



HAL
open science

Conception d'un système temps-réel de surveillance de l'exposition aux polluants de l'air intérieur : Application au formaldéhyde

Houssem Eddine Fathallah

► To cite this version:

Houssem Eddine Fathallah. Conception d'un système temps-réel de surveillance de l'exposition aux polluants de l'air intérieur : Application au formaldéhyde. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Université de Lorraine, 2016. Français. NNT : 2016LORR0100 . tel-01754675v2

HAL Id: tel-01754675

<https://theses.hal.science/tel-01754675v2>

Submitted on 21 Mar 2017

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.



Conception d'un système temps-réel de surveillance de l'exposition aux polluants de l'air intérieur : Application au formaldéhyde.

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 24 juin 2016

pour l'obtention du

Doctorat de l'Université de Lorraine

(mention Génie informatique, Automatique, Traitement du signal)

par

Housseem Eddine FATHALLAH

Composition du jury

Rapporteurs : M. Jean-Marc THIRIET Professeur, Université Joseph Fourier, Grenoble (Président)
M. Michel MISSON Professeur, Université d'Auvergne, Clermont Ferrand

Examineurs : M. Benoit HILT MDC, Université de Haute Alsace, Colmar
M. Stéphane LE CALVE Chargé de recherche, Université de Strasbourg
M. Eric RONDEAU Professeur, Université de Lorraine, Nancy (Directeur de thèse)
M. Vincent LECUIRE MDC, Université de Lorraine, Nancy (Co-Directeur de thèse)

Remerciements

Mes remerciements les plus sincères s'adressent en premier lieu à mes directeurs de thèse Eric Rondeau et Vincent Lecuire et mon encadrant de thèse Stéphane Le Calvé, qui m'ont accueilli au sein du laboratoire CRAN et ICPEES à l'Université de Lorraine et à l'Université de Strasbourg. En particulier je voudrais remercier Vincent, avec qui j'ai appris et vécu beaucoup de choses pas seulement au niveau professionnel, mais aussi au niveau personnel. A lui, mon admiration et mes remerciements les plus profonds.

Au cours de ces années j'ai fait parti de département « Ingénierie des Systèmes Eco-Techniques (ISET) » au sein du CRAN. Les discussions que j'ai pu avoir durant les réunions d'équipe ou en dehors m'ont beaucoup apporté. Je remercie donc toutes ces personnes. Je tiens à remercier l'équipe administrative et particulièrement Maryse Ferry et Sabine Huraux pour leur efforts à planifier mes missions durant la thèse.

Je remercie également mes collègues docteurs et doctorants avec qui j'ai partagé des très bon moments autour d'un café ou d'un petit déjeuner à la BSR ! et particulièrement Dr. Mario Lezoche, Dr. Jérémy Robert, Dr. Salah Deeb et le future Dr. Thomas Couchard!

Heureusement que mes parents, mes frères, mes sœurs et mon beau frère sont là pour me changer les idées. Ils ont tous cru en moi et ouf ! maintenant j'y suis ! Alors merci à vous tous, Fradj, Salma, Fatiha, Sana, Sondes, Ammouna, Mehdi, Souheil, Firas et Yahiya.

Mes derniers remerciements vont à ma chère femme Meriam qui a tout fait pour m'aider, qui m'a soutenu et surtout supporté dans tout ce que j'ai entrepris et à mon future Bébé Malek.

Je dédie cette thèse à ma Femme Meriam, à mon
future bébé Malek et à l'âme de mon beau-père
Noureddine.

Table des matières

| | |
|--|----------|
| INTRODUCTION GENERALE..... | i |
| <u>Chapitre 1 : Méthodes d'évaluation de l'exposition personnelle aux polluants de l'air</u> | |
| 1. Introduction | 2 |
| 2. Les polluants de l'air intérieur..... | 3 |
| 3. Les méthodes directes..... | 4 |
| 3.1 Les biomarqueurs..... | 4 |
| 3.2 Les échantillonneurs | 5 |
| 3.2.1 Les échantillonneurs passifs | 6 |
| 3.2.2 Les échantillonneurs actifs | 8 |
| 3.3 Synthèse..... | 9 |
| 4. Les Méthodes indirectes | 9 |
| 4.1 L'approche mesure - mesure | 10 |
| 4.2 L'approche modèle - modèle | 11 |
| 4.3 L'approche modèle - questionnaire..... | 12 |
| 5. Exemple de solutions de surveillance en temps réel | 13 |
| 5.1 Suivi de l'exposition par vidéosurveillance | 14 |
| 5.2 Systèmes portables pour le suivi de l'exposition personnelle..... | 15 |
| 6. Conclusion..... | 17 |
| <u>Chapitre 2 : Modélisation d'un système de surveillance en temps réel de l'exposition personnelle au formaldéhyde</u> | |
| 1. Introduction | 26 |
| 2. Le projet ANR CAPFEIN | 26 |
| 2.1 Le formaldéhyde..... | 28 |
| 2.2 Exposition au formaldéhyde dans la population..... | 29 |
| 2.3 Exposition au formaldéhyde dans le milieu professionnel | 29 |
| 2.4 Méthodes de mesures du formaldéhyde | 31 |
| 2.5 Cahier des charges du système | 33 |
| 2.6 Modèle conceptuel pour le suivi de l'exposition personnelle | 33 |
| 3. Modélisation du système | 35 |
| 3.1 Ingénierie système | 35 |
| 3.2 Méthodologie de conception d'un système..... | 36 |
| 3.3 Le standard EIA-632 | 36 |
| 3.3.1 Structure d'un système selon l'EIA-632 | 37 |
| 3.3.2 Les processus de conception du système | 38 |

| | |
|--|----|
| 3.3.3 Outil de modélisation..... | 39 |
| 3.4 Diagramme d'exigences | 39 |
| 3.5 Modélisation de la solution logique selon les recommandations de l'EIA-632 | 43 |
| 3.5.1 Diagramme de contexte | 43 |
| 3.5.2 Identification des services | 44 |
| 3.5.3 Diagramme des séquences | 48 |
| 3.5.4 Diagramme d'activités | 51 |
| 4. Conclusion..... | 52 |

Chapitre 3 : Etude comparative des solutions de localisation en intérieur

| | |
|---|----|
| 1. Introduction | 57 |
| 2. Les techniques de localisation en intérieur | 58 |
| 2.1 Les techniques de triangulation | 58 |
| 2.1.1 Localisation par mesure du temps d'arrivée | 59 |
| 2.1.2 Localisation par mesure des différences du temps d'arrivée | 60 |
| 2.1.3 Localisation par mesure des angles d'arrivée | 61 |
| 2.1.4 Localisation par mesure de la puissance du signal reçu | 63 |
| 2.2 Localisation par analyse de l'empreinte du signal | 64 |
| 2.3 Localisation par proximité | 66 |
| 2.4 Localisation par analyse visuelle | 70 |
| 3. Les critères d'évaluation d'un système de localisation intérieur | 71 |
| 3.1 Performances..... | 71 |
| 3.2 Robustesse et tolérance aux pannes | 71 |
| 3.3 Coût et complexité | 72 |
| 3.4 Sécurité et respect de la vie privée..... | 73 |
| 4. Synthèse..... | 73 |
| 5. Conclusion..... | 75 |

Chapitre 4 : Conception d'un système de surveillance en temps réel de l'exposition personnelle

| | |
|---|----|
| 1. Introduction | 79 |
| 2. Architecture et scénario retenus | 79 |
| 2.1 Modèle d'architecture de l'Internet des objets | 79 |
| 2.2 Scénario retenu | 81 |
| 2.3 Proposition d'un modèle de suivi de l'exposition personnelle basé sur l'IoT | 82 |
| 2.3.1 Description du modèle | 82 |
| 2.3.2 Architecture matérielle | 83 |
| 2.3.3 Architecture logicielle | 86 |

| | |
|---|-----|
| 3. Implémentation de la plateforme proposée | 87 |
| 3.1 Implémentation de service de mesure | 87 |
| 3.2 Implémentation du service de localisation..... | 88 |
| 3.3 Implémentation du service d'estimation de l'exposition personnelle moyenne..... | 90 |
| 3.4 Implémentation de service d'alerte | 92 |
| 3.5 Implémentation du service de stockage..... | 94 |
| 3.6 Implémentation du service de configuration..... | 96 |
| 4. Analyse et validation des données de la plateforme..... | 96 |
| 5. Conclusion..... | 103 |
| <u>Chapitre 5 : Surveillance de l'exposition personnelle par badge intelligent</u> | |
| 1. Introduction | 106 |
| 2. Principe de fonctionnement du badge intelligent | 107 |
| 2.1 Architecture du badge | 107 |
| 2.2 Mise en réseau et mode de communication | 109 |
| 3. Prototype développé | 111 |
| 3.1 Architecture matérielle du badge | 111 |
| 3.2 Algorithme de surveillance de l'exposition personnelle | 112 |
| 3.3 Protocole de communication | 114 |
| 3.3.1 Description du protocole de configuration..... | 115 |
| 3.3.2 Protocole de lecture du niveau d'exposition personnelle..... | 116 |
| 3.3.3 Protocole de lecture des concentrations de polluants | 116 |
| 3.4 Expérimentation et évaluation | 117 |
| 3.4.1 Conditions expérimentales | 117 |
| 3.4.2 Interprétation des résultats | 117 |
| 4. Contraintes relatives à l'approche par badge intelligent | 119 |
| 4.1 Etude sur la consommation d'énergie | 120 |
| 4.1.1 Unité d'alimentation : la batterie..... | 120 |
| 4.1.2 Unité de traitement : le microcontrôleur | 120 |
| 4.1.3 Unité de communication : le module Wi-Fi..... | 121 |
| 4.1.4 Unité de stockage : la mémoire flash..... | 121 |
| 4.2 Conclusion | 122 |
| 5. Optimisation de ressources du badge | 123 |
| 5.1. Mécanisme de conservation de l'énergie..... | 123 |
| 5.2. Mécanisme d'optimisation mémoire | 127 |
| 6. Expérimentation et évaluation..... | 129 |
| 6.1. Conditions expérimentales | 129 |

