

# Abstract

Given people's significant time spent indoors, ensuring good indoor air quality (IAQ) is essential because it significantly influences occupants' health and productivity. Office buildings consume about 50% of commercial building energy and 18% of total building stock, with HVAC systems contributing around 40% of the energy consumption. Despite the advent of low-cost smart building sensors, there is a lack of guidelines for optimal IAQ monitoring strategies particularly in offices with dynamically changing occupancy. This thesis investigates three research topics: 1) proxy methods for inhalation exposure assessment, 2) optimal air pollution sensor placement which captures inhalation exposures, and 3) sets of indicators for air inhalation exposure and occupancy detection in office environments.

Chapter 3 proposes proxy methods for detecting personal inhalation exposures to carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and particulate matter (PM) in simulated office settings with dynamically changing occupancy. Three proxy sensing techniques were compared with the concurrent breathing zone measurements: stationary IAQ monitoring, wearable wristbands for physiological monitoring, and passive infrared (PIR) sensors for human presence detection. Combining three proxy techniques improved the CO<sub>2</sub> exposure detection by twofold compared to solely using a stationary IAQ monitor. Stationary PM monitors near the ventilation exhaust accurately estimated PM exposure, while CO<sub>2</sub> measurements at the front edge of the desk showed moderate accuracy for CO<sub>2</sub> exposure detection.

Chapter 4 investigates optimal sensor placement for detecting inhalation exposure in static and dynamic simulated office environments. It identifies suitable locations for accurate exposure estimation, considering occupancy dynamics. The findings show that differentiating between static/dynamic occupancy and sitting/standing activities enhanced the accuracy of exposure detection. Variables such as proximity of sensors to occupants and ventilation rate/strategy played significant roles in improving personal exposure detection. Desk- and wall-mounted CO<sub>2</sub> sensors, along with a ceiling-mounted PM sensor, provided the most accurate exposure detection.

Chapter 5 explores indicators for exposure and occupancy detection in two real office buildings in the western part of Switzerland. The method used a combination of stationary and wearable sensors, along with Decision Tree and correlation analyses. Occupancy strongly influenced air pollution gradients in different office spaces, with higher PM<sub>10</sub> levels during lunch/coffee activities. Desk-mounted CO<sub>2</sub> sensors effectively detected CO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub>, and PM<sub>10</sub> exposures in open-plan offices. CO<sub>2</sub> levels at the sidewall represented prolonged occupancy, while desk-mounted PM<sub>10</sub> sensors captured transient occupancy. A single CO<sub>2</sub> sensor proved to be a cost-effective solution for both CO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> exposure and occupancy detection. Air pollution data demonstrated up to 4× higher predictive power in detecting exposures and occupancy compared to indoor climate data.

The thesis proposes optimizing solutions for exposure and occupancy detection with smart building sensors under various office setups and occupancy scenarios. The findings could find application in enhancing IAQ management and occupant-centric HVAC control through integrated smart monitoring techniques that can be used in real-life occupancy conditions.

## Keywords

Indoor air quality, Optimal sensor placement, Inhalation exposure detection, Occupancy dynamics, Office environments

# Résumé

Du fait que la population passe une grande partie de leur temps à l'intérieur, il est essentiel de veiller à une bonne qualité de l'air intérieur (QAI) car cette dernière influence considérablement la santé et la productivité des occupants. Les immeubles de bureaux consomment environ 50 % de l'énergie des immeubles commerciaux et représentent 18 % du stock total de bâtiments. Les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation (HVAC) contribuent à environ 40 % de cette consommation énergétique. Malgré l'avènement de capteurs à faible coût dans les bâtiments intelligents (*Smart buildings*), il manque des directives définissant les stratégies de surveillance optimale de la QAI, en particulier dans les bureaux où l'occupation varie fortement. Cette thèse explore trois sujets principaux de recherche : 1) les méthodes substitutives (proxy) permettant l'évaluation de l'exposition par inhalation, 2) le placement optimal de capteurs de pollution de l'air pour mesurer les expositions par inhalation, et 3) l'ensemble des indicateurs permettant la détection de l'exposition par inhalation et de l'occupation dans les environnements de bureau.

