horizon Europe, à mener sur 4 ans, permettant (i) d'affirmer ma position de coordinatrice de projet, (ii) de renforcer la structure du Groupe Thématique « QAI » et de rassembler les compétences du CERI en physico-chimie des atmosphères et modélisation, optimisation des échanges thermiques et fluidiques ; mais aussi (iii) de confirmer les partenariats nationaux académiques et industrielles (CSTB – SGR – Véolia) sur ce nouvel axe et d'initier de nouvelles collaborations internationales.

Je me tourne d'abord vers l'Université de Bucarest avec qui des contacts ont d'ores et déjà été pris (dépôt ANR JCJC en 2020). Un premier cofinancement de thèse est envisagé à court terme pour travailler ensemble à la construction d'un mannequin multi-influencé. Or je souhaite aussi élargir ce consortium avec d'autres équipes complémentaires telles que l'Université de Anvers ou de Mons.

❷ Le périmètre des projets à déposer intègre le développement d'équipements innovants et mutuels (entre les 2 entités du CERI) incluant un mannequin thermique multi-instrumenté et une halle d'essai de très grand volume permettant d'accueillir des centrales de traitement d'air à l'échelle d'un bâtiment ;

## **DIMITRI** Development of a Multi-instrumented manikin to improve Thermal comfort and Reduce exposure to pollutants Indoor ❖ Pré-Projet

En vue d'améliorer la stratégie de ventilation des espaces intérieurs de grands volumes (type open-spaces, galeries marchandes, ...), interconnectée au confort thermique, à l'exposition aux polluants et à la consommation d'énergie, le projet DIMITRI propose de développer un mannequin multi-instrumenté conçu pour simuler le mécanisme de régulation thermique du corps humain et déterminer sa perte de chaleur vers l'environnement. De taille et de poids réels, équipé d'articulations, d'un système respiratoire intégré, recouvert d'une membrane élastomère d'isolation thermique semblable à la peau, le mannequin interagit thermiquement avec son environnement tel un humain. Au-delà des considérations thermiques, la conception avancée du mannequin proposé comportera aussi cinq zones équipées de capteurs pour évaluer l'exposition aux polluants à sa proximité ; ainsi qu'un système d'échantillonnage de l'air inhalé.

Par ailleurs, après validation métrologique, le mannequin pourra être mis en œuvre en pièces expérimentales échelle 1:1 pour acquérir des données massives et représentatives de divers scenarios faisant varier les conditions aérauliques et thermiques, en absence et présence de sources de pollution (liées au bâti, à l'ameublement, aux activités des occupants). Ces expérimentations permettront de renseigner l'influence de la présence des occupants dans une pièce de grand volume sur l'aéraulique de cet espace, le confort thermique et la distribution des COV pour une large gamme de scenario de ventilation et d'exposition.

Enfin, il sera question de réfléchir à l'inclusion de ces données massives pour la construction de modèles de simulation thermique, aéraulique et de transport des polluants à l'échelle d'une pièce de taille réelle. Les simulations numériques constituent la phase ultime du projet : (i) en renforçant les connaissances sur l'interaction occupant / environnement intérieur, en termes de pollution de l'air, thermique et aéraulique ; (ii) en constituant un guide de recommandations pour établir la stratégie de ventilation d'un espace de bureau.

*Les expérimentations échelle 1:1 en conditions contrôlées offre l'avantage, par rapport à des expérimentations à échelle réduite, de fournir des données réalistes et directement exploitables pour la validation de modèles numériques en développement. Ces modèles offrent ensuite une flexibilité et un potentiel supérieurs aux expérimentations, en permettant de varier les paramètres opérationnels de ventilation afin d'en étudier en détail l'influence sur les indicateurs de confort thermique et d'exposition aux polluants. Par ailleurs, le recours à des mannequins multi-instrumentés permettront des expériences tenant compte des interactions entre l'occupant et l'environnement intérieur sans avoir recours à la présence humaine et pouvant se répéter à long terme.*

# VALEntINE

Versatile And Large Experiment hall for Indoor Environment ❖ Pré-Projet

Ce pré-projet de développement de salle d'essai a été pensé pour s'insérer dans la construction d'une nouvelle antenne de l'IMT Nord Europe à Dunkerque, s'implantant à l'horizon 2025 sur le parc d'innovation d'EuraEnergies. Il permettra d'accueillir une salle d'essai de 50m<sup>2</sup>, avec une hauteur de plafond de 3,5m surmontée d'une plateforme analytique de 50m<sup>2</sup>. La plateforme intégrera de l'instrumentation pour la mesure des polluants de l'air et un banc d'essai à échelle réelle pour des Centrale de Traitement d'Air (production chaleur, froid, dépollution...).

Cette plateforme d'essais permettra de simuler des espaces de plus grand volumes qui sont équipés d'un système de ventilation mécanique. Il s'agit alors de s'éloigner des volumes caractéristiques des logements, naturellement ventilés (couverts par la plateforme IRINA) mais de se rapprocher d'espaces de bureaux, de salles de sport, espaces commerciaux, .... Elle sera complémentaire à un même type d'équipement qui voit actuellement le jour au sein de l'INRS, et qui vise principalement l'étude des moyens de prévention aux expositions professionnelles par la ventilation.

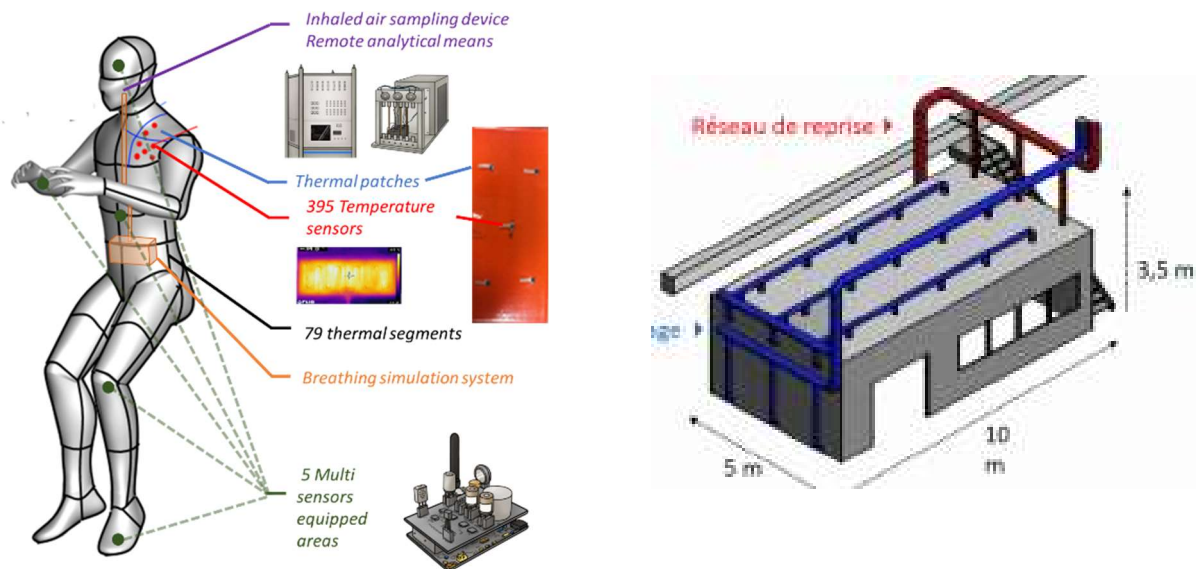


Figure 2- 15 Schémas fonctionnels des dispositifs expérimentaux innovants : DIMITRI (mannequin multi-instrumenté) et VALENTINE (Halle d'essai de grand volume)

③ L'accueil de professeurs invités internationaux, et notamment Ilinca NASTASE, professeure associée de l'Université Technique de Construction de Bucarest (UTCB). Elle coordonne le groupe de de recherche avancée sur le bâtiment CAMBI (Center for Ambient Quality and Building Physics) et ses domaines de recherche sont liés à la qualité de l'environnement intérieur et au confort thermique en particulier. Ses disciplines de spécialité sont la mécanique des fluides, et méthodes optiques de visualisations des flux.

④ L'élaboration d'un module de formation pour le Master d'ingénierie structurale des bâtiments de l'UTC Bucarest, en langue française. Il inclurait la sensibilisation des étudiants à l'exposition aux polluants dans les environnements intérieurs et au renforcement de leurs connaissances du lien entre les caractéristiques d'un bâtiment et de ses équipements avec son niveau de pollution intérieure.

⑤ Le renforcement de mon implication dans le cursus de formation des ingénieurs de spécialité « génie énergétique » de l'IMT Nord Europe en tant que tuteur pédagogique.



L'objectif à terme est de fédérer un consortium multidisciplinaire autour du CERI EE en vue de la conception du bâtiment du futur tenant compte de l'ensemble des composantes impactant la QEI.

La Figure 2- 16 complète la Figure 2- 15 en cartographiant les perspectives de recherche à court, moyen et long terme pour cet nouvel axe de recherche.

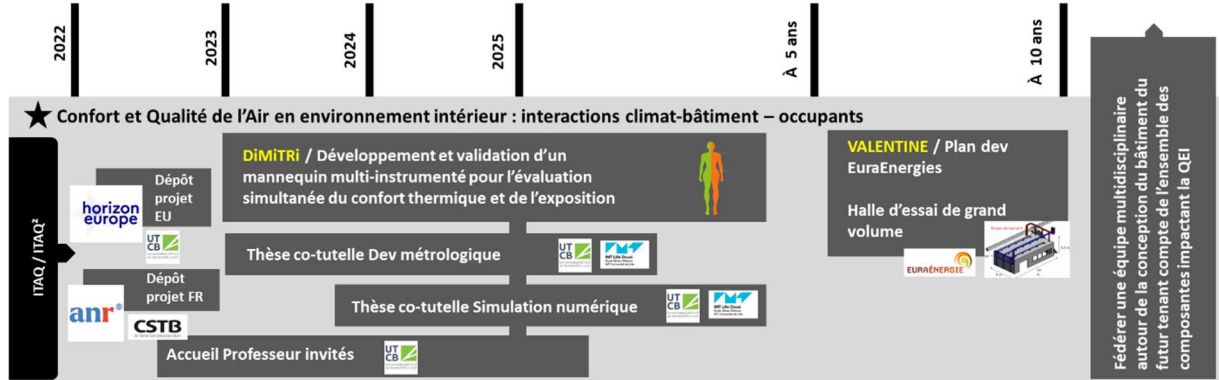


Figure 2- 16 : Développement d'un nouvel axe de recherche couvrant les interactions climat / bâtiment / occupant