Table des matières

| | |
|--|------------|
| 6.2 Résultats en termes de précision de l'estimation | 130 |
| 6.3 Résultats en termes de coût d'énergie et de la mémoire | 133 |
| 7. Conclusion..... | 136 |
| CONCLUSION GENERALE | 138 |

INTRODUCTION GENERALE

La révolution industrielle qui a démarré tout d'abord au début XIXème siècle en Europe, puis aux Etats-Unis d'Amérique a eu pour effet une augmentation de la pollution de la terre, de l'eau et de l'air. Ce phénomène est désormais mondial et a eu aussi pour conséquence de changer le mode de vie des hommes qui s'installent dans les villes formant des mégapoles proches des industries polluantes. Outre les problèmes sur le réchauffement climatique induit par le rejet des gaz à effets de serre, la population urbaine vit dans une atmosphère viciée pouvant entraîner de graves problèmes de santé. Les villes sont donc maintenant surveillées pour mesurer en temps réel leur niveau de pollution de façon à alerter les citoyens et à prendre des actions pour ramener les taux de pollution à des valeurs acceptables. On peut citer les actions ponctuelles suivantes : la circulation alternée des voitures, la gratuité des transports en commun, la limitation du chauffage au bois, etc. Cependant cette pollution entre aussi dans les habitations et il est alors plus difficile d'analyser celle-ci maison par maison (figure 1). Une habitation est aussi émettrice de pollution car il faut la chauffer ou encore parce qu'elle est constituée d'éléments (colles, peintures,...) dégageant des émanations toxiques. Les bâtiments industriels de part leurs activités sont aussi des lieux sources de pollution de l'air. Finalement, les nouvelles constructions basses consommations ou dites à énergie positive peuvent amener à des solutions qui réduisent les échanges d'air avec l'extérieur et donc confiner encore plus la pollution dans les pièces d'habitation.

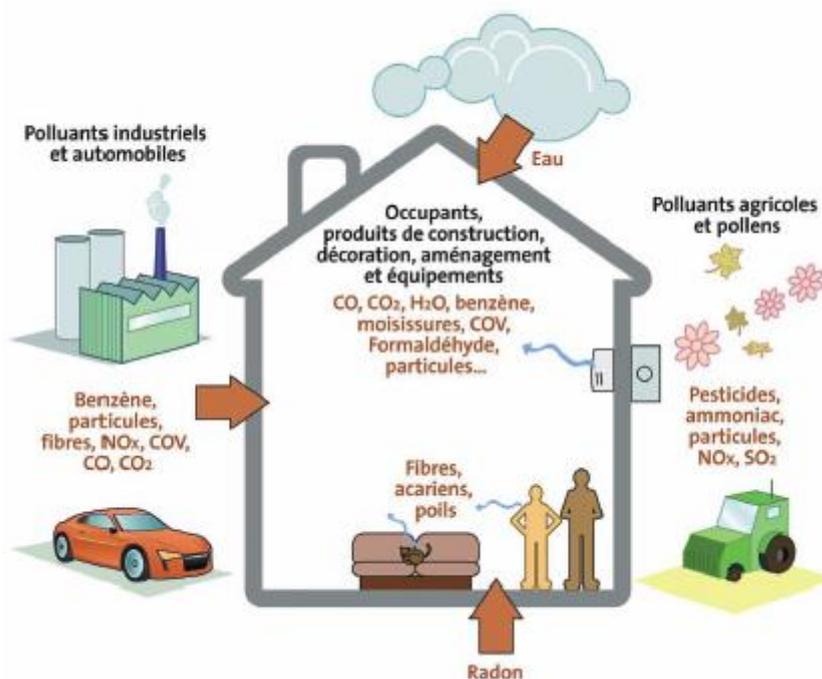


Figure 0.1 : Les sources de pollution de l'air intérieur

Aussi des législations sur la surveillance de l'air intérieur se mettent en place progressivement. Notamment, en France, le décret 2011-1728 du 2 Décembre 2011 impose de considérer la surveillance de la qualité de l'air intérieur dans les établissements recevant du public (ERP). Ce décret propose de mesurer en particulier le formaldéhyde, le benzène et le dioxyde de carbone (CO₂).

Dans ce contexte, notre travail de recherche va porter essentiellement sur le formaldéhyde car en 2004, le centre international de recherche sur le cancer l'a classé comme cancérogène de catégorie 1 et car il n'existe pas de système de mesure adapté sur le marché pour évaluer le taux d'exposition des personnes à ce polluant. Dans les habitations, le formaldéhyde est présent dans de nombreux produits et matériaux comme le bois, la papeterie, le cuir, les colles, la peinture, les produits d'entretien... Il est donc aussi fortement présent dans les entreprises qui fabriquent ces produits. Ces entreprises doivent donc avoir des moyens pour contrôler précisément la contamination des employés au formaldéhyde pour prévenir tout problème de santé et cela en respectant des seuils définis par des normes. Cela aura bien évidemment un impact sur l'organisation de travail et sur la conception de l'outil de travail (incluant le bâtiment). Pour ne pas rajouter des contraintes supplémentaires aux employés, il faudra que le dispositif de surveillance au formaldéhyde soit le moins invasif possible.

C'est dans ce contexte que le CRAN (Centre de Recherche en Automatique de Nancy) a participé au projet CAPFEIN « réseau de CAPteurs de FormaldEhyde intelligents pour la surveillance de l'air INtérieur » financé par l'Agence National de la Recherche (ANR). L'objectif de ce projet qui a démarré en 2013 est de développer un système intelligent permettant d'évaluer l'exposition personnelle au formaldéhyde mais aussi à d'autres sources de pollution atmosphérique dans les environnements publics clos (école, crèche, établissement recevant du public (ERP), etc...) et dans les milieux professionnels (bureau, hôpital, usine, etc...). Ce projet de recherche regroupant des chercheurs en chimie et en génie informatique est décomposé en trois parties :

- Le développement d'un capteur permettant la mesure des concentrations de formaldéhyde dans les environnements clos associant précision et sélectivité au formaldéhyde.
- La mise en œuvre d'un système de localisation d'une personne dans un espace interne à une structure (bâtiment, maison, usine, etc...).

- La conception du système de communication intelligent capable d'évaluer l'exposition personnelle à la pollution de l'air en couplant des données fournies par des capteurs de formaldéhyde et d'autres polluants et des informations de localisation des personnes en temps réel.

La contribution de cette thèse porte sur ce dernier point en axant nos propositions pour les milieux professionnels. Ce mémoire de thèse est organisé en cinq chapitres et d'une conclusion générale :

Le chapitre 1 donne d'abord un état de l'art, à travers une étude bibliographique, sur les méthodes pour évaluer l'exposition personnelle aux polluants de l'air. Il fournit une classification de ces méthodes en deux groupes. Les méthodes directes basées sur des analyses « off-line » dans les laboratoires et les méthodes indirectes reposant sur l'approche d'évaluation par microenvironnement. Ce chapitre fait aussi un inventaire sur les travaux et les solutions les plus représentatifs pour surveiller en temps réel le taux d'exposition des personnes. Le second chapitre est consacré à la phase de spécification et de modélisation d'un dispositif de surveillance du taux d'exposition des personnes à des polluants. Ce chapitre est décomposé en deux grandes parties. Dans la première partie, nous présentons les enjeux du projet CAPFEIN et la méthode que nous proposons pour la surveillance de l'exposition personnelle au milieu professionnel. La deuxième présente notre solution logique en se basant sur une méthodologie d'Ingénierie Système pour identifier les exigences de parties prenantes et définir les services nécessaires.

Le chapitre 3 est une étude comparative des solutions de localisation à l'intérieur d'un bâtiment sachant que la surveillance de l'exposition des personnes repose sur deux informations, les mesures de concentrations des polluants dans l'air et la localisation des personnes dans un milieu clos, l'objectif de ce chapitre est d'identifier les solutions de localisation qui répondent aux exigences de la solution logique que nous avons proposé pour le système de surveillance. Ces solutions ont été classées en cinq catégories selon les techniques de localisation qu'elles utilisent, à savoir les techniques par triangulation du signal, par analyse de l'empreinte du signal, par proximité et par analyse visuelle.

Les deux derniers chapitres regroupent nos contributions pour le projet CAPFEIN. Le quatrième chapitre développe une première solution qui repose sur le concept de l'Internet des Objets. C'est-à-dire que les informations de pollution et de localisation sont produites par des dispositifs distribués (Objets) qui sont ensuite traitées par un ou plusieurs serveurs. Le serveur

pourra se trouver dans l'entreprise ou chez le prestataire (par Internet). L'intérêt de cette solution est de permettre de passer d'une offre de produits (tout est installé chez le client) à une offre de services (le serveur est chez le prestataire). Cette offre de services pourra être modulée en fonction des contrats commerciaux. Cette première solution utilise uniquement des produits « sur étagère » et son originalité tient donc dans l'architecture globale du système. Ce chapitre se termine par une expérimentation en grandeur nature.