Le Chapitre 3 propose des méthodes de substitution pour détecter les expositions personnelles par inhalation au dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et aux particules fines (PM) dans des environnements de bureau simulés avec une occupation en constante évolution. Trois techniques de détection par substitution ont été comparées aux mesures simultanées en zone respiratoire. Ces trois techniques sont 1) la surveillance stationnaire de la qualité de l'air intérieur, 2) les bracelets portables monitorant des données physiologiques et 3) les capteurs infrarouges passifs (PIR) détectant la présence humaine. La combinaison des trois techniques de substitution a permis d'améliorer de deux fois l'exposition au CO<sub>2</sub> par rapport à l'utilisation exclusive de capteurs stationnaires. Les moniteurs stationnaires de particules fines (PM) à proximité de la bouche de ventilation ont estimé avec précision l'exposition aux PM, tandis que les mesures de CO<sub>2</sub> à l'avant du bureau ont montré une précision modérée pour la détection de l'exposition au CO<sub>2</sub>.

Le Chapitre 4 étudie le placement optimal des capteurs afin de détecter l'exposition par inhalation dans des environnements de bureau simulés dans des conditions statiques et dynamiques. Dans ce chapitre, les emplacements appropriés pour une estimation précise de l'exposition sont identifiés, tout en tenant compte de la dynamique d'occupation. Les résultats démontrent qu'inclure la distinction entre une occupation statique/dynamique puis des activités assises/debout permet d'améliorer la précision de l'estimation de l'exposition. Des variables telles que la proximité des capteurs par rapport aux occupants ainsi que le débit et la stratégie de ventilation jouent un rôle significatif dans l'amélioration de la détection de l'exposition personnelle. Des capteurs de CO<sub>2</sub> déposés sur les bureaux et accrochés aux murs, ainsi qu'un capteur de particules fines suspendu au plafond, ont permis une estimation de l'exposition la plus précise.

Le Chapitre 5 explore les indicateurs permettant la détection de l'exposition et de l'occupation dans deux bâtiments de bureau de Suisse Romande. La méthode combine des mesures effectuées par des capteurs stationnaires, portables, à une analyse statistique par arbres de décision et de corrélations. L'occupation influence fortement les gradients de pollution de l'air dans les différents espaces de bureau, avec des niveaux de PM<sub>10</sub> plus élevés pendant les activités de déjeuner/café. Les capteurs de CO<sub>2</sub> déposés sur les bureaux ont efficacement détecté les expositions au CO<sub>2</sub>, aux PM<sub>2.5</sub> et PM<sub>10</sub> dans les bureaux en espace ouvert. Les niveaux de CO<sub>2</sub> au niveau des murs latéraux ont bien représenté l'occupation prolongée, tandis que les capteurs de PM<sub>10</sub> déposés sur les bureaux ont capté l'occupation transitoire. Un seul capteur de CO<sub>2</sub> s'est avéré être une

solution rentable pour estimer les expositions au CO<sub>2</sub>, aux PM<sub>2.5</sub> et aux PM<sub>10</sub>, ainsi que pour l'occupation. Les données sur la pollution de l'air intérieur ont démontré une puissance prédictive jusqu'à 4 fois plus importante pour l'estimer l'exposition et l'occupation par rapport aux données sur l'environnement intérieur.

Cette thèse propose des solutions d'optimisation pour l'estimation de l'exposition et de l'occupation avec des capteurs intelligents dans différentes configurations de bureaux et de scénarios d'occupation. Les résultats pourront être appliqués dans des conditions réelles de manière à améliorer la gestion de la qualité de l'air intérieur ainsi que le contrôle du système de chauffage, ventilation et d'air conditionné (HVAC) axé sur les occupants grâce à des techniques de surveillance intelligentes intégrées.

## Mots-clés

Qualité de l'air intérieur, Placement optimal de capteurs, Estimation de l'exposition par inhalation, Dynamiques d'occupation, Environnements de bureaux