- <sup>1</sup> Bulletin de l'OQAI N°3, L'OQAI a 10 ans, mars 2012
- <sup>2</sup> ADEME, Nada Saïdi, Marianne Planchon, Deloitte Développement Durable, Laurence Allard. 2017. Etude des liens entre données individuelles de la qualité de l'air, changements de comportement et mises en œuvre de pratiques favorables à l'air. Rapport. 102 pages
- <sup>3</sup> Takeshi Ohura, Takashi Amagai, Xueyou Shen, Shuang Li, Ping Zhang, Lizhong Zhu, Comparative study on indoor air quality in Japan and China: Characteristics of residential indoor and outdoor VOCs, *Atmospheric Environment*, Volume 43, Issue 40, 2009, Pages 6352-6359
- <sup>4</sup> Dimosthenis A. Sarigiannis, Spyros P. Karakitsios, Alberto Gotti, Ioannis L. Liakos, Athanasios Katsoyiannis, Exposure to major volatile organic compounds and carbonyls in European indoor environments and associated health risk, *Environment International*, Volume 37, Issue 4, 2011, Pages 743-765
- <sup>5</sup> . Walgraeve, K. Demeestere, J. Dewulf, K. Van Huffel, H. Van Langenhove, Diffusive sampling of 25 volatile organic compounds in indoor air: Uptake rate determination and application in Flemish homes for the elderly, *Atmospheric Environment*, Volume 45, Issue 32, 2011, Pages 5828-5836
- <sup>6</sup> Wonho Yang, Jongryeul Sohn, Jihwan Kim, Busoon Son, Jinchul Park, Indoor air quality investigation according to age of the school buildings in Korea, *Journal of Environmental Management*, Volume 90, Issue 1, 2009, Pages 348-354
- <sup>7</sup> Indoor Air Quality, United States Environmental Protection agency, <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq>
- <sup>8</sup> Residential indoor air quality guidelines, Canada, <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/air-quality/residential-indoor-air-quality-guidelines.html>
- <sup>9</sup> Valeurs Guides de qualité de l'Air Intérieur (VGAI), ANSES, France, [https://www.anses.fr/fr/content/valeurs-guides-de-qualit%C3%A9-d%E2%80%99air-int%C3%A9rieur-vgai#\\_ftn4](https://www.anses.fr/fr/content/valeurs-guides-de-qualit%C3%A9-d%E2%80%99air-int%C3%A9rieur-vgai#_ftn4)
- <sup>10</sup> The Finnish Indoor Air and Health Programme 2018–2028, Finlande, <https://thl.fi/en/web/thlfi-en/research-and-development/research-and-projects/the-finnish-indoor-air-and-health-programme-2018-2028>
- <sup>11</sup> Fromme, H., Debiak, M., Sagunski, H., Röhl, C., Kraft, M., Kolossa-Gehring, M. (2019), The German approach to regulate indoor air contaminants, *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 222 (3), pp. 347-354.
- <sup>12</sup> Arrêté du 19 avril 2011 relatif à l'étiquetage des produits de construction, de revêtement de mur et de sol, et des peintures et vernis
- <sup>13</sup> Décret n° 2017-946 du 10 mai 2017 relatif à l'étiquetage des produits désodorisants à combustion sur les informations de sécurité pour l'utilisateur
- <sup>14</sup> Mentese, S., et al. (2020). A long-term multi-parametric monitoring study: Indoor air quality (IAQ) and the sources of the pollutants, prevalence of sick building syndrome (SBS) symptoms, and respiratory health indicators. *Atmospheric Pollution Research*, 11(12), 2270-2281.
- <sup>15</sup> Plan National Santé-Environnement 4 (PNSE 4) : "un environnement, une santé" (2021-2025)
- <sup>16</sup> P. Wargocki, W. Wei, J. Bendžalová, C. Espigares-Correa, C. Gerard, O. Greslou, M. Rivallain, M. M. Sesana, B. W. Olesen, J. Zirngibl, C. Mandin, (2021) TAIL, a new scheme for rating indoor environmental quality in offices and hotels undergoing deep energy renovation (EU ALDREN project), *Energy and Buildings*, Volume 244, 111029
- <sup>17</sup> Décret n° 2021-1004 du 29 juillet 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine
- <sup>18</sup> S. Pyo, S. Lee, M. Kim, J. T. Kim, C. Yoo, (2014) Logistic Regression Based Multi-objective Optimization of IAQ Ventilation System Considering Healthy Risk and Ventilation Energy, *Energy Procedia*, Volume 62, Pages 583-589
- <sup>19</sup> R. Rawal, V.I Garg, S. Kumar, B. Adhvaryu, (2020) Evaluation of thermally activated furniture on thermal comfort and energy consumption: An experimental study, *Energy and Buildings*, Volume 223, 110154
- <sup>20</sup> Tang X., Misztal P.K., Nazaroff W.W., Goldstein A.H. (2016) Volatile Organic Compound Emissions from Humans Indoors. *Environ Sci Technol.*; 50(23):12686-12694
- <sup>21</sup> Clements-Croome, D.J., Awbi, H.B., Bako-Biro, Z., Kochhar, N. and Williams, M. (2008) Ventilation rates in schools, *Building and Environment*, **43**, 362-367.
- <sup>22</sup> Bako-Biro, Z., Clements-Croome, D.J., Kochhar, N., Awbi, H.B. and Williams, M.J. (2012) Ventilation rates in schools and pupils' performance, *Building and Environment*, **48**, 215-223.

- <sup>23</sup> Blondeau, P., Iordache, V., Poupard, O., Genin, D. and Allard, F. (2005) Relationship between outdoor and indoor air quality in eight French schools, *Indoor Air*, **15**, 2-12
- <sup>24</sup> Daisey, J.M., Angell, W.J. and Apte, M.G. (2003) Indoor air quality, ventilation and health symptoms in schools: an analysis of existing information, *Indoor Air*, **13**, 53-64.
- <sup>25</sup> De Blas, M., Navazo, M., Alonso, L., Durana, N., Gomez, M.C. and Iza, J. (2012) Simultaneous indoor and outdoor on-line hourly monitoring of atmospheric volatile organic compounds in an urban building. The role of inside and outside sources, *Science of the Total Environment*, **426**, 327-335.
- <sup>26</sup> De Gennaro, G., Farella, G., Marzocca, A., Mazzone, A. and Tutino, M. (2013) Indoor and outdoor monitoring of volatile organic compounds in school buildings: Indicators based on health risk assessment to single out critical issues, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **10**, 6273-6291.
- <sup>27</sup> Mishra, N., Bartsch, J., Ayoko, G.A., Salthammer, T. and Morawska, L. (2015) Volatile organic compounds: Characteristics, distribution and sources in urban schools, *Atmospheric Environment*, **106**, 485-491.
- <sup>28</sup> ADEME, Nicolas, M., Chiappini, L., D'Anna, L., et al. Activités domestiques et qualité de l'air intérieur : émissions, réactivité et produits secondaires. Rapport, 149 pages
- <sup>29</sup> Mendez, M., Blond, N., Blondeau, P., Schoemaeker, C., Hauglustaine, D. A., (2015), Assessment of the impact of oxidation processes on indoor air pollution using the new time-resolved INCA-Indoor model, *Atmospheric Environment*, Volume 122, Pages 521-530.
- <sup>30</sup> A., Mocho, P., Plaisance, H., Cantau, C., Kinadjian, C., Yrieix, C., Desauziers, V., Assessment of VOCs material/air exchanges of building products using the DOSEC®-SPME method, *Energy Procedia*, Volume 122, Pages 367-372.
- <sup>31</sup> G. Poulhet, S. Dusanter, S. Crunaire, N. Locoge, P. Kaluzny, P. Coddeville, (2015) Recent developments of passive samplers for measuring material emission rates: Toward simple tools to help improving indoor air quality, *Building and Environment*, Volume 93, Part 1, Pages 106-114.
- <sup>32</sup> Ghislain, M., Beigbeder, J., Plaisance, H., Desauziers, V., (2017), New sampling device for on-site measurement of SVOC gas-phase concentration at the emitting material surface. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 409 (12), pp.3199-3210.
- <sup>33</sup> ISO 16000-9 (2016), Air intérieur — Partie 9: Dosage de l'émission de composés organiques volatils de produits de construction et d'objets d'équipement — Méthode de la chambre d'essai d'émission.
- <sup>34</sup> ISO 16000-9 (2016), Air intérieur — Partie 9: Dosage de l'émission de composés organiques volatils de produits de construction et d'objets d'équipement — Méthode de la cellule d'essai d'émission.
- <sup>35</sup> Carslow, N. (2021) What does indoor air chemistry tell us about how to create a healthy indoor environment? Healthy Building Conference, Keynote
- <sup>36</sup> Ye, W., Zhang, X., Gao, J., Cao, G., Zhou, X., & Su, X. (2017). Indoor air pollutants, ventilation rate determinants and potential control strategies in Chinese dwellings : A literature review. *Science of The Total Environment*, 586, 696-729.
- <sup>37</sup> Cox, S. S., Liu, Z., Little, J. C., Howard-Reed, C., Nabinger, S. J., & Persily, A. (2010). Diffusion-controlled reference material for VOC emissions testing : Proof of concept. *Indoor Air*, 20(5), 424-433.
- <sup>38</sup> Yao, Y., Xiong, J., Liu, W., Mo, J., & Zhang, Y. (2011). Determination of the equivalent emission parameters of wood-based furniture by applying C-history method. *Atmospheric Environment*, 45(31), 5602-5611
- <sup>39</sup> Zhou, X., Liu, Y., & Liu, J. (2018). Alternately airtight/ventilated emission method : A universal experimental method for determining the VOC emission characteristic parameters of building materials. *Building and Environment*, 130, 179-189
- <sup>40</sup> P. Harb, V. Gaudion, L. Sivachandiran, F. Thevenet, N. Locoge, The 40 m<sup>3</sup> Innovative experimental Room for INdoor Air studies (IRINA): Development and validations *Chemical Engineering Journal*, 306 (2016) 568-578
- <sup>41</sup> Tichenor, B. A., et al. (1991). The Interaction of Vapour Phase Organic Compounds with Indoor Sinks. *Indoor air* **1**(1): 23-35.
- <sup>42</sup> Payan, S., Turcati, L., Hornung, J., (2020) Retours sur le colloque Capteurs et sciences participatives, *La Métrologie*, N°111, Pages 45-51.
- <sup>43</sup> Allard L., (2015), L'engagement du chercheur à l'heure de la fabrication numérique personnelle, *La Revue*, 73(3)
- <sup>44</sup> Hubbell, B. J. et al. (2018) Understanding social and behavioral drivers and impacts of air quality sensor use, *The Science of the total environment* 621: 886-894
- <sup>45</sup> ADEME, Saïdi. N., Planchon, M., Deloitte Développement Durable, Allard, L., (2017), Etude des liens entre données individuelles de la qualité de l'air, changements de comportement et mises en œuvre de pratiques favorables à l'air. Rapport. 102 pages
- <sup>46</sup> Shaw et al., (2021). INCHEM-Py: An open source Python box model for indoor air chemistry. *Journal of Open Source Software*, 6(63), 3224





*Après une introduction rappelant le cadre réglementaire et le cadre de gestion français et européen des nuisances olfactives, cette section décrit comment s’y intègrent les approches que j’ai développées à la fois sur un volet métrologique que sensoriel. Ces apports méthodologiques désormais solidement établis permettent d’envisager aujourd’hui des perspectives nouvelles qui sont détaillées dans le dernier paragraphe de ce chapitre.*

## Partie C

### Métrologie des COV odorants et analyse olfactive objectivée : une complémentarité d’approche pour la gestion des nuisances odorantes



DANS LE RETRO .....	82
CADRE REGLEMENTAIRE .....	82
CADRE DE GESTION DES NUISANCES AU NIVEAU NATIONAL ET EUROPEEN.....	82
 C-1. DEVELOPPEMENTS METROLOGIQUES POUR LA SURVEILLANCE DES COMPOSES ODORANTS DANS L'AIR AMBIANT ET LES ATMOSPHERES CONFINEES.....	85
DEVELOPPEMENTS ET VALIDATION METROLOGIQUE POUR L'IDENTIFICATION DES COMPOSES RESPONSABLES DES NUISANCES OLFACTIVES DANS UN HABITACLE DE VEHICULE.....	86
DEVELOPPEMENTS ET VALIDATION METROLOGIQUE POUR LA SURVEILLANCE DES COMPOSES SOUFRES DANS L'AIR AMBIANT ...	89
 C-2 LES APPORTS DE L'ANALYSE OLFRACTIVE OBJECTIVEE .....	93
CARACTERISATION DE LA NATURE ODORANTE PAR DES METHODES DE DESCRIPTION OBJECTIVEE.....	93
COMPREHENSION DES EFFETS DE MELANGE SUR LA NATURE ODORANTE .....	95
 DANS LE VISEUR .....	97
 REFERENCES .....	99
 <b>Listes des Figures et Tableaux</b>	
Figure 3- 1 Cadre de gestion des nuisances odorantes.....	83
Figure 3- 2 Performances des techniques de mesures pour les composés odorants.....	85
Figure 3- 3 Configuration d'un banc de prélèvement pour la collecte des COV émis par les pièces d'un habitacle automobile .....	87
Figure 3- 4 : Cercles de corrélation obtenus suite à une ACP croisant données de concentrations ambiantes dans un habitacle automobile et caractérisation olfactive. ....	88
Figure 3- 5 : Estimation de l'incertitude liée à la mesure de 6 composés soufrés par échantillonnage sur Sorbent Tube <sub>450</sub> et analyse par TD/GC/FPD. L'échantillon a été préalablement séché sur CaCl <sub>2</sub> et stocké à température ambiante ou au congélateur pendant 7 jours.....	90
Figure 3- 6 : Dynamique temporelle des concentrations en benzène, éthylbenzène, m,p-xylène, o-xylène, toluène, DMS et CS <sub>2</sub> observée dans la zone industrielle de Rouen en février 2017 .....	91
Figure 3- 7 : La démarche d'analyse olfactive pour la gestion des nuisances dans l'environnement : résumé graphique du contenu de l'article de review rédigé dans le cadre de la thèse de Charbel Hawko. ....	93
Figure 3- 8 : Profils olfactif établis selon la méthode du Champs des Odeurs® d'un habitacle automobile sous 3 conditions environnementales .....	94
Figure 3- 9: Représentation isochrone de la contribution à la note Pyrogénée des composés d'un mélange tertiaire (toluène, furfurylmercaptan, cyclopentanone) en fonction des proportions du mélange.....	95
Figure 3- 10 : Cartographie des Perspectives à court, moyen et long terme sur l'axe de recherche « apport de l'analyse olfactive objectivée dans la gestion des nuisances » .....	98
Tableau 3- 1 Performances analytiques (séparation et limites de détection) pour la mesure des amines dans un habitacle de véhicule ....	88
Tableau 3- 2 Concentrations typiques en composés soufrés observées lors de diverses campagnes de mesures sur des sites de typologie variable .....	89



## DANS LE RETRO

La pollution de l'air se constate d'abord par ses signes tangibles. Odeurs, poussières, fumées : un triptyque d'éléments perçus systématiquement et universellement constaté par tous ceux qui s'intéressent aux zones dites « à risque industriel »<sup>1</sup>. La cohabitation des riverains avec les industries ou les unités d'élevages est inévitable dans les pays les plus densément peuplés et les conflits, bien qu'anciens, sont plus que jamais d'actualité. Dans ces situations de nuisances, il n'est pas question uniquement d'identification de la cause (sources d'émissions) mais bel et bien de gérer un conflit dans un contexte sanitaire, social et politique complexe, où les acteurs sont nombreux et les effets directement perceptibles par les populations impactées.