Le cinquième chapitre propose une deuxième solution qui consiste à concevoir un badge intelligent que portera chaque employé. Il est dit intelligent car il est capable de calculer en temps réel le taux d'exposition aux polluants du porteur du badge et d'alerter les personnes compétentes en cas de dépassement de seuil. Ce chapitre présente la conception du badge entièrement réalisé au CRAN et des mécanismes d'optimisation pour rendre viable cette solution. En effet contrairement à une architecture centralisée (chapitre 4) où les traitements se font dans un serveur, le badge intelligent a des capacités de calcul et d'autonomie limitées qu'il faut considérer lors de sa conception. L'optimisation est faite sur le choix des composants matériels, sur la gestion de ses composants (modes sommeil/actif) et sur les techniques de calcul du taux d'exposition. Ce dispositif est testé aussi en grandeur nature.

Ce document se termine par des conclusions et des perspectives par rapport aux deux solutions proposées.

Chapitre 1 : Méthodes d'évaluation de l'exposition personnelle aux polluants de l'air

| | |
|--|----|
| 1. Introduction | 2 |
| 2. Les polluants de l'air intérieur..... | 3 |
| 3. Les méthodes directes | 4 |
| 3.1 Les biomarqueurs..... | 4 |
| 3.2 Les échantillonneurs | 5 |
| 3.2.1 Les échantillonneurs passifs..... | 6 |
| 3.2.2 Les échantillonneurs actifs..... | 8 |
| 3.3 Synthèse..... | 9 |
| 4. Les Méthodes indirectes | 9 |
| 4.1 L'approche mesure - mesure..... | 10 |
| 4.2 L'approche modèle - modèle | 11 |
| 5. Exemple de solutions de surveillance en temps réel | 13 |
| 5.1 Suivi de l'exposition par vidéosurveillance..... | 14 |
| 5.2 Systèmes portables pour le suivi de l'exposition personnelle | 15 |
| 6. Conclusion..... | 17 |

1. Introduction

La pollution de l'air est un type de pollution caractérisé par une altération des niveaux de la qualité et de la pureté de l'air. En France, elle est définie dans l'article L220-2 du code de l'environnement comme « l'introduction par l'homme, directement ou indirectement ou la présence, dans l'atmosphère et les espaces clos, d'agents chimiques, biologiques ou physiques ayant des conséquences préjudiciables de nature à mettre en danger la santé humaine, à nuire aux ressources biologiques et aux écosystèmes, à influencer sur les changements climatiques, à détériorer les biens matériels, à provoquer des nuisances olfactives excessives ».

Une mauvaise qualité de l'air peut avoir des effets nocifs sur la santé : allergies, sécheresse et irritation des yeux, du nez, de la gorge et de la peau, migraines, essoufflement, nausées sont les principaux maux causés par une exposition faible et prolongée à long terme ou par une exposition ponctuelle aiguë à court terme. Une exposition à des polluants atmosphériques, même légère, mais sur une longue période peut être une source d'apparition de maladies cardiovasculaires et de risques de cancer. Plusieurs études sur des populations à l'échelle de métropoles ou de régions montrent que des épisodes de pollution atmosphérique aiguë sur quelques jours entraînent une augmentation des hospitalisations notamment due à une hausse des crises cardiaques [1, 2, 3].

Aujourd'hui, les grandes agglomérations font des mesures en continu de la qualité de l'air pour évaluer les risques sanitaires liés à l'exposition de leur population aux polluants atmosphériques et engager des actions de prévention au besoin (circulation alternée, vitesse limitée, etc...). Toutefois, l'exposition propre à un individu, on parle alors d'exposition personnelle, est plus difficile à évaluer car elle dépend de ses activités durant la journée (chemin, moyen de transport, lieu de travail, etc...). L'exposition personnelle peut être définie comme le contact entre l'individu et un contaminant dans l'air à une concentration donnée pendant une période de temps donnée. L'évaluation de l'exposition personnelle devient une nécessité dans la conduite des études épidémiologiques et d'évaluation quantitative du risque sanitaire étant donné que la conclusion d'estimation du risque, ainsi que les interventions de santé publique visant à protéger la santé, découlent principalement de cette étape [4].

Dans ce chapitre, nous présentons les différentes méthodes existantes pour évaluer l'exposition personnelle aux polluants de l'air, avec pour objectif d'identifier celles qui sont les plus adaptées à l'utilisation au milieu professionnel dans le contexte de la protection de la santé au travail. Ce chapitre est composé de 5 parties. La section 2 présente les principaux polluants

de l'air intérieur et leurs effets sur la santé. Les méthodes directes d'évaluation de l'exposition personnelle sont présentées dans la section 3 et les méthodes indirectes dans la section 4. La section 5 montre des solutions de suivi en temps réel de l'exposition personnelle à des polluants dans l'air qui ont été proposées dans le cadre de projets de recherche.

2. Les polluants de l'air intérieur

La pollution de l'air a été responsable d'environ 7 millions de décès prématurés dans le monde en 2012 selon un rapport de l'Organisation Mondiale de la Santé [5]. Plus de la moitié sont dues à la pollution intérieure avec un total de 3,7 millions de décès prématurés liés à la pollution de l'air intérieur et 2,6 millions de décès prématurés liés à la pollution de l'air extérieur. Selon le rapport ECA N°23 de l'Union Européenne, nous passons en moyenne entre 80 et 90% de notre temps dans des environnements clos : habitat, locaux de travail, moyens de transport, dans lesquels nous pouvons être exposés à de nombreux polluants. La qualité de l'air intérieur se distingue de celle de l'air extérieur par des concentrations 5 fois supérieures et par la présence de polluants qu'on ne trouve pas en extérieur.

Les polluants de l'air intérieur peuvent être classés en quatre catégories : les polluants chimiques, les polluants biologiques, les particules et fibres et le gaz radioactif. Ils sont répertoriés dans le tableau 1.1.

Tableau 1.1 : Les polluants de l'air intérieur les plus courants et leurs origines (« un air sain chez soi »)

| Polluants | Origines possibles |
|--|--|
| COV (composés organiques volatils) | |
| Formaldéhyde | Panneaux de particules, aggloméré, mousses isolantes, moquettes, textiles, colles, peintures, cosmétiques, fumée de tabac... |
| Ethers de glycol | Certaines peintures « à l'eau », encres, vernis, colles, produits d'entretien, diluants, cosmétiques... |
| Hydrocarbures (benzène, toluène, xylène, octane ...) | Produits de bricolage, meubles, fumée de tabac, peintures, vernis, colles, encres, moquettes, insecticides, matières plastiques, isolants, détachants... |
| CO (monoxyde de carbone) | Appareils de chauffage et de production d'eau chaude par combustion mal réglés ou peu performants, fumée de tabac. |
| NO _x (oxydes d'azote) | Combustions divers (gazinière, chauffe-eau au gaz, chauffage au bois, fumée de tabac...) |
| Pesticides | Produits de traitement du bois, produits de traitement des plantes et des animaux domestiques, insecticides... |
| Légionnelles | Prolifération dans les réseaux d'eau chaude (entre 25 et 45 ° C), systèmes de climatisation, tours aéro-réfrigérantes etc... |
| Allergènes de moisissures | Prolifération dans une ambiance humide, chaude et mal aérée |

| | |
|------------|---|
| Particules | Air extérieur (pollens, gaz d'échappement, fumées diverses...), spores de moisissures, fumée de tabac, chauffage au bois ou au fioul |
| Fibres | Laines minérales, végétales ou animales pour l'isolation, amiante, matériaux de couverture ou de revêtement, canalisations et conduites, textiles |
| Randon | Émanations des sous-sols granitiques et volcaniques et de certains matériaux de construction |

Les composés organiques volatils (COV) représentent une part importante des polluants chimiques. Les plus préoccupants pour la santé sont le formaldéhyde, les éthers de glycol et les hydrocarbures dont certains sont cancérigènes. On les retrouve dans les environnements contenant des bois traités. Les colles, les peintures, les produits d'entretien et les produits cosmétiques sont aussi des sources classiques de COV. Les autres sources de pollution de l'air intérieur sont les polluants biologiques (légionnelles, moisissures, etc...), les particules et les fibres, ainsi que le gaz radioactif.

3. Les méthodes directes

Les méthodes directes consistent à mesurer le niveau d'exposition d'une personne à un polluant à partir de prélèvements sur cette personne. Ces méthodes se divisent en deux sortes : celles qui mesurent la dose de polluant absorbée par la personne et celles qui mesurent la dose de polluant en contact avec la personne. Les premières consistent à prélever des liquides (sang, urine) ou des tissus biologiques (cheveux) sur le corps humain puis à analyser en laboratoire la concentration de polluant ou de ses métabolites. Ces méthodes sont basées sur des biomarqueurs. Les autres consistent à prélever l'air en contact avec la personne à l'aide d'un instrument de « piégeage » porté par la personne, appelé échantillonneur.

3.1 Les biomarqueurs

Les biomarqueurs ou marqueurs biologiques permettent de mesurer l'exposition d'une personne à des polluants de l'air en caractérisant la dose de polluant absorbée par un individu. Les biomarqueurs reflètent une interaction entre un polluant dans l'air et un système biologique (sang, urines, cheveux, salive...) [6]. L'utilisation de marqueurs biologiques pour surveiller l'exposition de l'homme aux polluants en mesurant les concentrations de polluants ou de leurs métabolites dans les systèmes biologiques est désignée sous le terme de biosurveillance humaine (Human biomonitoring) [7].