Les situations de nuisances olfactives font référence à des cas où un écart est constaté entre la réalité odorante d'un environnement et l'odeur qui y est attendue<sup>2</sup>. L'état de nuisance varie en fonction (i) des facteurs psycho-socio-culturels de la population impactée – opinions sociales, expériences personnelles et souvenirs – (ii) le contexte spatio-temporel de la perception – fréquence, persistance, lieu, météo – (iii) les caractéristiques de la population – âge, sexe – (iv) et enfin les propriétés psychophysiques de l'odeur ressentie – concentration d'odeur, intensité, nature<sup>3,4</sup>.

**Cadre réglementaire/** Le cadre réglementaire peine à éliminer les nuisances, alors qu'on estime à 13-20% le taux de la population européenne incommodée par les nuisances olfactives (deuxième cause de plainte après le bruit).<sup>5</sup> L'état des connaissances sur les relations entre la quantité émise et la gêne ressentie est lacunaire, et la mesure et l'identification des polluants responsables restent des défis notables. Tant la détermination de la source (composés émis, débit d'émission), de la nature et de l'intensité de l'odeur résultante (odorité) que la caractérisation du milieu récepteur (population, topographie) sont requises<sup>6</sup>. Les différentes réglementations européennes incitent globalement à la prise en compte de la problématique « odeur » mais se réduisent pourtant dans les faits à certains secteurs d'activité seulement, ainsi qu'à la limitation quantitative des rejets à l'émission et au respect de valeurs limites en terme de concentration d'odeur dans le milieu récepteur. Pour la France, la réglementation des ICPE (Installations Classées pour la Protection de l'Environnement) oblige la prise en compte des odeurs dans les études d'impact à l'installation depuis 1996<sup>7</sup> et préconise des débits limites au-delà desquels une présomption de gêne peut apparaître depuis 1998<sup>8</sup>. L'olfactométrie dynamique est la technique largement privilégiée pour l'estimation de ces valeurs de concentrations d'odeur dont la mesure est normalisée par la norme EN 13725 (2003)<sup>9</sup>. Pour la France, ces valeurs limites sont fixées par les arrêtés ministériels de février 2003 pour le secteur d'équarrissage<sup>10</sup>, d'avril 2008 pour le secteur du compostage<sup>11</sup>, et enfin novembre 2009 pour le secteur de la méthanisation<sup>12</sup>. Aucun autre secteur d'activités industrielles n'est concerné par ce dispositif réglementaire français. Les seuils de tolérance varient grandement entre les différentes juridictions européennes et ne concernent pas forcément les mêmes secteurs d'activités<sup>13</sup>. Néanmoins, l'application de la directive européenne 2010/75/UE du Parlement européen par la parution des Meilleures Techniques Disponibles (Best Available Practices) qui incluent des plans de surveillance et de gestion des odeurs donne le cadre européen de prise en charge de la problématique « odeur » sur le territoire<sup>14</sup>. Dans le contexte des environnements intérieurs, le cadre réglementaire et normatif est inexistant ; la problématique est gérée au cas par cas et les démarches engagées pour gérer les situations de nuisances sont dépendantes des enjeux auxquels il faut faire face selon le type d'environnement intérieur fréquenté.

**Cadre de gestion des nuisances au niveau national et européen/** La récurrence des plaintes sur des zones souvent multi-influencées ou la survenue d'incidents d'industriels accentuent le besoin en France et en Europe d'une prise en charge globale de la problématique des nuisances olfactives. Le rapport d'activité 2020 d'Atmo France<sup>15</sup> mentionne l'identification d'un cadre de gestion national qui permettrait la prise en compte des plaintes incluant notamment la formation d'agents formés à l'analyse sensorielle et le développement et la diffusion de plate-

formes de collecte de plaintes. En Europe, le projet D-NOSES (Distributed Network for Odour Sensing)<sup>16</sup>, financé dans le cadre de l'appel à projet Horizon 2020, répond au besoin de fiabilisation de la mesure d'impact des odeurs, et ouvre la voie d'une réglementation plus pertinente et d'un observatoire international des odeurs. Le projet D-NOSES envisage, sur 10 zones pilotes (zones industrielles, milieu urbain, rural) des approches centrées sur le citoyen, partie prenante du débat, en l'aidant à la co-production de solutions satisfaisant toutes les parties prenantes (industriels, autorités, citoyens)<sup>17</sup>.

La revue de la littérature internationale fait apparaître 2 grands types de schémas (repris par la Figure 3-1) visant la limitation des nuisances mais aussi plus de résilience et d'acceptation de l'activité industrielle sur les territoires. Sur la base des revues de Capelli, et al. (2013)<sup>18</sup>, Conti, et al. (2020)<sup>19</sup> et Hawko, et al. (2021) se dégagent (i) une démarche descendante partant de la caractérisation des sources et visant l'estimation de l'exposition des populations (approche dite **Top-Down**), en complémentarité (ii) d'une démarche ascendante partant d'observations dans le milieu récepteur et visant l'identification des sources (approche dite **Bottom Up**). Ces deux approches s'alimentent mutuellement et ont recours tant à la mesure instrumentale et sensorielle qu'à de la modélisation. L'approche **Bottom Up** compte sur la participation citoyenne et la transparence des industriels ; elle repose sur la remontée des plaintes et la formation des riverains à la détection d'odeurs et à leur caractérisation en intensité, nature, impact (concentration d'odeur). L'approche **Top Down** en contre-point compte sur une caractérisation de la/les source(s) fiable pour établir (par mesure ou modélisation) la cartographie de la zone impactée et estimer l'exposition des riverains.

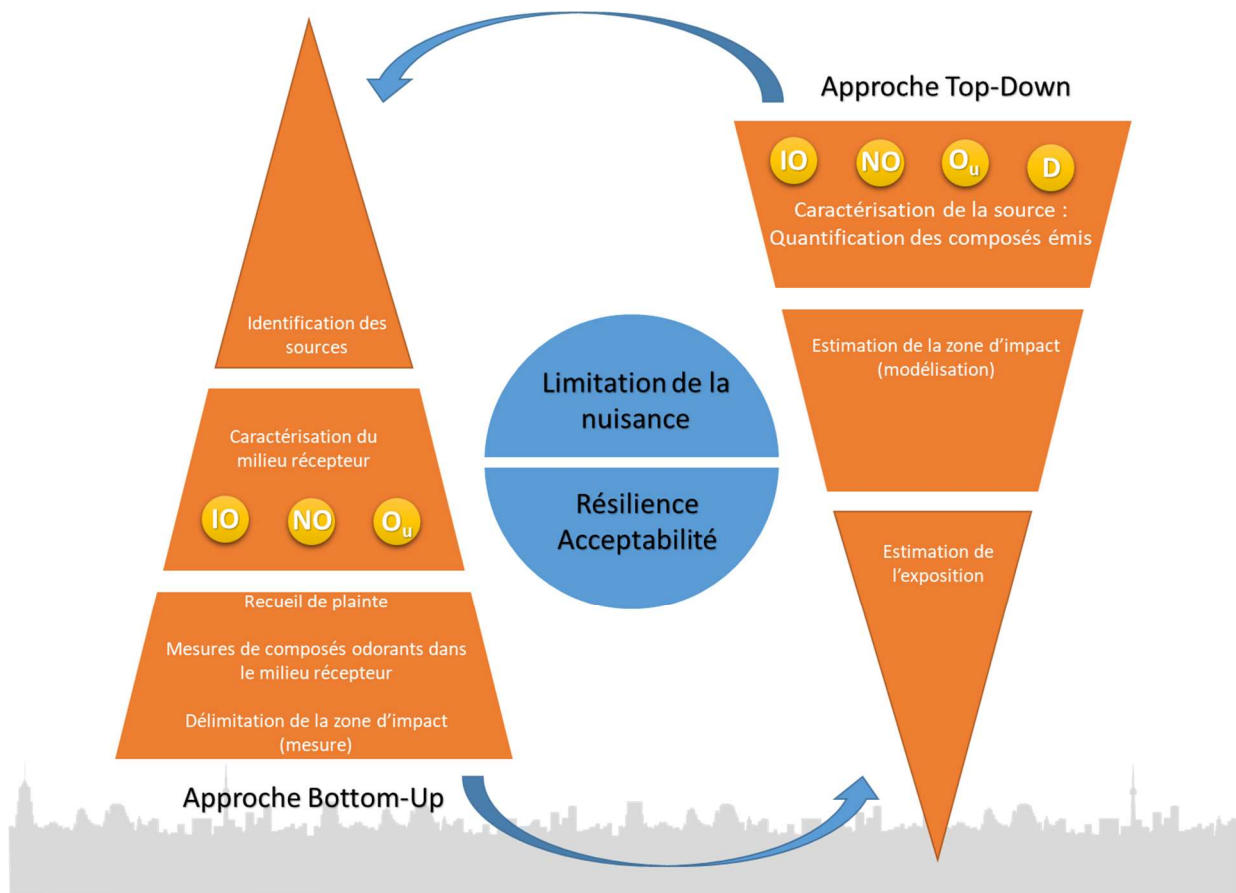


Figure 3- 1 Cadre de gestion des nuisances odorantes (IO : Intensité Odorante ; NO : Nature Odorante ; O<sub>u</sub> : Concentration d'odeur ; D : Débit d'émission)



**Dans le domaine des nuisances olfactives, les attentes vis-à-vis de la Recherche étaient pour ces 10 dernières années essentiellement méthodologiques. Résoudre la question du lien entre la quantité de polluants en présence, l'odeur perçue et la gêne ressentie tant sur le plan qualitatif que quantitatif devait passer par le renforcement des approches expérimentales et numériques. La communauté qui se préoccupe des odeurs environnementales a donc été très active pour fournir des méthodologies instrumentales et sensorielles fiables, répétables, objectives qui permettent de (i) mesurer les polluants odorants, (ii) caractériser les odeurs qualitativement et quantitativement, (iii) et estimer leur impact dans l'espace et dans le temps.**

**Ma contribution personnelle, qui sur ce volet a été initiée pendant ma thèse, l'a donc été sur ce plan méthodologique. En cohérence avec les axes de recherche poursuivis par l'équipe dans laquelle j'ai évolué, la métrologie des polluants odorants a été un point central. J'ai apporté par ailleurs mes compétences propres en terme de caractérisation sensorielle. Les approches favorisant le croisement des données sensorielles et instrumentales ont été privilégiées. Ces avancées ont été obtenues dans le cadre de 3 encadrements de thèses (Cécilia Merlen — Lorène Beauvais — Charbel Hawko), co-suppportés par des partenariats privés et publiques, industriels et académiques (TERA Environnement, PSA Group, Atmo Normandie, Université du Havre URCOM, La Communauté d'agglomération du Havre).**

**Sur cette base méthodologique, je me projette désormais vers des objectifs qui concernent (i) la compréhension du lien entre les émissions et les perceptions, mais également (ii) la prévision des nuisances et l'anticipation des risques liés à l'activité industrielle. Le projet DISCERNEZ, lauréat de l'APR Flash SIOMRI de l'ANR, débutant fin 2021, y sera consacré.**



## C-1. DEVELOPPEMENTS METROLOGIQUES POUR LA SURVEILLANCE DES COMPOSES ODORANTS DANS L'AIR AMBIANT ET LES ATMOSPHERES CONFINÉES

Si le cadre réglementaire des nuisances olfactives s'appuie plus majoritairement sur des méthodologies sensorielles, il s'avère que la mise en place de stratégie de réduction des émissions, et donc de limitation des nuisances, requiert l'identification et la quantification des substances à leur origine. Il faut rappeler la grande diversité chimique et la large gamme en terme de poids moléculaires (de la dizaine à plusieurs centaines de  $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ) qui caractérisent la famille des composés odorants. Ces derniers se distinguent souvent par la présence d'une fonction chimique ou d'une combinaison de fonctions, azotées, oxygénées, soufrées, de doubles liaisons C=C ou d'un cycle carboné ou hétérocycle. Ils sont très généralement émis à l'état de traces et cohabitent avec des espèces émis à des débits supérieurs de plusieurs ordres de grandeurs.

**Challenge métrologique/** En outre la complexité des mélanges gazeux odorants, la mesure doit faire face à d'autres obstacles liés à la dynamique d'émission des composés et à leurs propriétés réactives. (i) Les composés odorants sont émis par des sources canalisées ou des sources diffuses, et formés suite à des procédés industriels ou à des processus de dégradation intervenant parfois de manière ponctuelle. Ainsi ils sont potentiellement mesurables dans l'environnement mais de manière discontinue (bouffées) et avec une dynamique forte et aléatoire. (ii) De par leur structure chimique, les composés odorants observent souvent des propriétés réactives avec les oxydants de l'atmosphère ce qui leur confère une durée de vie parfois faible et variable en fonction des conditions météorologiques.

Au vu de ces trois paramètres (complexité, variabilité et réactivité), les méthodes d'analyse par chromatographie associée à des techniques de concentration de l'échantillon sont les plus pertinentes pour leur prélèvement et analyse. Un choix judicieux de support de prélèvement ainsi que de détecteur permet de rendre l'échantillonnage et l'analyse sélectifs vis-à-vis d'une catégorie cible de substances. Les techniques spectrométriques et spectroscopiques ainsi que celles utilisant la technologie micro-capteur ne répondent pas aux objectifs en terme d'identification et sont bien trop soumises aux interférences (humidité, autres COV). Néanmoins, la performance vis-à-vis des mélanges complexes de la chromatographie associée à la pré-concentration est contrebalancée par ses limitations en terme de résolution de mesure et de lourdeur de déploiement sur terrain (Figure 3-2). Il faut alors compter sur une analyse déportée du site de mesure, ce qui implique de s'assurer de l'intégrité et de la conservation du prélèvement.

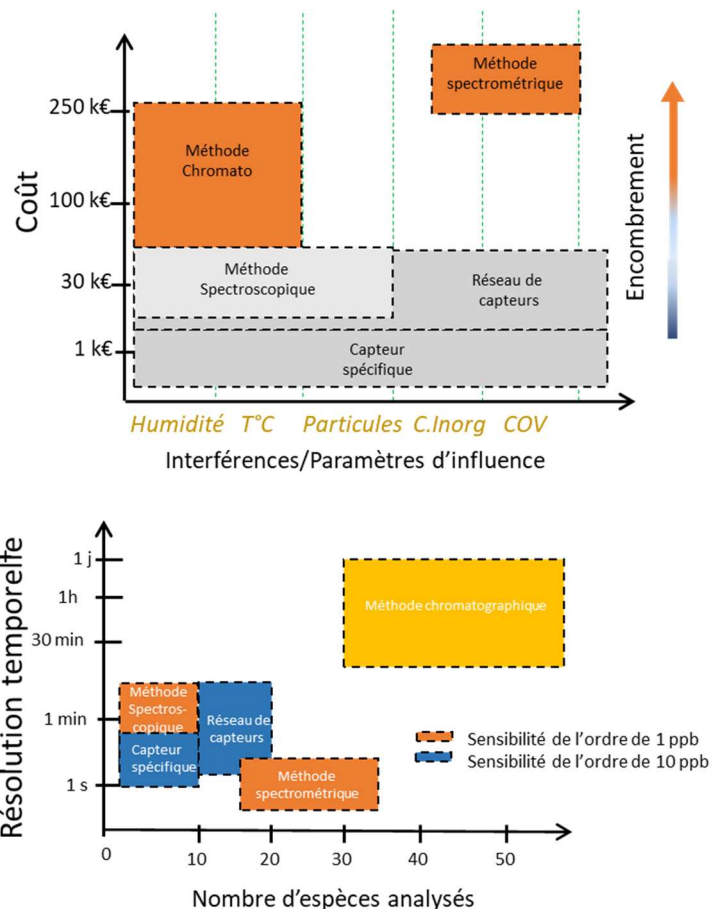


Figure 3-2 Performances des techniques de mesures pour les composés odorants

Le défi métrologique est donc de taille et la littérature est assez pauvre en terme de données de validation concernant leur échantillonnage, la conservation des échantillons, et leur analyse. Il est difficile ainsi de déterminer avec quelle incertitude de mesure les composés sont mesurés dans l'environnement mais aussi dans les espaces intérieurs. Ma contribution sur cet enjeu de mesure a principalement concerné 2 compartiments : (i) les habitacles de voiture, (ii) l'air ambiant, autour de zones industrielles, pour lesquelles la mesure des composés soufrés représente un intérêt majeur. Les résultats sur ces volets ont été obtenus dans le cadre ma thèse (soutenue en 2011), ainsi que lors des encadrements de thèse de Cécilia Merlen (soutenue en 2017) et Lorène Beauvais (soutenue en 2021).

**Développements et validation métrologique pour l'identification des composés responsables des nuisances olfactives dans un habitacle de véhicule/**

La question des émissions ainsi que de la diversité des polluants dans un habitacle de voiture a déjà été adressée dans la partie B précédente qui traite spécifiquement de la qualité de l'air dans les espaces confinés. Or, l'enjeu pour le secteur de l'automobile dépasse le volet sanitaire et même la question du confort. A l'état neuf, s'il s'agit d'abord de s'affranchir d'odeurs rédhibitoires pouvant être génératrices d'inconfort et de craintes pour l'utilisateur, l'atmosphère odorante d'un habitacle neuf est aussi un argument commercial et intègre l'image d'une marque. L'identification des composés contribuant à l'odeur de l'habitacle est donc de grande importance, elle n'en reste pas moins une tâche complexe au vue de la composition typique de l'air d'un habitacle automobile et de sa grande variabilité en fonction des conditions d'exposition variant sur une gamme large de température et d'humidité. La quasi-totalité des travaux publiés qui s'intéressent à la caractérisation des COV dans des habitacles automobiles optent pour une stratégie d'échantillonnage et d'analyse permettant de collecter la plus grande diversité d'espèces, en n'ayant recours qu'à un seul et unique support. Le Tenax TA et l'analyse par TD/GC/FID-MS sont très largement privilégiés et permettent d'aboutir à l'identification de plus de 200 composés différents, qui recouvrent des dizaines de fonctionnalités chimiques différentes, pour un seul habitacle donné, et dans une condition environnementale donnée.<sup>20,21</sup>

→ Même si les listes de substances établies sont longues, il est évident qu'elles ne sont pas exhaustives. En effet, si le Tenax TA permet de collecter une grande diversité d'espèces portant entre 6 et 20 atomes de carbone, on ne peut considérer qu'il soit efficace pour le piégeage des amines, acides carboxyliques, aldéhydes, cétones... espèces potentiellement très contributrices à l'odeur.

→ Aussi par manque de données sur les caractéristiques odorantes des composés identifiés mais aussi surtout au vu des multiples synergies olfactives potentielles, il n'est pas envisageable ni de prédire l'odeur résultante, ni de cibler à partir d'une liste de composés aussi divers, ceux qui sont le plus impactant.

C'est pourquoi, il est nécessaire (i) d'opter pour des stratégies d'échantillonnage et de mesure utilisant plusieurs supports de prélèvement et (ii) de développer des méthodes spécifiques à des familles d'espèces d'intérêt. La Figure 3-3 expose le banc d'essai déployé pour le prélèvement des échantillons à la sortie d'une chambre permettant l'exposition de pièces d'un habitacle. Il se compose (i) d'un port olfactif permettant une évaluation olfactive directe du flux sortant, (ii) une voie de mesure de la teneur totale en COV par FID, (iii) de plusieurs de voies de prélèvements simultanées permettant la collecte :

- ① sur cartouche Tenax TA ciblant le piégeage des COV de C6 à C16 ;
- ② sur cartouche imprégnée de 2,4-Dinitrophénylhydrazine ciblant le piégeage des aldéhydes et cétones ;
- ③ en barboteur ciblant le piégeage des amines et acides carboxyliques et ;
- ④ en canister pour l'échantillonnage des hydrocarbures légers.

L'analyse des supports de prélèvement s'effectue par chromatographie en phase gazeuse ou liquide.

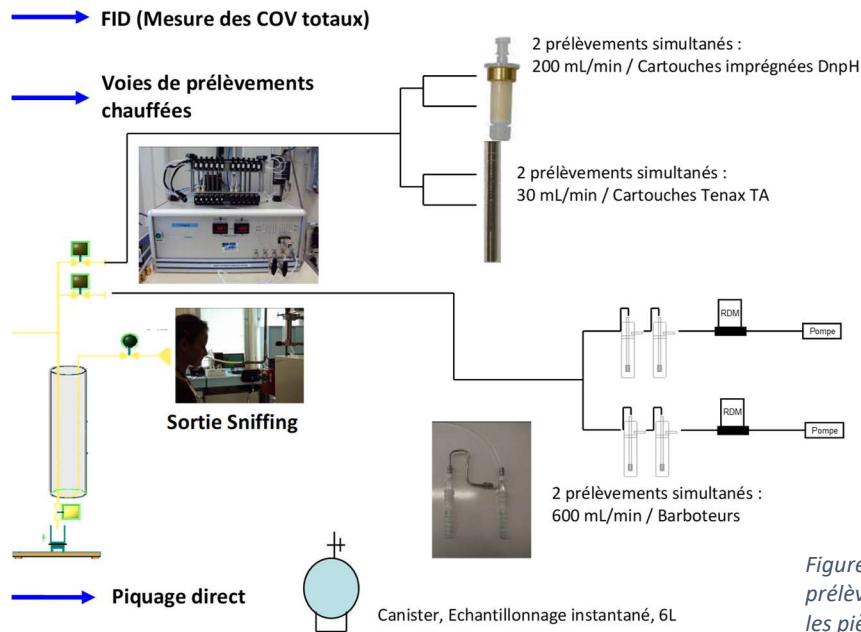


Figure 3- 3 Configuration d'un banc de prélèvement pour la collecte des COV émis par les pièces d'un habitacle automobile

Parmi l'ensemble des développements métrologiques menés pour l'identification des COV odorants issus de l'habitacle, ceux portés sur le prélèvement et l'analyse des amines sont particulièrement originaux et ont fait l'objet de la publication d'un article (Verriele, et al, 2012). Une méthode simple de mise en œuvre pour l'échantillonnage, sans dérivation, par barbotage dans l'eau suivi d'une analyse en chromatographie ionique couplée à un spectromètre de masse a été proposée. La validation métrologique a été menée pour une liste de 14 amines comprenant des amines aliphatiques légères mais également des amino-alcools et amines cycliques qui majoritairement caractérisent les émissions des mousses utilisées dans le secteur de l'automobile ou du mobilier. L'identification et la quantification des amines sont permises par l'utilisation d'un spectromètre de masse, simple quadripôle, équipé d'une sonde d'ionisation par électro-spray (ESI). Les avantages d'utiliser le couplage entre la chromatographie ionique et la spectrométrie de masse ont été clairement démontrés, puisqu'il permet de cibler un large panel de composés, tout en s'affranchissant de co-élutions, et d'atteindre des seuils de détection inférieurs aux seuils olfactifs (Tableau 3-1).