Les marqueurs biologiques se divisent en marqueurs de l'exposition et marqueurs de l'effet du polluant sur l'organisme. Un marqueur de l'exposition reflète la concentration d'un polluant

dans l'organisme et permet d'estimer la « dose interne ». Un très grand nombre d'études utilisant des biomarqueurs pour mesurer l'exposition personnelle à des polluants dans l'air ont été effectuées. Ehrenberg et Odterman [8] ont été parmi les premiers à utiliser les biomarqueurs pour estimer quantitativement l'exposition et prédire les risques relatifs de cancer. Depuis, un nombre important de biomarqueurs ont été découvert en utilisant l'épidémiologie moléculaire. Shaham et al. [9] ont conclu que les niveaux de liaisons entre protéine-ADN dans les globules blancs peuvent fournir une indication d'une lésion tissulaire induite par l'exposition au formaldéhyde dans l'air. Talaska et al. [10] ont constaté que des adduits à l'ADN et aux protéines sont des marqueurs efficaces pour estimer l'exposition personnelle à des mélanges de particules qui contiennent des hydrocarbures aromatiques polycycliques. Durand et al. [11] ont utilisé des échantillons d'urine avant exposition et après exposition pour estimer le niveau d'exposition personnelle aux gaz volcaniques et ont suggéré que l'aluminium et le rubidium peuvent être utilisés comme marqueurs utiles pour estimer l'exposition aux gaz volcaniques. Ayi Fanou et al. [12] ont montré qu'une bonne corrélation existe entre les concentrations atmosphériques de benzène et celles de l'acide S-phénylmercapturique urinaire.

Le principal avantage de la biosurveillance humaine réside dans le fait que l'on obtient une mesure de l'exposition personnelle totale à des polluants dans l'air en intégrant la contribution de toutes les sources directement liées au comportement individuel. Les marqueurs biologiques permettent une meilleure prévision des effets sur la santé comparativement aux mesures externes. Cependant, si l'utilisation de biomarqueurs est intéressante, elle a ses limites. Une des premières limites est que l'utilisation de ces marqueurs biologiques ne permet pas d'identifier la source ou la voie d'exposition. En effet, le polluant peut être présent dans de nombreux milieux et la mesure de l'exposition personnelle intègre l'ensemble des voies et sources d'exposition. Aussi, des études ont utilisé un questionnaire accompagnant la mesure du biomarqueur pour identifier les sources et les voies d'exposition. Mais l'identification n'est pas toujours garantie. Les autres limites de cette méthode concernent le nombre restreint de polluants pouvant être surveillés par des biomarqueurs, l'impossibilité de surveiller en continu et en temps réel l'exposition personnelle, le coût élevé des prélèvements et des analyses ainsi que les contraintes éthiques que ce type de prélèvement engendre.

3.2 Les échantillonneurs

Un échantillonneur est un instrument porté par la personne servant à piéger l'air en contact. Un réactif chimique contenu dans l'échantillonneur permettra de mesurer en laboratoire la dose de polluant auquel la personne a été exposée pendant la durée d'utilisation. On distingue deux

types d'échantillonneurs qui sont le plus utilisés dans les études épidémiologiques : les échantillonneurs passifs (*passive samplers*) et les échantillonneurs actifs (*active samplers*).

3.2.1 Les échantillonneurs passifs

L'utilisation des échantillonneurs passifs pour la mesure de l'exposition de la personne à des polluants de l'air date des années 1980. Yanagisawa et Nishimura [13] ont été parmi les premiers à développer un échantillonneur passif sous la forme d'un badge personnel pour estimer l'exposition de la personne au monoxyde d'azote (NO) et au dioxyde d'azote (NO₂) dans l'air intérieur. L'échantillonnage passif est basé sur les principes de diffusion moléculaire des polluants atmosphériques. Les molécules de polluants sont collectées lorsqu'elles rentrent en contact avec un agent réactif. En général, l'agent réactif est un matériau absorbant ou un filtre imprégné d'une substance adéquate, réagissant avec un polluant déterminé. La vitesse ou débit de prélèvement est le paramètre principal d'un dispositif d'échantillonnage passif qui repose sur le principe physique de la diffusion. Le débit représente la quantité d'air absorbée en fonction du temps. Ce débit de prélèvement dépend de trois paramètres : le composé et l'absorbant, la concentration et le temps d'échantillonnage et enfin la température ambiante lors du prélèvement.

Il existe principalement deux types d'échantillonneurs passifs : les tubes axiaux et les tubes radiaux. Les tubes axiaux sont principalement de type Perkin Elmer (Figure 1.1a). Ce type d'échantillonneur passif est caractérisé par une longueur assez importante et une petite section au niveau de la tête de diffusion. Le débit d'échantillonnage est donc relativement faible, de l'ordre de quelques mL.min⁻¹[14]. Les tubes à symétrie radiale « Radiello® » sont les échantillonneurs passifs les plus répandus (Figure 1.1b). La cartouche contenant l'absorbant est introduite dans un corps cylindrique, l'absorption se fait sur toute la surface du cylindre et pas uniquement sur l'extérieur. Les tubes radiaux sont bien adaptés pour des prélèvements de courtes durées car ils ont un débit plus élevé de l'ordre, de plusieurs dizaines de mL.min⁻¹. Ce type de tubes permet de mesurer des concentrations faibles de polluant dans l'air même s'ils ont une incertitude de mesure importante.

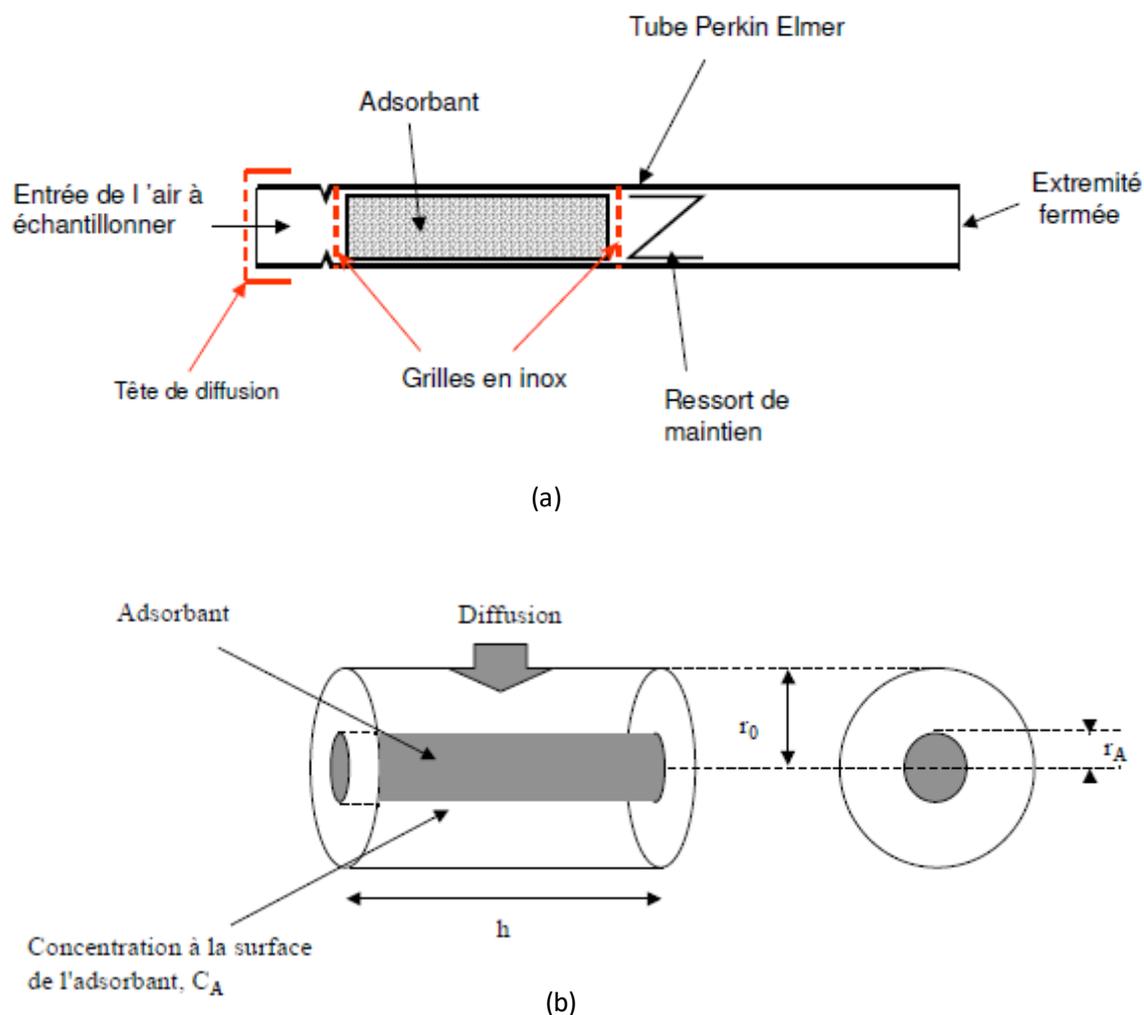


Figure 1.1 : Principe du tube passif axial (a) et radial (b) source [15]

Plusieurs études épidémiologiques ont utilisé des échantillonneurs passifs pour estimer l'exposition personnelle à des polluants atmosphériques. Pour estimer l'exposition personnelle au NO₂ par exemple, certains travaux [16, 17, 18, 19, 20] ont utilisé des tubes axiaux (ex : Palmes, Passam) tandis que d'autres [21, 22, 23, 24] ont utilisé des tubes radiaux (ex : Ogawa, Radiello).

Des échantillonneurs passifs ont aussi été utilisés pour étudier l'exposition de la personne à des composés organiques volatils [25, 26, 27]. Pour les aldéhydes dont le formaldéhyde, les échantillonneurs passifs utilisés dans les études de la qualité de l'air sont des cartouches de silice ou d'acier inoxydable imprégnées de 2,4-dinitrophénylhydrazine (DNPH) ou de bisulfate de sodium [26, 28, 29, 30]. La durée de prélèvement peut varier de quelques heures à plusieurs jours, voire plusieurs semaines.