Aussi au-delà de la large caractérisation de la fraction organique gazeuse (potentiellement odorante), il faut aller jusqu'à mettre en regard les profils physico-chimiques des émissions avec leurs caractéristiques sensorielles pour mettre en évidence COV aux contributions les plus fortes. Pour parvenir à cela, il faut bien entendu bénéficier aussi d'une méthodologie sensorielle robuste et objectivée (cela fera l'objet du prochain paragraphe). La mise en regard des données passe par des méthodes de traitement multiparamétriques faisant appel le plus simplement à des calculs de distances mais aussi à de l'analyse en composantes principales (ACP) ou encore à de la classification hiérarchique. Au moyen d'une ACP normée et ajout de variables supplémentaires, la Figure 3-4 donne un exemple de corrélation entre les données de concentrations ambiantes dans un habitacle et ses caractéristiques olfactives. Les cercles de corrélation font apparaître, parmi d'autres, les liens entre la présence de composés aromatiques et des notes solvantées, la présence d'acide formique avec des notes chlorées ou encore la présence de la TEDA avec des notes aminées. Ce type d'analyse fait également apparaître la difficulté de raccrocher certaines notes odorantes à des molécules particulières ; c'est le cas des notes boisées et grillées, qui pour le cas qui sert d'exemple ici, sembleraient être la résultante de signaux induits par des molécules à très faibles teneurs non détectées analytiquement (face à la surabondance d'hydrocarbures et autres composés aromatiques) ou de synergie entre ces hydrocarbures, qui ne sont pas odorants pris individuellement, mais qui pris globalement pourrait induire une odeur.

Tableau 3- 1 Performances analytiques (séparation et limites de détection) pour la mesure des amines dans un habitacle de véhicule

	Limites de détection ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Chromatogramme (signal MS)	
<b>Amines aliphatiques</b>			
MéthylAmine (SIM1)	0.15		
DiméthylAmine (SIM2)	0.05		
TriméthylAmine (SIM3)	3.9		
EthylAmine (SIM2)	0.15		
DiéthylAmine (SIM5)	0.01		
PropylAmine (SIM3)	1.65		
ButylAmine (SIM5)	0.005		
DipropylAmine (SIM8)	0.003		
<b>Amines cycliques</b>			
CyclohexylAmine (SIM7)	0.009		
TEDA (SIM10)	0.03		
Caprolactame (SIM11)	0.11		
<b>Alcool-amines</b>			
DiméthylAminoéthanol (SIM6)	0.15		
3-DiméthylAminopropanol (SIM9)	0.015		
<b>Autres</b>			
NIAX (SIM11)	0.015		

Ce type d'analyse multiparamétrique permet donc de progresser dans l'identification de composés les plus contributeurs aux nuisances en environnements intérieurs mais ne permet pas de tout résoudre. Des analyses complémentaires faisant appel au couplage chromatographie en phase gazeuse et olfactométrie (GC-O) permettrait d'aller plus loin, en permettant d'une part le tri entre molécule odorante et non odorante et caractérisation de la nature odorante des composés individuels et de leur pouvoir d'odorisation. Néanmoins, l'approche se confrontera toujours au manque de compréhension des synergies et effet de masquage qui interviennent quand on est en présence de mélange complexe. Il faut donc absolument progresser dans la compréhension des mélanges odorants et notamment sur l'impact de la composition d'un mélange sur sa nature odorante.

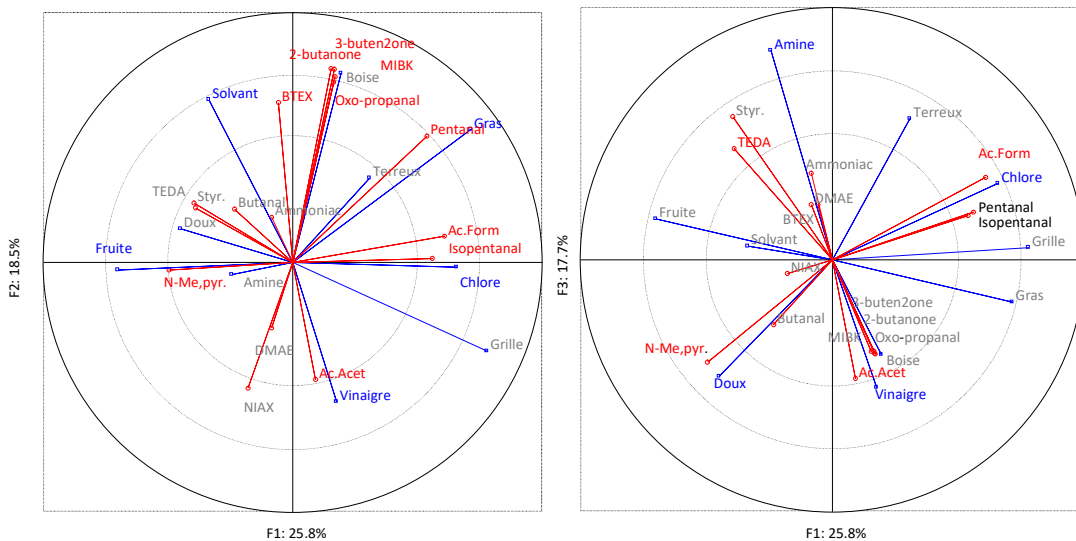


Figure 3-4 : Cercles de corrélation obtenus suite à une ACP croisant données de concentrations ambiantes dans un habitacle automobile et caractérisation olfactive.

**Développements et validation métrologique pour la surveillance des composés soufrés dans l'air ambiant/** Si dans le contexte des environnements intérieurs, la mesure des amines était d'intérêt majeur, dans le domaine de l'air ambiant, et notamment sur des territoires accueillant de l'industrie pétrochimique ou de la gestion de déchets, la mesure des composés soufrés, associant odeurs désagréables et seuils olfactifs très bas, est indéniablement requise. Les composés de cette famille de polluants recouvrent les dérivés alkyles de sulfure ou de disulfures (analogues soufrés des éthers et des peroxydes), de formules générales respectives R-S-R' et R-S-S-R' et les mercaptans (analogues soufrés des alcools), de formule générale R-SH. 5 composés, à savoir le sulfure d'hydrogène (H<sub>2</sub>S), le sulfure de diméthyle (DMS), le disulfure de diméthyle (DMDS), le disulfure de carbone (CS<sub>2</sub>) et le méthylmercaptan (CH<sub>3</sub>SH), sont majoritairement rapportés par la littérature adressant diverses typologies de sites, (Tableau 3-2).

Tableau 3- 2 Concentrations typiques en composés soufrés observées lors de diverses campagnes de mesures sur des sites de typologie variable

	Typologie site	Composés d'intérêt	Gamme de concentrations	Stratégie de mesure
<b>(Gallego, Roca et al. 2012)<sup>22</sup></b>	Sur site de gestion des déchets, Espagne	DMS	32,55 (moy) ± 18,54 (ET)	Prélèvement actif sur cartouche Tenax TA® et multi-lits puis analyse par chromatographie phase gaz couplée à un détecteur par spectrométrie de masse (TD-GC/MS)
		CS <sub>2</sub>	7,75 ± 2,71	
		DMDS	9,32 ± 6,06	
<b>(Susaya, Kim et al. 2011)<sup>23</sup></b>	Aux alentours d'un site industriel, Corée	DMDS	0,019 (min) - 0,11 (moy) - 5,26 (max) ppb	Prélèvement on-line : Unité de thermodésorption avec piège multi-lits : (Carbopack B, SilicaGel) et Chromatographie phase gaz couplée à un détecteur PFPD (GC/PFPD)
		DMS	0,02 - 0,095- 6,39 ppb	
		CH <sub>3</sub> SH	0,018- 0,069 - 5,69 ppb	
		H <sub>2</sub> S	0,05 - 0,268 - 12,9 ppb	
<b>(Kim, Jeon et al. 2007)<sup>24</sup></b>	Aux alentours d'un site industriel, Corée	H <sub>2</sub> S	0,005 (min) - 0,391 (moy) - 7,887 (max) ppb	Prélèvement on-line : Unité de thermodésorption piège cryogénique (Peltier) et Chromatographie phase gaz couplée à un détecteur PFPD (GC/PFPD)
		DMDS	0,002 - 0,021 - 0,419	
		DMS	0,004 - 0,116 - 3,421	
		CH <sub>3</sub> SH	0,003 - 0,012 - 0,128 ppb	

→ Si les études renseignant les concentrations en composés soufrés dans l'atmosphère autour de sites d'intérêt sont nombreuses, elles ne s'attardent que très peu sur la validation métrologique des techniques mises en œuvre. Pourtant, bien souvent, les données de concentrations et les plaintes pour nuisances, ou la caractérisation odorante des milieux ne sont pas concordants. Ces incohérences mettent en question la fiabilité des données, tant du côté sensoriel qu'instrumental.

→ La réactivité des composés soufrés avec les oxydants de l'atmosphère, mais également sur les supports de prélèvement ainsi que les interactions avec la matrice « air » de prélèvement (humidité, oxygène) sont des éléments connus qui conduisent à la remise en cause la quantitativité des mesures.

Le cadre de gestion des nuisances environnementales exposé ci-avant requiert la caractérisation spatio-temporelle des concentrations afin de renseigner l'exposition des populations. Pour cela, un approfondissement des développements métrologiques a été nécessaire pour considérer dans le cadre de la mesure des composés soufrés la présence d'interférents nombreux et

l'influence des paramètres environnementaux comme la température ou l'humidité. A la fois un travail sur les paramètres d'échantillonnage et de conservation liés à l'usage d'adsorbants et de lignes de prélèvement, et sur les paramètres optimaux d'analyse était attendu. C'est ce qui a été réalisé dans le cadre de la thèse de Cécilia Merlen, financé par TERA Environnement. Ce travail a abouti à la sélection d'un support de pré-concentration et d'une technique analytique spécifique pour la mesure des COV soufrés. Des méthodes (on-line et off-line)



permettant l'établissement de profils de concentration journaliers mais également de cartographie des concentrations sur une zone impactée ont été établies. Toutes les optimisations proposées dans le cadre de ce travail ainsi que toutes les évaluations de performances se sont portées sur une liste de 6 composés d'intérêt (méthylmercaptan –MM-, éthylmercaptan –EM-, diméthylsulfide –DMS-, isopropylmercaptan –IPM-, tertibutylmercaptan –TBM- et diéthylsulfide –DES-), jugés représentatifs des composés majoritairement retrouvés dans l'air ambiant, mais aussi couvrant une plage relativement large de masses molaires, comprenant des mercaptans et des sulfures et offrant des structures chimiques différentes (aliphatiques linéaires ou ramifiées).

La méthode, dite **off-line**, repose sur un dispositif composé :

- ❶ d'une unité de séchage de l'échantillon consistant en un tube en verre rempli d'un desséchant (CaCl<sub>2</sub>), peu encombrant et adapté aux prélèvements sur le terrain ; ainsi les interférences possibles sur le support de piégeage avec l'humidité de l'air sont évitées ;
- ❷ d'un module de prélèvement sur un adsorbant spécifique (*S-Sorbent Tube*<sub>450</sub>) à base de silice autorisant l'échantillonnage quantitatif d'un volume de 2L ; le procédé de préparation de l'adsorbant choisi a fait l'objet d'un dépôt de brevet ;
- ❸ d'un système d'analyse par chromatographie en phase gazeuse munie d'un système de désorption et d'un détecteur à photométrie de flamme spécifique au soufre (FPD) et d'un détecteur universel à ionisation de flamme (FID).

La validation métrologique (qui a fait l'objet de la publication d'un article Merlen et al., 2018) a permis de s'assurer pour une gamme de mesure allant de 1 à 250 ppb de la quantitativité de l'échantillonnage et de la répétabilité de la mesure. Les limites de détection ont été estimées comme inférieures à 1ppb. Les incertitudes de mesures ont été évaluées en considérant l'ensemble de la chaîne de mesure et l'impact des conditions environnementales : elles s'élèvent à environ 30 % (sauf pour le MM pour lequel elles sont de l'ordre de 50 %). L'échantillonnage et la conservation de l'échantillon sont les principaux éléments d'incertitude (Figure 3-5). Bien que ces incertitudes peuvent être considérées comme relativement hautes, la méthode proposée marque une avancée dans le domaine de la métrologie puisque l'incertitude pour une mesure recourant à l'échantillonnage sur Tenax (plus classiquement observée) a été estimée entre 60 et 80%, pour un prélèvement limité à 0.5L (Merlen, et al 2017).

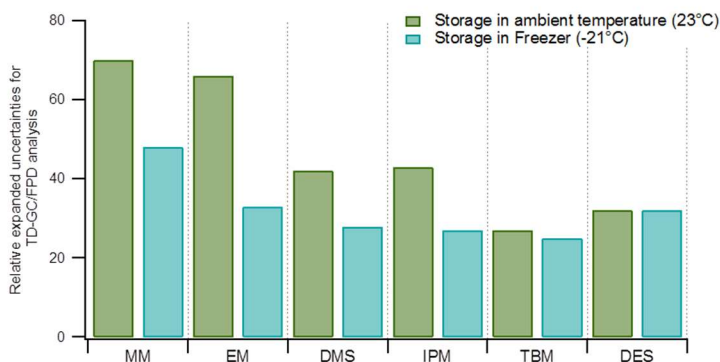


Figure 3-5 : Estimation de l'incertitude liée à la mesure de 6 composés soufrés par échantillonnage sur *Sorbent Tube*<sub>450</sub> et analyse par TD/GC/FPD. L'échantillon a été préalablement séché sur CaCl<sub>2</sub> et stocké à température ambiante (barres vertes) ou au congélateur (barres bleues) pendant 7 jours.

La méthode, dite **on-line**, a bénéficié du savoir-faire acquis pour la méthode off-line. Elle repose sur un dispositif composé :

- ❶ d'une unité de séchage de l'échantillon consistant en un tube en verre refroidi à - 25 °C dans un cryostat ;
- ❷ d'un module de pré-concentration en ligne sur l'adsorbant spécifique (*S-Sorbent Trap*) à base de silice autorisant l'échantillonnage quantitatif d'un volume de 1,2L ;

③ d'un système d'analyse par chromatographie en phase gazeuse munie d'un système de désorption et de détecteurs FPD/FID.

Les incertitudes de mesures sont estimées à moins de 30 % pour l'ensemble des composés considérés, y compris le méthylmercaptan et pour des concentrations à partir de 250 ppt. Le dispositif a été mis à l'épreuve sur site durant une campagne de terrain qui a eu lieu en 2017. Elle a montré la possibilité de suivre simultanément l'évolution temporelle des concentrations en BTEX et en composés soufrés via la double détection FPD/FID dont est équipé le système (Figure 3-6). Toutefois, il est à noter que l'encombrement du dispositif nécessite la mise à disposition d'un camion-laboratoire et une surveillance quotidienne.

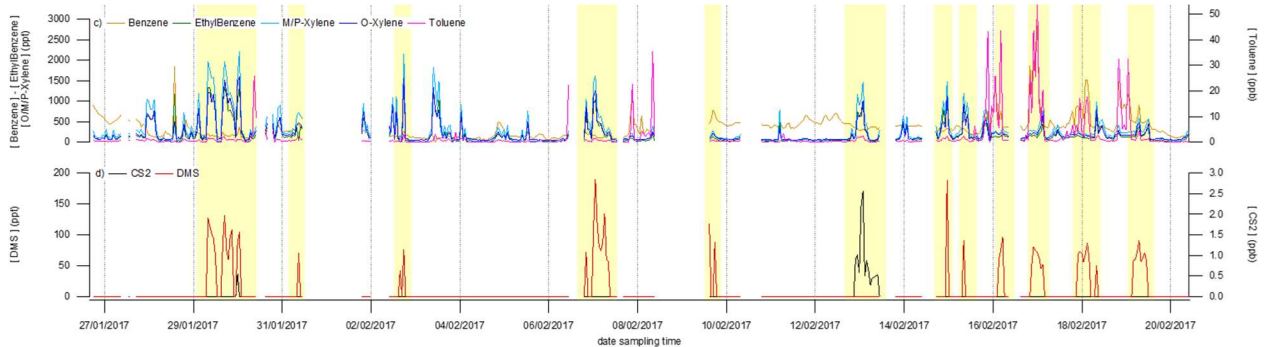


Figure 3-6 : Dynamique temporelle des concentrations en benzène, éthylbenzène, m,p-xylène, o-xylène, toluène, DMS et CS<sub>2</sub> observée dans la zone industrielle de Rouen en février 2017

### Que retenir ?

**L'élaboration d'une stratégie de mesure complexe, visant à la fois l'exhaustivité mais également l'analyse spécifique de composés d'intérêt est nécessaire pour l'identification des composés odorants que ce soit dans l'air ambiant ou dans les environnements intérieurs. Les propriétés physico-chimiques des composés odorants et leurs grandes variabilités en termes de fonctionnalités chimiques mais aussi de niveaux et dynamique de concentration rendent leur caractérisation complexe. L'optimisation et la validation des méthodes d'échantillonnage (supports, volumes, débits...) et d'analyse ainsi que l'évaluation de l'influence des paramètres environnements, constitue un sujet de recherche à part entière et qui a mérité une place significative, voire majeure dans les projets ou encadrement de thèse auxquels j'ai participé**

**Maîtriser les stratégies de mesures instrumentales des composés odorants et les méthodologies de caractérisation sensorielle est un point fort. La complémentarité des jeux de données permet d'avancer grandement dans l'identification des facteurs impactant les nuisances olfactives. Néanmoins, l'objectivation de la description des natures odorantes est indispensable pour autoriser le croisement des données sensorielles et des données issues des analyses instrumentales. Malgré tout, la compréhension de la nature odorante des mélanges de molécules odorantes manque pour expliquer l'apparition de certaines notes.**

### Valorisation

Brevet	Merlen, C., Verrielle, M., Crunaire, S., Locoge, N., Procédé de préparation d'un adsorbant pour composés organiques volatils, procédé de quantification de composés organiques volatils, 1760296 (n° dépôt), 30/10/2017
Article	Verrielle, M., H. Plaisance, L. Depelchin, S. Benchabane, N. Locoge, et G. Meunier. « Determination of 14 amines in air samples using midget impingers sampling followed by analysis with ion chromatography in tandem with mass spectrometry ». <i>Journal of Environmental Monitoring</i> 14, n° 2 (2012): 402-8.



Article	Merlen, C., M. Verrielle, S. Crunaire, V. Ricard, P. Kaluzny, et N. Locoge. « Quantitative or only qualitative measurements of sulfur compounds in ambient air at ppb level? Uncertainties assessment for active sampling with Tenax TA® ». <i>Microchemical Journal</i> 132 (2017): 143-53.
Article	Merlen, C., M. Verrielle, S. Crunaire, V. Ricard, P. Kaluzny, et N. Locoge. « A preconcentration method based on a new sorbent for the measurement of selected reduced sulfur compounds at ppb level in ambient air ». <i>Microchemical Journal</i> 143 (2018): 47-54.
Manuscrit de thèse	Marie Verrielle, Nature et origines des composés organiques volatils et odeurs présents dans un habitacle de véhicule Impact des pièces automobiles sur la qualité de l'air intérieur. (2011)
Manuscrit de thèse	Cécilia Merlen, Développement et validation métrologique de préleveurs passifs pour la surveillance des composés volatils odorants dans l'air ambiant.(2017)



## C-2 LES APPORTS DE L'ANALYSE OLFACTIVE OBJECTIVEE

Dans la surveillance des nuisances, il est nécessaire de disposer de méthode sensorielle afin de caractériser les paramètres psychophysiques des odeurs à la fois en terme d'intensité, de nature, de ton hédonique et d'impact (concentration d'odeur).

La question de l'objectivité est capitale, telle qu'elle a fait l'objet de l'écriture d'un article de revue de la littérature. Paru en 2021, la rédaction de cet article (Hawko, et al, 2021) a été réalisée dans le cadre de l'encadrement de thèse de Charbel Hawko (en co-direction avec l'Université du Havre et partenariat avec Atmo Normandie). Il rassemble et compare les méthodologies sensorielles les plus couramment utilisées pour l'évaluation des 4 paramètres psychophysiques précités.

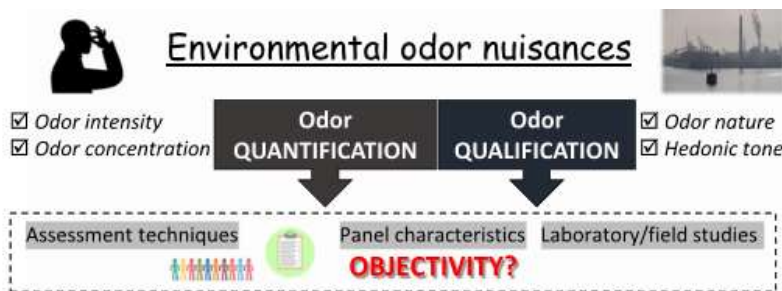


Figure 3-7 : La démarche d'analyse olfactive pour la gestion des nuisances dans l'environnement : résumé graphique du contenu de l'article de revue rédigé dans le cadre de la thèse de Charbel Hawko.

Pour chacune des dimensions considérées, l'article dont le contenu est résumé par la Figure 3-7, compare les techniques d'évaluation et les caractéristiques des panels, considère les études en laboratoire et sur le terrain et débat de l'objectivité des résultats. Il offre au lecteur un guide méthodologique pour l'analyse sensorielle des odeurs environnementales en considérant les contraintes du contexte d'étude.

Ma contribution sur le plan méthodologique sur la question de l'objectivation de la caractérisation sensorielle des odeurs repose sur la méthodologie du Champs des Odeurs qui m'a été transmise lors de mon Master® à

l'Université du Havre. D'abord appliquée pendant ma thèse pour la caractérisation des odeurs de l'habitable et des émissions de pièces, la méthode a été réinvestie dans la thèse de Lorène Beauvais pour le même contexte d'application. Mon implication sur le plan méthodologique a également permis d'amorcer récemment des recherches sur la compréhension des mélanges odorants de l'environnement en vue d'ajuster les modèles de prédiction de l'impact des émissions odorantes. Une première brique de connaissance sur ce volet a été acquis par les travaux de thèse de Charbel Hawko

→ L'utilisation d'échelles de référence et de collections de référents qualitatifs permettent une plus grande objectivation de l'intensité et de la nature odorante mais engendrent des coûts et temps de formation considérables.

→ Concernant la concentration d'odeur, l'utilisation de l'olfactométrie dynamique fait l'unanimité et remplit les critères d'objectivité et de reproductibilité. Les questions sont alors plutôt tournées vers l'échantillonnage (notamment pour des sources surfaciques diffuses) pour lequel des biais sont souvent constatés.

→ La caractérisation du ton hédonique accepte une large part de subjectivité dans les méthodes puisqu'il s'agit bien d'estimer l'acceptation

**Caractérisation de la nature odorante par des méthodes de description objectivée/** La méthode du Champs des Odeurs® repose sur un socle de référents (composés chimiques isolés) odorants positionnés dans un espace 3D sur la base

des relations structure/activité des molécules odorantes. Une approche analytique par moindres distances permet le positionnement de toute odeur dans l'espace 3D, en aboutissant donc à la qualification odorante de tout effluent gazeux et en s'affranchissant des biais physiologique, psycho-sociologique ou sémantique<sup>25</sup>. L'utilisation de la méthode nécessite un apprentissage en plusieurs étapes ❶ une initiation à la compréhension de l'odorat et de son fonctionnement, ❷ la mémorisation d'une collection de 45 référents odorants et de leur organisation relative dans l'espace odorant, ❸ l'entraînement à la reconnaissance des référents odorants dans un mélange complexe, ❹ l'entraînement au positionnement olfactif d'un stimulus odorant dans le référentiel. Jugée parfois lourde d'utilisation et couteuse en formation, la méthode du Champs des Odeurs<sup>®</sup> a été allégée et adaptée à l'analyse environnementale pour constituer le Langage des Nez<sup>®</sup>, sous la conduite de Atmo Normandie et Osmanthe (cabinet de conseil spécialisé). A la suite de cet ajustement, une formation professionnelle a été établie par un Groupe de Travail constitué d'experts, que j'ai intégré en 2016 et qui assure désormais la pérennité et bonne utilisation de la méthode.