3.2.2 Les échantillonneurs actifs

Le deuxième mode de prélèvement qui peut être employé pour mesurer l'exposition personnelle à des polluants dans l'air est l'échantillonnage actif. La principale différence des échantillonneurs actifs est qu'ils fonctionnent par pompage d'air, assuré par une micro-pompe, au travers d'une cartouche contenant un support absorbant ou imprégné d'une substance chimique ou au travers de filtres (Figure 1.2). Le débit d'air qui traverse le tube est beaucoup plus important et régulier que celui des échantillonneurs passifs. Par conséquent, ils permettent des prélèvements beaucoup plus courts et plus précis que les échantillonneurs passifs. Les inconvénients des échantillonneurs actifs résident dans le besoin d'une alimentation externe et le bruit de la micro-pompe. Le tableau 1.2 fournit une comparaison entre les techniques de prélèvement actif et passif.

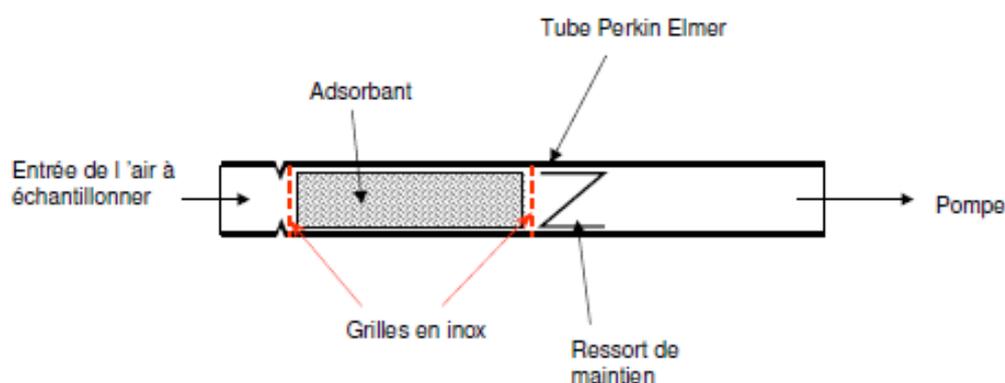


Figure 1.2 : Principe de tube actif source [15]

Tableau 1.2 : Echantillonnage actif vs échantillonnage passif

| | Echantillonnage Actif | Echantillonnage Passif |
|----------------------|---|--|
| Avantages | <ul style="list-style-type: none"> -Large gamme d'absorbants disponibles -Mesure précise de la concentration -Large gamme de composés quantifiables | <ul style="list-style-type: none"> -Silencieux, discret -Mesures intégrées de quelques polluants cibles |
| Inconvénients | <ul style="list-style-type: none"> -Utilisation d'une pompe = bruit -Prise électrique ou pile -Technicien nécessaire -Emission de polluants possibles avec certaines pompes -Pas de surveillance en temps réel | <ul style="list-style-type: none"> -Connaissance des débits d'échantillonnage du préleveur -Influence d'interférents -Possibilité de rétro diffusion ou compétition sélective sur adsorbant -Pas de surveillance en temps réel |

Kumar et al. [31] utilisent un échantillonneur actif à base d'un filtre et une pompe de débit de $1\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ pendant une durée de six heures pour mesurer le NO_2 dans l'air. Les tubes Tenax TA ou Tenax GR sont généralement utilisés pour mesurer les COV dans l'air, les débits varient entre $0,02\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ et $1\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ pour une durée d'échantillonnage de 30 min à 48 heures [32, 33,

34]. Pour les aldéhydes incluant le formaldéhyde, les débits de prélèvement varient entre 0,5 et 6,1L.min⁻¹ sur une durée de 20 min à 48 heures [17, 35, 36].

3.3 Synthèse

Après le prélèvement, les composés sont analysés en différé en laboratoire pour quantifier les concentrations de polluants dans l'air. En fonction des techniques de prélèvement, les concentrations sont calculées différemment. Ces méthodes permettent de mesurer une concentration moyenne sur toute la durée de prélèvement. Elles sont adaptées pour la détermination d'une moyenne d'exposition mais ne permettent pas la surveillance en temps réel de l'exposition personnelle à des polluants dans l'air.

Des échantillonneurs passifs sont commercialisés et utilisés dans de nombreuses applications, mais leur débit de prélèvement n'est pas toujours validé. Les valeurs de concentrations de polluants dans l'air mesurées en utilisant ces échantillonneurs peuvent donc être assez approximatives et avoir une faible précision. De plus, il y a une possibilité de rétro diffusion sur l'absorbant qui engendre une faible sélectivité. Les échantillonneurs actifs permettent de mesurer avec plus de précision les concentrations de polluants dans l'air mais le bruit de la pompe peut être dérangerant pour la personne qui porte le dispositif et certaines pompes émettent des polluants dans l'air. Des études ont aussi montré que le bruit des pompes pouvait influencer sur le comportement des travailleurs [37].

4. Les Méthodes indirectes

Les méthodes indirectes consistent à estimer le niveau d'exposition personnelle à des polluants en combinant des informations sur la distribution spatiale des concentrations de ces polluants dans l'air (c'est-à-dire en différents points) et les activités de la personne. Dans leur quotidien en effet, les individus se déplacent naturellement d'un endroit à l'autre et ils fréquentent donc des lieux différents pendant des périodes de temps différentes. Ils sont exposés à des concentrations de polluants atmosphériques variables dans le temps et l'espace durant la journée.

Ces méthodes se basent sur le concept de microenvironnement. Le terme microenvironnement a été défini par Duan en 1982 comme un volume dans l'espace ayant une concentration homogène en polluant [38]. Parmi les microenvironnements les plus couramment utilisés pour estimer l'exposition personnelle à des polluants de l'air, on distingue les ambiances

extérieures, l'intérieur de l'habitation, le lieu de travail, les transports ainsi que des lieux spécifiques (restaurants, magasins, etc...) [39, 35, 40, 41].

Le niveau des polluants de l'air dans un microenvironnement donné peut soit être mesuré par des instruments, soit être estimés par des modèles de la variation des concentrations en fonction de paramètres d'entrée. De même, les déplacements de la personne peuvent soit être mesurés en utilisant un système de géolocalisation, soit être estimés en utilisant des modèles d'activité, soit être identifiés à l'aide de questionnaires.

Les méthodes indirectes peuvent être classifiées en trois approches : la première s'appuie sur les mesures de concentration des polluants et sur des mesures de localisation des personnes. Elle sera qualifiée d'approche mesure – mesure. La deuxième s'appuie sur des modèles aussi bien pour estimer la concentration des polluants que l'activité des personnes. Elle sera donc qualifiée d'approche modèle – modèle. La dernière, qualifiée d'approche modèle – questionnaire, s'appuie sur des modèles pour estimer la concentration des polluants et sur des questionnaires pour identifier l'activité des personnes.

4.1 L'approche mesure - mesure

L'approche mesure - mesure se base sur le concept de microenvironnements (ME). Cette approche est utilisée dans plusieurs études épidémiologiques comme un moyen de liaison entre exposition et espace spécifique homogène. L'estimation de l'exposition personnelle moyenne sur une période donnée peut être vue comme des expositions subies dans les microenvironnements visités par la personne (Equation 1) pondérée par le temps passé dans les différents microenvironnements (Equation 2).

$$E_i = \sum_{j=1}^m T_{ij} C_j \quad (1)$$

E_i est l'exposition personnelle totale pondérée dans le temps (*Individual time-weighted integrated exposure*), T_{ij} est le temps passé par l'individu i dans le microenvironnement j , C_j est la concentration de polluant dans le microenvironnement j et m est le nombre de microenvironnements visités par l'individu i dans un temps donné [39, 42, 43].

$$E_{TWAi} = \frac{\sum_{j=1}^m T_{ij} C_j}{\sum_{j=1}^m T_{ij}} \quad (2)$$

E_{TWai} est l'exposition personnelle moyenne pondérée dans le temps (*Individual time-weighted average exposure*). Pour calculer ces expositions, des équipements de mesure de la qualité de l'air sont généralement placés dans les différents microenvironnements fréquentés par les gens.

Pour diminuer le coût d'implémentation, on utilise souvent un nombre limité de microenvironnements. [40, 41, 42] ont étudié les relations entre les concentrations de polluants observées dans les microenvironnements et l'exposition personnelle. Cela permet de savoir si les microenvironnements ont été bien choisis.

L'approche mesure – mesure est pratique pour estimer l'exposition personnelle à des polluants atmosphériques sur un grand nombre d'individus tout en permettant une analyse plus fine aux niveaux des différents microenvironnements. En contrepartie, une des contraintes de cette approche est qu'il faut être capable de lier dans chaque microenvironnement les concentrations de polluants de l'air avec la présence des personnes. La caractérisation de la mobilité spatio-temporelle de la personne est donc obligatoire pour estimer correctement l'exposition personnelle.

4.2 L'approche modèle - modèle

Selon l'OMS, la modélisation de l'exposition est une représentation logique ou empirique qui permet d'estimer l'exposition personnelle ou d'une population à des polluants atmosphériques à partir de données disponibles à l'entrée du modèle [44]. Les modèles permettent de comprendre et de prédire les risques sanitaires. L'objectif de ces modèles est de refléter l'exposition individuelle réelle aux polluants atmosphériques en fonction du temps et d'évaluer ainsi les niveaux de risques liés à l'exposition [45]. Plusieurs modèles ont été développés ces dernières années pour estimer l'exposition personnelle à des polluants dans l'air. Ces modèles sont généralement classés en trois groupes : (i) les modèles déterministes basés sur des données statistiques, (ii) les modèles déterministes basés sur des données personnelles et (iii) les modèles probabilistes.