La caractérisation de l'odeur des habitacles et des émissions des pièces automobiles a été un premier contexte d'application de la méthode du Langage des Nez<sup>®</sup>. La Figure 3-8 montre les résultats de l'analyse objectivée de l'odeur de l'air d'un habitacle à température et humidité ambiante, ainsi qu'à 45°C pour 2 taux d'humidité différent (15% et 25%). Après avoir identifié pour chaque condition les notes en présence, l'évaluation a permis d'établir un score sur 9 qui traduit la contribution de chaque note à l'odeur globale de l'habitacle. L'approche choisie permet en effet de mettre en évidence l'évolution olfactive de l'habitacle selon les conditions environnementales. Pour le cas investigué ici (thèse Lorène Beauvais), on constate que les notes *Butanol* et *IBQ* contribuant pour moitié à température ambiante ont disparues à haute température pour laisser plus de place aux notes *Phénol* et *Acétyl-pyrazine*. Aussi, l'élévation de l'humidité a révélé une note *Nonanal*, inexistante sur les autres conditions. La compréhension de l'évolution du profil olfactif de l'habitacle passe par la mise en regard de ces données avec les données de concentrations. Or dans ce cas précis, ce travail n'a abouti qu'à l'établissement d'une liste non exhaustive de composés « potentiellement responsables » de cette évolution tant la diversité des COV en présence était grande, les données sur les caractéristiques olfactives des composés individuels manquantes et la stratégie d'échantillonnage limitée à 2 types d'adsorbant.

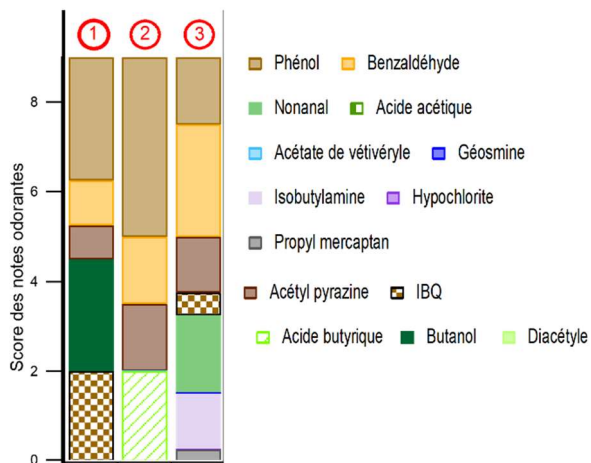


Figure 3-8 : Profils olfactif établis selon la méthode du Champs des Odeurs<sup>®</sup> d'un habitacle automobile sous 3 conditions environnementales : (1) 25°C, 50%RH ; (2) 45°C, 15%RH ; (3) 45°C, 25%RH.

Ce type d'approche a été déployé également dans le cadre de la thèse de Charbel Hawko pour la caractérisation de 44 molécules odorantes potentiellement émises lors d'incidents industriels sur la zone urbano-portuaire du Havre. La liste a été établie dans le cadre de la mise en place de la Force d'Intervention Rapide, ordonnée par la préfecture de Seine-Maritime, en partenariat avec Atmo Normandie et la CCI du Havre, après s'être assuré de l'innocuité de ces composés pour l'exercice d'olfaction proposé. Cette base de données, qui a fait l'objet de la publication d'un article (Hawko et al., 2020), associée à de la surveillance par des riverains formés et mobilisables, contribue à renforcer le système d'alerte en cas d'incident industriel. L'établissement de ce type de liste et de

caractérisation est une première en France. Elle sera valorisée dans le cadre du projet DISCERNEZ (financé par l'ANR) qui débutera fin 2021 en vue du développement d'un outil de cartographie prédictive des nuisances olfactives.

**Compréhension des effets de mélange sur la nature odorante.** Disposer de la caractérisation olfactive des molécules odorantes potentiellement émises lors d'un incident industriel est une première étape dans l'anticipation des nuisances. Seulement, afin d'établir des cartographies prédictives, il est essentiel de renseigner quelles sont les interactions des molécules odorantes émises simultanément et l'évolution de la nature odorante du mélange avec sa dilution ou la variation des proportions des molécules le constituant. Les travaux de thèse de Charbel Hawko ont permis l'établissement d'une méthodologie inédite, basée sur un plan de mélange<sup>26</sup> (experimental design), pour étudier la variation de la nature odorante avec la composition d'un mélange qui contient jusqu'à 5 constituants, à plusieurs niveaux de dilution représentant des épisodes incidentels et quotidiens de nuisances. L'application du plan de mélange aboutit à une matrice d'équations permettant de prédire le profil olfactif (selon la méthodologie du Langage des Nez<sup>®</sup>) d'un mélange à partir de sa constitution, de la nature odorante de chacun de ses constituants mais également du potentiel d'odorisation de chaque molécule considérée (ratio entre la concentration de la molécule dans le mélange et son seuil olfactif). Ces essais permettent aussi de renseigner les interactions olfactives entre composés en termes qualitatifs et quantitatifs. La Figure 3-9 est un exemple de représentation modélisant la contribution (sur un poids de 9) à la note *Pyrogénée* des composés d'un mélange tertiaire (toluène, furfurylmercaptan, cyclopentanone) en fonction des proportions du mélange (représentées par les axes du diagramme ternaire). Ainsi, on observe que la note *Pyrogénée* atteint un maximum de contribution de 5/9 pour un mélange se composant de 47 à 68% de furfurylmercaptan, complété par 23 à 36% de cyclopentanone et 6 à 23% de toluène. Pourtant, pris individuellement, seul le furfurylmercaptan ne présente une note *Pyrogénée* ; ce qui met donc en évidence la synergie qualitative entre ces 3 composés.

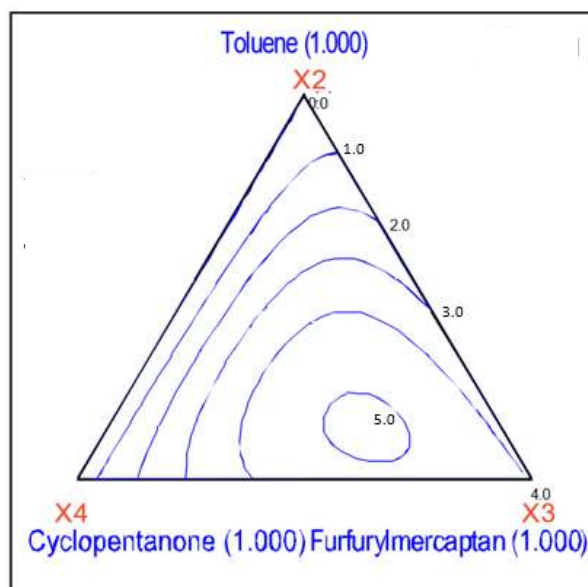


Figure 3- 9 : Représentation isochrone de la contribution à la note *Pyrogénée* des composés d'un mélange tertiaire (toluène, furfurylmercaptan, cyclopentanone) en fonction des proportions du mélange (représentées par les axes du diagramme ternaire)

La validation de la méthodologie a fait l'objet de la rédaction d'un article à soumettre très prochainement. La transposabilité des modèles établis à d'autres molécules que celles investiguées est à l'étude.

## Que retenir ?

**La maîtrise des méthodologies du Champs des Odeurs et du Langage des Nez a permis de proposer dans mes projets de recherche des approches multidisciplinaires pour répondre à la question des nuisances. Le déploiement de ces approches a toujours été porté vers l'identification des sources et donc vers l'action de les réduire.**

**C'est sur ce volet que l'interaction entre mes activités de recherche et d'enseignement est la plus forte. En effet, l'efficacité des méthodes repose sur une formation solide et un niveau d'expertise fort des « nez-évaluateurs ». Mon implication dans le groupe d'experts en charge de la formation sur le Langage des Nez nourrie mes réflexions sur le volet recherche et m'a permis aussi de tisser des liens avec des collègues et de bâtir des projets collaboratifs.**

**Ainsi la méthodologie du Langage des Nez a été mise au service depuis 2020 de projets tournés vers la compréhension de la dispersion des odeurs dans l'environnement pour des sites multi-influencés, ce qui va bien au-delà de l'identification de sources.**

## Valorisation

Article	Verrielle, M., H. Plaisance, V. Vandebilcke, N. Locoge, J.N. Jaubert, et G. Meunier. « Odor evaluation and discrimination of car cabin and its components: Application of the "field of odors" approach in a sensory descriptive analysis ». <i>Journal of Sensory Studies</i> 27, n° 2 (2012): 102-10.
Article	Hawko, C., M. Verrielle., N. Hucher., C. Crunaire., C. Léger., N. Locoge., G. Savary., « A review of environmental odor quantification and qualification methods: the question of objectivity in sensory analysis». <i>Science of The Total Environment</i> (2021) <a href="https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148862">https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148862</a>
Article	Hawko, C., Verrielle, M., Hucher, N., Crunaire, C., Léger, C., Locoge, N., Savary, G. « Objective odor analysis of incidentally emitted compounds using the Langage des Nez® method: application to the industrial zone of Le Havre». <i>Environmental Science and Pollution Research</i> (2021) doi: 10.1007/s11356-021-12899-6..
Manuscrit de thèse	Marie Verrielle, Nature et origines des composés organiques volatils et odeurs présents dans un habitacle de véhicule Impact des pièces automobiles sur la qualité de l'air intérieur. (2011)
Manuscrit de thèse	Lorène Beauvais, Développement d'un outil de diagnostic in-situ des émissions de Composés Organiques Volatils en vue de la maîtrise de l'odeur et des concentrations en polluants dans l'habitacle. (2020)
Manuscrit de thèse	Charbel Hawko, Contrôle des émissions atmosphériques industrielles au Havre pour la réduction des odeurs quotidiennes et lors d'incidents. (2021)
Article en attente d'acceptation	Hawko, C., M. Verrielle., N. Hucher., C. Crunaire., C. Léger., N. Locoge., G. Savary., "Investigation of the odor quality of pollutant mixtures for the environmental odor nuisance management"



## DANS LE VISEUR

A nouveau, à l'issue de cette partie, le bilan de mes activités me permet de me projeter vers des perspectives à court, moyen et long termes. Si j'ai pu montrer par mes travaux antérieurs que coupler mesures sensorielles et instrumentales était une réponse méthodologique puissante pour l'identification de sources de pollution odorante, il n'est pas encore clairement établi que l'analyse olfactive objectivée puisse être tout aussi pertinente pour répondre au besoin d'anticipation des nuisances. La question scientifique à laquelle je veux répondre dans les prochaines années est la suivante :

L'analyse olfactive objectivée déployée au niveau de la population facilite-t-elle la gouvernance des nuisances olfactives au niveau local ?

Elle peut être déclinée en plusieurs sous-sujets :

- L'analyse olfactive contribue-t-elle à une fine compréhension au niveau local de la dispersion des odeurs ? Permet-elle une anticipation de la nuisance et une meilleure information des populations impactées ?
- La constitution de groupes de riverains formés à l'analyse olfactive objectivée est-elle seulement un moyen pour cartographier et mesurer la nuisance ou aussi un levier pour plus de résilience et la co-conception de solutions avec les principaux acteurs de terrain (industriels, politiques, associations, collectivités...)?

Pour répondre à ces questions, je souhaite poursuivre ma collaboration avec Atmo Normandie et le laboratoire URCOM de l'Université du Havre. Dans ce consortium riche de complémentarité, j'apporte avec mes collègues de fortes compétences en métrologie instrumentale, et notamment un haut niveau d'expertise pour le prélèvement et l'analyse de composés odorants. J'apporte personnellement mes compétences et mon expérience dans la formation et l'utilisation de la méthode du Langage des Nez®.

Afin, d'enrichir les partenariats sur cette thématique, j'ambitionne de me rapprocher au niveau européen de divers partenaires du projet D-NOSES : Ibercivis – Espagne des experts de la science citoyenne qui ont la capacité de développer, promouvoir et rendre visible les réseaux de citoyens et l'Université Polytechnique de Milan – Italie spécialisée dans la modélisation de l'impact des émissions odorantes. Ces partenaires sont particulièrement intéressants pour répondre aux attentes de l'Europe sur des aspects de gouvernance pour confirmer la puissance de l'action citoyenne (HE2020 - Call CL6-2022-Governance-01-08 : Uptake and validation of citizen observations to complement authoritative measurement within the urban environment and boost related citizen engagement). Il sera alors pertinent de leur proposer les apports dans ce contexte de l'analyse olfactive objectivée. Le nombre de riverains français formés devenant significatif, les zones « pilotes » étant nombreuses, il serait possible d'évaluer l'impact sociologique de la démarche et d'en étudier les conséquences sur la perception du risque industriel et sur l'acceptation des nuisances.

A court terme, il s'agira alors de capitaliser sur les données issues de la thèse de Charbel Hawko au travers le projet DISCERNEZ (APR ANR-Flash SIOMRI). L'objectif est d'adapter un modèle de dispersion des pollutions atmosphériques PMSS (dont le développement reviendra à ARIA Technologies - partenaire du projet) pour le rendre capable, à partir des caractéristiques odorantes d'émissions incidentelles (nature, impact) imputées par un opérateur, de cartographier la dispersion d'un panache odorant sur 24h. Un système de traduction des données entrantes et sortantes du modèle sera nécessaire pour établir le lien entre les espèces en présence, leurs concentrations et un profil olfactif type qualitatif (selon le Langage des nez) et quantitatif.

Si dans un premier temps, le modèle sera susceptible d'être déployé sur la zone urbano-portuaire du Havre, il trouvera vite ses limites pour un déploiement plus large du simple fait d'un manque de données d'entrée. C'est pourquoi, à moyen terme, il faut envisager d'approfondir la compréhension des effets de mélanges sur les caractéristiques odorantes de l'air ambiant. La validation des modèles tels que développés dans la thèse de Charbel Hawko doit désormais concerner non plus des référents du Langage des Nez mais doit s'élargir à des molécules effectivement mesurées sur les zones impactées. Un travail distinguant des socles de référents

typiques des milieux urbain, industriel, rural pourrait être mené. Par ailleurs, un modèle n'est validé que s'il a été confronté à l'expérience, ainsi des campagnes de mesures instrumentales et sensorielles sont à mener pour des scénarios de dispersion variables, et sur des zones impactées par différents types d'activités anthropiques. Ces deux derniers points pourraient être l'objet de 2 nouvelles thèses que je co-dirigerais dans les 5 ans à venir, en gardant le consortium qui s'est constitué pour la thèse de Charbel Hawko. Des co-financements par Atmo France, ainsi que par les régions Hauts de France et Normandie sont envisagés.

La perspective à long terme est de transférer le résultat de ces recherches dans les instances de normalisation et de réglementation française et européenne. C'est pourquoi, je veux maintenir mon implication dans le GT Afnor Olfactométrie, mais également rejoindre la commission CEN en charge de ces questions.

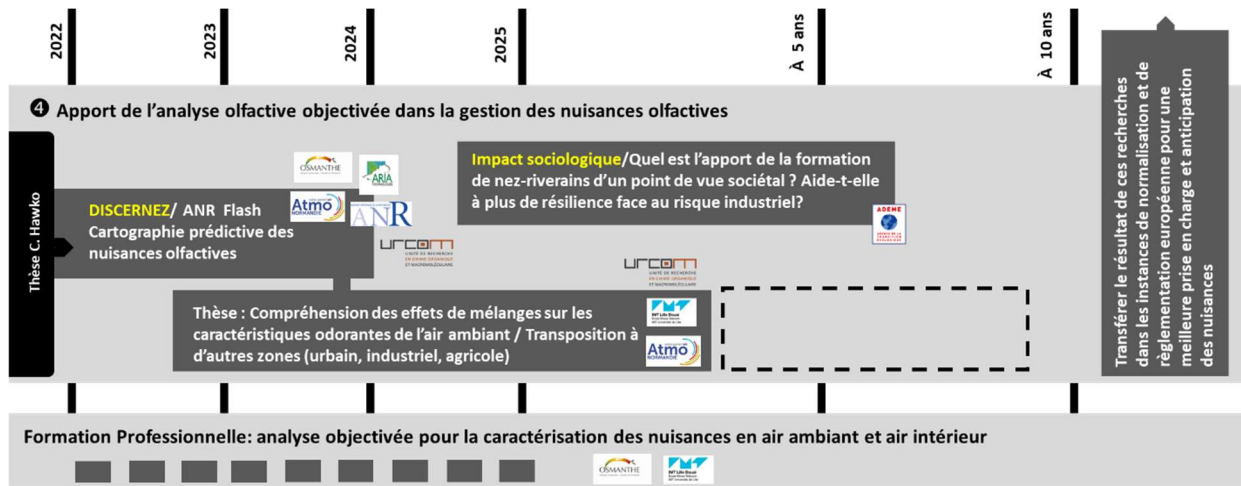


Figure 3- 10 : Cartographie des Perspectives à court, moyen et long terme sur l'axe de recherche « apport de l'analyse olfactive objectivée dans la gestion des nuisances »

Je souhaite également poursuivre la formation professionnelle (tout comme de groupes de riverains) pour d'une part encore augmenter le nombre d'industries, d'associations de surveillance de la qualité de l'air, de citoyens français aguerris à la méthode du Langage des Nez®, ce qui facilitera la prévention des risques de nuisances et leur gestion apaisée. D'autre part, délivrer ces formations me permettent de garder un contact rapproché avec les destinataires finaux de ce travail de recherche et donc d'orienter pertinemment mes choix. C'est pourquoi je maintiendrais mon implication en tant que formatrice à hauteur d'1 à 2 sessions de formation par an, me partageant entre des formations destinées à la surveillance de l'air ambiant et d'autres à la qualification des espaces intérieurs (formation en cours de montage, voir Partie A de ce manuscrit).



- <sup>1</sup> Zwarterook, I. (2010) Les risques et pollutions industriels sur le territoire dunkerquois : des perceptions à la concertation, *Les Cahiers de la sécurité industrielle*, 145 pages
- <sup>2</sup> Pourtier, L. (2013) Evaluation des nuisances olfactives et désodorisation, *Odorat et Goût: De La Neurobiologie Des Sens Chimiques Aux Applications*. pp. 451–457.
- <sup>3</sup> Schlegelmilch, M., Streese, J., Biedermann, W., Herold, T., Stegmann, R., (2005), Odour control at biowaste composting facilities. *Waste Management* 25, 917–927.
- <sup>4</sup> Jaubert, J.N., (2010) La gêne olfactive : composantes – moyens d'appréciation, *Pollution Atmosphérique*, N°208
- <sup>5</sup> Nastasi, V. (2017) Gestion des odeurs émises par les stations de traitement d'eaux résiduaires dans le monde, *Pollution Atmosphérique*, N°234-4
- <sup>6</sup> Cors, M. Cobut, P., Fanlo, J-L., Romain A-C., Delva J., Thomas, J-F., (2017), L'Observatoire des odeurs: un outil de résolution des conflits ? Réflexions d'un acteur de terrain, *Pollution Atmosphérique*, N°234-4
- <sup>7</sup> Article R122-3 du code de l'environnement, décret n°96-18 du 5 janvier 1996, article 2-II-I
- <sup>8</sup> Circulaire du 17/12/98 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement (Arrêté ministériel du 2 février 1998 relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation, modifié par l'arrêté du 17 août 1998)
- <sup>9</sup> EN 13725:2003 - Air quality - Determination of odour concentration by dynamic olfactometry.
- <sup>10</sup> Arrêté du 12 février 2003 relatif aux prescriptions applicables aux installations classées soumises à autorisation sous la rubrique 2730 traitement de sous-produits d'origine animale, y compris débris, issues et cadavres, à l'exclusion des activités visées par d'autres rubriques de la nomenclature, des établissements de diagnostic, de recherche et d'enseignement.
- <sup>11</sup> Arrêté du 21 juin 2018 modifiant l'arrêté du 20 avril 2012 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées de compostage soumises à enregistrement sous la rubrique n° 2780
- <sup>12</sup> Arrêté du 10 novembre 2009 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées de méthanisation soumises à déclaration sous la rubrique n° 2781-1
- <sup>13</sup> Brancher, M., Griffiths, K.D., Franco, D., Melo Lisboa, H., (2017), A review of odour impact criteria in selected countries around the world, *Chemosphere*, Volume 168, Pages 1531-1570
- <sup>14</sup> Directive 2010/75/UE du Parlement européen et du Conseil du 24 novembre 2010 relative aux émissions industrielles (prévention et réduction intégrées de la pollution) ; Journal officiel n° L 334 du 17/12/2010 p. 0017 - 0119.
- <sup>15</sup> Un air sain pour tous : mieux surveiller pour agir et protéger (2020), Rapport d'activité d'Atmo France, 56 pages.
- <sup>16</sup> Projet Européen D-NOSES, financé dans le cadre de l'appel à projet européen Horizon 2020 – Programme recherche et Innovation – Bourse No 789315 - dnoses.eu
- <sup>17</sup> Lotesoriere B.J., Giacomello A.D., Bax C., Capelli L., (2021), The Italian Pilot Study of the D-noses Project: an Integrated Approach Involving Citizen Science and Olfactometry to Identify Odour Sources in the Area of Castellanza (va), *Chemical Engineering Transactions*, 85, 145-150.
- <sup>18</sup> Capelli, L., Sironi, S., Del Rosso, R., Guillot, J-M., (2013), Measuring odours in the environment vs. dispersion modelling: A review, *Atmospheric Environment*, Volume 79, Pages 731-743.
- <sup>19</sup> Conti, C., Guarino, M., Bacenetti, J., (2020), Measurements techniques and models to assess odor annoyance: A review, *Environment International*, Volume 134, 105261
- <sup>20</sup> Xiong, J., Yang, T., Tan, J., Li, L., Ge, Y. (2015), Characterization of VOC emission from materials in vehicular environment at varied temperatures: Correlation development and validation, *PLoS ONE*, 10 (10), art. no. e0140081
- <sup>21</sup> Yoshida, T., Matsunaga, I., Tomioka, K., Kumagai, S., (2006), Interior air pollution in automotive cabins by volatile organic compounds diffusing from interior materials: I. Survey of 101 types of Japanese domestically produced cars for private use, *Indoor and Built Environment*, 15 (5), pp. 425-444.
- <sup>22</sup> Gallego, E., F. Roca, et al. (2012), Characterization and determination of the odorous charge in the indoor air of a waste treatment facility through the evaluation of volatile organic compounds (VOCs) using TD-GC/MS." *Waste Management* 32(12): 2469-2481.
- <sup>23</sup> Susaya, J., K.-H. Kim, et al. (2011). Assessment of reduced sulphur compounds in ambient air as malodor components in an urban area, *Atmospheric Environment*, 45(20): 3381-3390.
- <sup>24</sup> Kim, K.-H., E.-C. Jeon, et al. (2007), An on-line analysis of reduced sulfur gases in the ambient air surrounding a large industrial complex, *Atmospheric Environment* 41(18): 3829-3840.



<sup>25</sup> Jaubert, J.-N., Tapiero, C., Dore, J.-C., 1995. The field of odors: toward a universal language for odor relationships. *Perfumer Flavorist* 20, 1–16.

<sup>26</sup> Marcheafave, G.G., Tormena, C.D., Pauli, E.D., Rakocevic, M., Bruns, R.E., Scarminio, I.S., 2019. Experimental mixture design solvent effects on pigment extraction and antioxidant activity from *Coffea arabica* L. leaves. *Microchemical Journal* 146, 713–721. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.01.073>

## Postface

*J'ai rédigé ce manuscrit quasiment en huis-clos, « confinement et Travail à Distance oblige », dans mon espace intérieur, affrontant les effluves de mes archives : manuscrits de thèse, projets archivés – abandonnés - en cours, articles... J'y livre bilan et perspectives, mais aussi beaucoup de ma personnalité dans sa structuration et sa mise en page. Chercheuse, née dans le laboratoire auquel j'appartiens toujours, j'ai cherché un regard extérieur sur mon parcours. J'avais besoin de confronter ma vision à un point de vue sans implication dans mon travail. Je remercie donc Laurence Le Coq d'avoir été ce regard bienveillant et rassurant. Ces mots terminent ce manuscrit mais ne traduisent pas mon envie de le finir. Ecrire pour moi et en mon nom, j'en ai encore envie. Transmettre en échappant aux sentiers battus, je ne peux plus y renoncer.*

*Je nourris donc l'espoir que ces dix prochaines années ne me donneront pas seulement l'opportunité d'approfondir les perspectives scientifiques que j'ai bâties par l'écriture de ce document et d'assumer de nouvelles responsabilités en tant qu'HDR, vis à vis de la structuration de l'équipe et de la recherche de financements et de partenariats. Je souhaite qu'elles m'offriront aussi un espace pour écrire un ... des livre(s) de vulgarisation scientifique, pour ouvrir une école d'été internationale. Ça me donnera aussi l'occasion de rompre ce huis clos et d'à nouveau voyager...*