Burke et al. [46] ont développé un modèle d'estimation d'exposition moyenne d'une personne « *Stochastic Human Exposure and Dose Simulation (SHEDS)* ». Ce modèle se base sur des mesures de concentration à des polluants atmosphériques à l'aide de stations fixes à l'extérieur, d'un modèle d'échange d'air (extérieur, intérieur) pour estimer la concentration des polluants d'air à l'intérieur et des données sur l'activité individuelle provenant de la base de données de l'agence américaine de protection de l'environnement « *Consolidate Humain*

Activity Database (CHAD) ». L'exposition personnelle est estimée en multipliant le temps passé dans chaque environnement par la concentration de polluants dans cet environnement. En se basant sur la base de données, les personnes possédant les mêmes caractéristiques se verront attribuer la même activité, ce qui est un inconvénient de cette approche.

Möler et al. [47] ont proposé un modèle micro-environnemental d'exposition « *MicroEnvironmental Exposure Model (MEEM)* ». L'objectif de ce modèle est de simuler l'exposition personnelle au NO₂ en combinant le modèle d'activités espace-temps et les concentrations extérieures et intérieures de polluant dans l'air à l'aide de deux modèles respectivement : « *Land Use Regression (LUR)* » [48] et « *INDAIR* » [49].

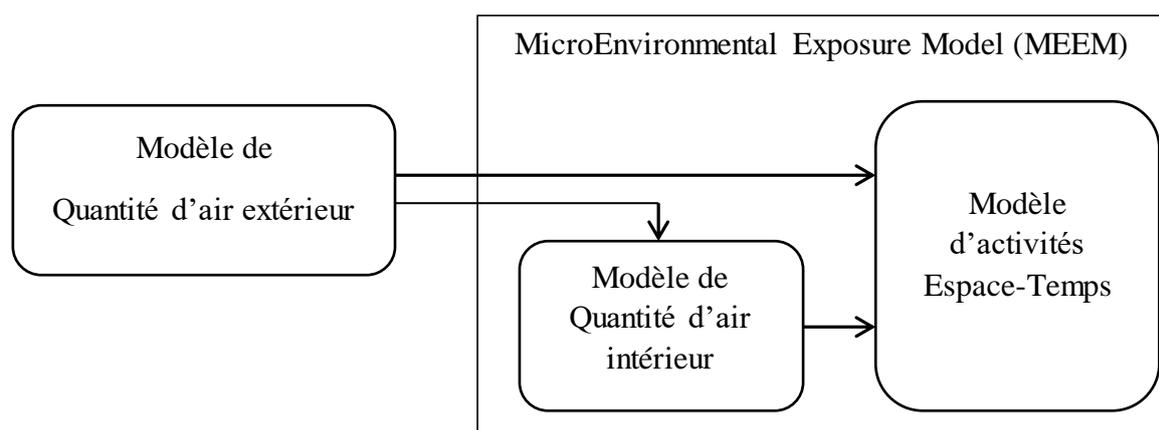


Figure 1.3: Modèle d'exposition MEEM

D'autres modèles d'estimation de l'exposition personnelle à des polluants atmosphériques ont été développés [50, 51, 52, 53]. Ces modèles permettent de prédire l'exposition à long terme à des concentrations faibles en prenant en compte des caractéristiques individuelles (âge, sexe, fonction respiratoire, etc...) par des outils statistiques. Néanmoins, la modélisation est une approche simplifiée de la réalité. Les résultats fournis sont étroitement liés aux hypothèses et à la qualité des données d'entrée. Pour évaluer l'exposition personnelle, le nombre d'informations à manipuler est considérable, des sources d'erreurs peuvent apparaître dans ces modèles à différents niveaux. Les résultats des modèles identifiés sont donc à manipuler avec précaution du fait des nombreuses incertitudes et simplifications auxquels ils sont liés.

4.3 L'approche modèle - questionnaire

Dans les études épidémiologiques environnementales, les questionnaires peuvent être utilisés pour évaluer l'exposition à des polluants lorsqu'aucune source d'information n'est disponible sur le déplacement des personnes et lorsque l'on n'a pas de capteurs pour mesurer

la pollution. Les questionnaires portent sur la présence de sources de contaminants dans l'air et non sur la quantification des niveaux de polluants. Ces questionnaires peuvent être utilisés seuls ou en combinaison avec d'autres sources de données durant des campagnes de mesures. Les questionnaires peuvent être adressés par voie postale [54], remplis par un enquêteur au cours d'une rencontre directe avec l'individu [55] ou auto-administrés [56, 57]. Les journaux d'activités quotidiennes et les questionnaires sont des outils couramment utilisés pour estimer de la mobilité spatio-temporelle de la personne dans les études d'estimation de l'exposition personnelle à des polluants dans l'air [58]. On peut citer l'étude TEAM [59] et l'étude EXPOLIS [40] qui fournissent une base de données européenne de budget espace-temps sur les jours de travail des adultes dans sept villes européennes. Habituellement, l'estimation de budget espace-temps à l'aide de questionnaires se fait sur papier [60] et est parfois combiné avec un entretien téléphonique [61, 62]. Cela prend du temps et entraîne des erreurs. Des études plus récentes utilisent des questionnaires sur des petits appareils électroniques tels que les téléphones mobiles ou PDA « Personal Digital Assistant » [41, 63, 64].

Une formation d'utilisation de ces équipements électroniques est nécessaire avant la collecte de données introduisant de ce fait une complexité supplémentaire. L'un des problèmes liés aux questionnaires (papier ou électroniques) est le choix de questions. Ces questions peuvent être une source de confusion. Il peut arriver que la personne rencontre des difficultés à comprendre des questions complexes ou mal formulées. De plus, des questions n'appelant qu'une réponse par oui ou par non ne permettent pas de recueillir des informations suffisamment pertinentes. Il est possible que les souvenirs de la personne soient inexacts. Une autre difficulté est la barrière linguistique dans le cas où les questions ne sont pas écrites dans la langue maternelle de la personne [65].

Les résultats obtenus par questionnaires peuvent être testés par comparaison avec d'autres méthodes d'estimation d'exposition personnelle, ou par l'observation chronologique des activités ou encore par des enregistrements passés de l'exposition. Cette approche ne permet pas de surveiller en temps réel l'exposition personnelle à des polluants atmosphériques ni de prévenir les risques sanitaires liés aux dépassements de seuils d'exposition.

5. Exemple de solutions de surveillance en temps réel

Récemment, le développement des technologies de communication et de l'information a donné naissance à des approches temps réel de suivi de l'exposition personnelle à la pollution atmosphérique en utilisant des instruments de mesure directe qui permettent de connaître

instantanément les concentrations de polluants dans l'air. La mesure en temps réel des polluants constitue une aide précieuse pour évaluer au cours du temps les niveaux d'exposition personnelle dans les milieux clos (bureau, bâtiment, maison, école, hôpital, etc...). Cette section présente les différentes solutions existantes qui sont basées sur l'utilisation des instruments de mesure directe.

5.1 Suivi de l'exposition par vidéosurveillance

Cette approche consiste à prendre un enregistrement vidéo d'un travailleur pendant l'exécution de son travail pour connaître son emplacement et de mesurer son exposition aux polluants en utilisant un instrument à lecture directe. La vidéo et les données d'exposition sont ensuite fusionnées, synchronisées et analysées ensemble. Suite à cette analyse, le responsable hygiène, sécurité et environnement sera capable d'identifier tout niveau élevé d'exposition et de noter le moment où le seuil admissible est dépassé. En France, [66] ont développé la Centrale d'Acquisition au Poste de Travail Informé par Vidéo (CAPTIV). CAPTIV (figure 1.4) est un outil qui permet de stocker les informations en provenance de capteurs d'exposition professionnelle et de les coupler à un enregistrement vidéo du poste de travail. Cette technique permet d'étudier un poste de travail avec précision et de corrélérer le geste professionnel avec le niveau d'exposition. Ce type de solution présente des inconvénients importants, le premier venant du fait que la mise en place d'un dispositif de vidéosurveillance peut être une source de non-respect de la vie privée des individus. En France, la vidéosurveillance dans un lieu privé est soumise à une autorisation préalable de la Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés (CNIL). Les autres inconvénients sont liés au coût très élevé de l'installation (une caméra par poste de travail) et la complexité de traitement des informations ainsi collectées.

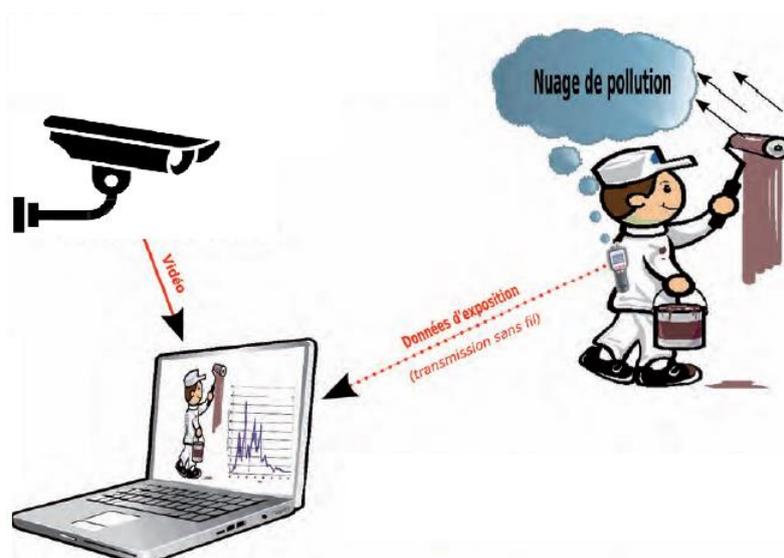


Figure 1.4 : Principe de fonctionnement CAPTIV [67]

5.2 Systèmes portables pour le suivi de l'exposition personnelle

Plusieurs études épidémiologiques utilisent des systèmes portés par chaque individu pour évaluer l'exposition personnelle à la pollution atmosphérique. Ces systèmes intègrent un ensemble de capteurs environnementaux (capteur de qualité d'air, température, humidité, etc...) et un dispositif de communication de données pour transmettre les données vers un système qui assurera leur traitement (smartphone, serveur web, etc...). Le problème de la géolocalisation des personnes ne se pose plus puisque les capteurs sont placés sur eux. Dans la plupart de ces études toutefois, ces systèmes intègrent un équipement de géolocalisation de type GPS pour pouvoir localiser les sources de pollutions.

Une équipe de l'université de Camegie Mellon, USA a par exemple développé un prototype de capteur de COV intégré dans un T-shirt nommé WearAir. Ce T-shirt (figure 1.9) indique le niveau de COV dans l'air avec des diodes électroluminescentes [68]. Toutefois, le système ne permet pas de mesurer le niveau de polluant dans l'air et l'exposition ne peut pas être reliée directement au contexte spatio-temporel car ce T-shirt n'intègre pas un module de localisation en temps réel.



Figure 1.5 : le T-shirt WearAir [68]

SiNOxSense, développé par [69], est un autre système portable à base de textile permettant d'estimer l'exposition personnelle à l'oxyde d'azote NO_x . L'idée est que l'individu porte un capteur de pollution sur lui. Le système recueille des données sur la pollution de l'air. Si le niveau de polluant franchit un seuil, l'individu obtient un message d'alerte par le biais de son téléphone mobile. Ce dernier permet aussi de localiser la personne grâce au module GPS intégré. Ke Hu et al. [70] ont développé un nouveau système composé de capteurs portables

(capteurs d'activités et capteurs environnementaux), d'une application mobile et d'un centre de données. Ce système permet de surveiller en temps réel l'exposition personnelle d'un individu et estimer l'impact de la pollution atmosphérique sur la santé humaine. L'application permet de tracer les déplacements des individus grâce aux données collectées par le GPS de leur téléphone mobile. L'application affiche en temps réel des informations comme la position actuelle de la personne sur une carte, la concentration de CO et la fréquence cardiaque de l'individu. Le centre de données est un serveur qui stocke et traite les données transmises par les utilisateurs.

CitiSense est un autre projet développé par [71]. Ce système est composé d'une application Android et d'une unité de surveillance de la qualité d'air qui envoie les mesures sur un téléphone via le Bluetooth. L'unité de surveillance contient 6 capteurs qui permettent de mesurer le monoxyde de carbone, le dioxyde d'azote, l'ozone, la température, la pression barométrique et l'humidité relative. Le module GPS intégré dans le téléphone mobile permet de localiser la personne.

Steinle et al. [72] proposent un système portable pour l'évaluation de l'exposition personnelle aux particules fines (PM). Un instrument de lecture directe appelé Dylos a été utilisé pour mesurer la concentration de PM dans l'air. Sur une charge complète de la batterie, le système Dylos fonctionne pendant environ 6 heures. Une mémoire intégrée dans le système peut stocker environ une semaine de données avec une fréquence d'une mesure par minute. Une fois que la mémoire est pleine, le système Dylos continue à fonctionner mais se met à écraser les données les plus anciennes. Un récepteur GPS a été utilisé en combinaison avec Dylos pour suivre les mouvements de la personne et pour relier les concentrations de particules observées en temps et en lieu. Un petit sac à dos de randonnée a été utilisé pour transporter les instruments (figure 1.6).



Figure 1.6 : le système portable « sac à dos » [72]

Negi et al. [73] ont développé un moniteur portable pour la détection en temps réel d'hydrocarbures toxiques et des acides dans l'air. Le moniteur peut communiquer via Bluetooth avec un téléphone dans lequel les données de mesure peuvent être traitées, affichées, stockées et transmises à un ordinateur. En plus de la lecture, le traitement et l'affichage des niveaux des produits toxiques, le téléphone peut enregistrer l'emplacement de la personne grâce à son GPS.

« THE eGS SYSTEM » est un projet conduit par [74]. Le système mesure la concentration de monoxyde de carbone (CO) dans l'air à l'aide d'un capteur de CO couplé avec un récepteur GPS. L'exposition personnelle est affichée sur une tablette.

N-SMARTS est un autre projet de l'université de Californie, Berkeley qui s'intéresse au développement d'un système d'évaluation de l'exposition personnelle aux CO et NO_x [75]. Le système est composé d'un capteur de CO, d'un capteur de NO_x et d'un module GPS dans un seul bloc. Les données sont transmises au téléphone mobile via Bluetooth.

Common Sense est un projet co-développé par le centre de recherche d'Intel et des chercheurs de l'université de Californie, Berkeley. Ils ont développé un dispositif portable qui permet de mesurer l'exposition personnelle au CO, NO et O₃ avec la température et l'humidité. Le téléphone portable permet de localiser en temps réel la personne en utilisant le module GPS. Ces données sont transmises via le GPRS à un serveur contenant une base de données [76].

En général, les récepteurs GPS, qu'ils soient intégrés dans le téléphone mobile ou sous forme d'un module indépendant, ont été appliqués avec succès dans les systèmes portables d'estimation de l'exposition personnelle à des polluants atmosphériques. Mais il y a des limites dans l'application de cette technologie. La contrainte principale de l'utilisation du GPS est la faible couverture du signal satellite à l'intérieur des bâtiments ou à proximité de certains matériaux, cela entraîne une faible précision sur la localisation des personnes rendant inadaptée cette technologie en intérieur. Ces systèmes portables sont aussi limités dans le nombre de polluants que l'on peut surveiller. De plus, ces systèmes mobiles ne peuvent embarquer que des capteurs de petite taille, de faible poids et cela a souvent une incidence sur la précision des mesures effectuées.

6. Conclusion

Les problèmes de santé publique font que la qualité de l'air intérieur est aujourd'hui une priorité sanitaire. L'Agence Européenne pour l'environnement (AEE) a pour mission d'aider les états membres de l'union européenne à prendre des décisions afin de réduire les

concentrations de certains polluants et de coordonner le réseau européen d'information et d'observation sur l'environnement. Des directives ont été adoptées sur les particules, l'ozone, le dioxyde de soufre, les oxydes d'azote, le plomb ainsi que pour d'autres polluants susceptibles d'avoir un danger sur la santé humaine. La directive 2008/50/CE de 2008 concernant « la qualité d'air ambiant et un air pur en Europe » a fixé des valeurs limites à ne pas dépasser pour les polluants de l'air.

En France, le plan national santé environnement (PNSE) vise à répondre aux inquiétudes de Français sur les conséquences sanitaires de l'exposition à des pollutions de l'air. Ce plan doit être renouvelé tous les cinq ans. Celui en cours, le plan PNSE III (2015-2019), repose sur quatre principes : (1) Introduire le concept d'exposome¹ et donc prendre en considération toutes les sources de pollution ou d'exposition susceptibles d'avoir un effet sanitaire, (2) Mettre l'individu et la collectivité au centre de l'étude et l'intégrer dans la définition de la santé environnementale en introduisant la notion de bien-être définie de l'OMS, (3) privilégier les actions de prévention en agissant à la source ou en protégeant les populations, (4) réduire les inégalités environnementales d'exposition en plus des objectifs de réduction moyenne [77]. Face à l'évolution des législations au niveau mondial et européen, la surveillance de l'exposition personnelle aux polluants de l'air va devenir une exigence de plus en plus affirmée, notamment en milieu professionnel où les risques de pollution de l'air sont importants.

Ce chapitre a présenté les différentes méthodes de suivi de l'exposition personnelle aux polluants de l'air qui ont été proposées dans la littérature. Ces méthodes peuvent être classées en deux groupes : les méthodes directes (biomarqueurs, échantillonneur passif, échantillonneur actif) et les méthodes indirectes basées sur le concept de microenvironnement. Le tableau 1.3 présente un comparatif de ces méthodes.

Chacune de ces méthodes a été développée pour des contextes applicatifs particuliers suivant que l'on s'intéresse par exemple à un groupe de personnes plus ou moins importants. Avec les méthodes directes, où l'exposition au polluant se fait hors-ligne par une analyse en laboratoire longue et coûteuse, il n'est pas possible de prévenir le risque puisque le résultat n'est connu qu'une fois que « le mal est fait ». La prévention des risques au travail passe nécessairement par des méthodes temps réel, et donc par des méthodes indirectes de type modèle – modèle ou mesure – mesure. Les approches modèle – modèle sont plus intéressantes

¹ L'**exposome** est un concept correspondant à la totalité des expositions à des facteurs [environnementaux](#) (c'est-à-dire non génétiques) que subit un [organisme humain](#) de sa [conception](#) à sa fin de vie en passant par le développement [in utero](#), complétant l'effet du [génome](#). (wikipédia)

pour étudier des grandes populations mais elles sont moins adaptées pour analyser des taux d'expositions sur des personnes particulières comme peuvent le faire les méthodes qui mesurent le déplacement des individus.

Tableau 1.3 : Les méthodes d'évaluation de l'exposition personnelle aux polluants dans l'air

| Méthode d'estimation | Niveau de polluant | Localisation | Exposition |
|------------------------|--------------------|---------------|---------------------|
| Echantillonneurs | Mesure | - | Analyse laboratoire |
| Biomarqueur | - | - | Analyse laboratoire |
| Modèle - Questionnaire | Modèle | Questionnaire | Analyse de données |
| Modèle - Modèle | Modèle | Modèle | Analyse de données |
| Mesure - Mesure | Mesure | Mesure | Analyse de données |

Les solutions temps réel qui existent aujourd'hui est que nous avons présentées section 5, ne permettent pas de répondre à tous les besoins ou bien sont trop contraignantes pour être utilisées au travail.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter une solution originale de type mesure – mesure pour répondre aux exigences d'une utilisation au milieu professionnel. Cette contribution s'inscrit dans le cadre du projet ANR CAPFEIN qui traite des problèmes du formaldéhyde dans la qualité de l'air intérieur.

Bibliographie

- [1] Mills IC, Atkinson RW, Kang S, Walton H, Anderson HR. Quantitative systematic review of the associations between short-term exposure to nitrogen dioxide and mortality and hospital admissions. *BMJ Open*. 2015 May 11;5(5)
- [2] Palanchon C, Pascal M, Corso M, Meffre C, Janin C. Évaluation de l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique urbaine dans l'agglomération de Mulhouse, septembre 2012. *Saint-Maurice : Institut de veille sanitaire* ; 6 p.
- [3] Gault G et Pascal M. Les effets sur la santé de la pollution atmosphérique : mécanismes d'actions et principaux résultats épidémiologiques – focus sur la région Aquitaine Avril 2014 ; *Institut de veille sanitaire*
- [4] Kroes, R., Galli, C., Munro, I., Schilter, B., Tran, L.-A., Walker, R., Wu” rtzen, G. “Threshold of toxicological concern for chemical substances present in the diet: a practical tool for assessing the need for toxicity testing.” *Food and Chemical Toxicology*, 2002; 38, 255–312.
- [5] OMS. Burden of disease from the joint effects of Household and Ambient Air Pollution for 2012. *OMS 2014*
- [6] WHO. Biomarkers and Risk Assessment: Concepts and Principles. *World Health Organization, Geneva, 1993*.
- [7] Fréry N, Vandentorren S, Etchevers A, Fillol C. Highlights of recent studies and future plans for the French human biomonitoring (HBM) programme. *Int J Hyg Environ Health*, 2012; 215:127–132.
- [8] Ehrenberg L, Osterman S. Alkylation of macromolecules for detecting mutagenic agents. *Teratog Carcinog Mutagen*, 1980; 1(1):105-27
- [9] Shaham J, Bomstein Y, Meltzer A. DNA-protein crosslinks, a biomarker of exposure to formaldehyde—in vitro and in vivo studies. *Carcinogenesis*, 1996; 17:121–125.
- [10] Talaska G, Underwood P, Maier A, Lewtas J, Rothman N, Jaeger M. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), nitro-PAHs and related environmental compounds: biological markers of exposure and effects. *Environmental Health Perspectives*. 1996; 104:901-906.
- [11] Durand, M., Florkowski, C., George, P., Walmsley, T., Weinstein, P., Cole, J. Elevated trace element output in urine following acute volcanic gas exposure. *J. Volcanol. Geotherm. Res*, 2004 ; 134,139–148.
- [12] Ayi Fanou L, Mobio TA, Creppy EE, Fayomi B, Fustoni S, Møller P, Kyrtopoulos S, Georgiades P, Loft S, Sanni A, Skov H, Ovrebø S, Atrup H. Survey of air pollution in Cotonou, Benin--air monitoring and biomarkers. *Sci Total Environ*.2006; 358(1-3):85-96.
- [13] Yanagisawa Y, Nishimura H. A badge-type personal sampler for measurement of personal exposure to NO₂ and NO in ambient air. *Environ Int*. 1982; 8(1–6):235–242.
- [14] Namiesnik J, Zabiegala B, Kot-Wasik A, Partyka M, Wasik A. Passive sampling and/or extraction techniques in environmental analysis: a review. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 2005; 381:279–301
- [15] INERIS. Exposition par inhalation au benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes(BTEX) dans l'air. *INERIS 2004* ; INERIS-DRC-04-56770-AIRE-n°1056-IZ
- [16] Mukala K, Pekkanen J, Tiittanen P, Alm S, Salnen RO, Jantunen M, Tuomisto J. Seasonal exposure to NO₂ and respiratory symptoms in preschool children. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 1996; 6(2):197–210.
- [17] Lai HK, Kendall M, Ferrier H, Lindup I, Alm S, Hanninen O, Jantunen M, Mathys P, Colville R, Ashmore MR, Cullinar P, Nieuwenhuijsen MJ. Personal exposures and microenvironment concentrations of PM_{2,5}, VOC, NO₂ and CO in Oxford, UK. *Atmospheric Environment*. 2004; 38:6399–6410.
- [18] Kornartit, C., Sokhi, R. S., Burton, M.A., Ravindra, K. Activity pattern and personal exposure to nitrogen dioxide in indoor and outdoor microenvironments. *Environment International*, 2010; Vol.36, No.1pp. 36-45

- [19] Esplugues A, Ballester F, Estarlich M, Llop S, Fuentes-Leonarte V, Mantilla E, Vioque J, Iñiguez C. Outdoor, but not indoor, nitrogen dioxide exposure is associated with persistent cough during the first year of life. *Science Total Environment*, 2011; 409(22):4667-73
- [20] Semple S, Garden C, Coggins M, Galea KS, Whelan P, Cowie H, Sánchez-Jiménez A, Thorne PS, Hurley JF, Ayres JG. Contribution of solid fuel, gas combustion, or tobacco smoke to indoor air pollutant concentrations in Irish and Scottish homes. *Indoor Air*. 2012; 22(3):212-23.
- [21] Ramirez-Aguilar M, Cicero-Fernandez P, Winer AM, Romieu I, Meneses-Gonzales F, Hernandez-Avila M. "Measurements of personal exposure to nitrogen dioxide in four Mexican cities in 1996." *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2002; 52:50-57.
- [22] Lee K, Bartell SM, Paek D. Interpersonal and daily variability of personal exposures to nitrogen dioxide and sulfur dioxide. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*. 2004; 14:137-143.
- [23] Sorensen M, Loft S, Andersen HV, Raaschou-Nielsen O, Skovgaard LT, Knudsen LE, Nielsen IV, Hertel O. Personal exposure to PM_{2.5}, black smoke and NO₂ in Copenhagen: relationship to bedroom and outdoor concentrations covering seasonal variation. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*. 2005; 15:413-422.
- [24] Kilabuko JH, Matsuki H, Nakai S. Air quality and acute respiratory illness in biomass fuel using homes in Bagamoyo, Tanzanian. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2007; 4(1):39-44
- [25] Park JS, Ikeda K. Exposure to the mixtures of organic compounds in homes in Japan. *Indoor Air*. 2004; 14(6):413-20.
- [26] OQAI : "Campagne nationale logements-état de la qualité de l'air dans les logements français. Rapport final" DDD/SB/2006-57, *Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur*, 2006.
- [27] Jia C., Stuart B., Christopher G. VOCs in industrial, urban and suburban neighborhoods, Part 1: Indoor and outdoor concentrations, variation, and risk drivers. *Atmospheric Environment*, 2008; Volume 42, Issue 9, Pages 2083-2100,
- [28] Dassonville C. : "Évaluation de l'environnement domestique de nouveau-nés franciliens." *Thèse de doctorat. Santé Publique, Université Paris Descartes, Paris, 2008*
- [29] Geiss O., Georgios G., Salvatore T., Josefa BM, Larsen Bo R., Dimitrios K. The AIRMEX study - VOC measurements in public buildings and schools/kindergartens in eleven European cities: Statistical analysis of the data. *Atmospheric Environment*, 2011; Volume 45, Issue 22, Pages 3676-3684,
- [30] Lazenby V, Hinwood A, Callan A, Franklin P. Formaldehyde personal exposure measurements and time weighted exposure estimates in children. *Chemosphere*. 2012; 88(8):966-73.
- [31] Kumar R, Nagar JK, Raj N, Kumar P, Kushwah AS, Meena M, Gaur SN. Impact of domestic air pollution from cooking fuel on respiratory allergies in children in India. *The Asian Pacific Journal of Allergy and Immunology* 2008; 26(4):213-22.
- [32] Hodgson AT., Rudd AF., Beal D., and Chandara S. Volatile Organic Compound Concentrations and Emission Rates in New Manufactured and Site-Built Houses. *Indoor Air*, 2000; 10: 178-192.
- [33] Dodson RE., Jonathan IL., John D.S, James P.S, Deborah HB. Influence of basements, garages, and common hallways on indoor residential volatile organic compound concentrations, *Atmospheric Environment*, 2008; Volume 42, Issue 7, Pages 1569-1581,
- [34] Delgado-Saborit JM, Aquilina NJ, Meddings C, Baker S, Harrison RM. Relationship of personal exposure to volatile organic compounds to home, work and fixed site outdoor concentrations." *Sci Total Environ*. 2011; 409(3):478-88.
- [35] Marchand C., Bulliot B., Le Calvé S., Mirabel Ph., Aldehyde measurements in indoor environments in Strasbourg (France), *Atmospheric Environment*, 2006; Volume 40, Issue 7, Pages 1336-1345,
- [36] Marchand C., Le Calvé S., Mirabel Ph., Glasser N., Casset A., Schneider N., de Blay F. Concentrations and determinants of gaseous aldehydes in 162 homes in Strasbourg (France), *Atmospheric Environment*, 2008; Volume 42, Issue 3, Pages 505-516,

- [37] Cherrie JW, Lynch G, Bord BS, Heathfield P, Cowie H, Robertson A. Does the wearing of sampling pumps affect exposure? *Annals of Occupational Hygiene*. 1994 ; 38(6):827–838.
- [38] Duan N. Microenvironments types: a model for human exposure to air pollution. *Environment International* 1982; 8:305-309
- [39] Jantunen MJ, Hanninen O, Katsouyanni K, Knoppel H, Kuenzli N, Lebret E, et al. Air pollution exposure in European cities: the “EXPOLIS” study. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 1998; 8:495–518.
- [40] Wu C-F, Delfino RJ, Floro JN, Quintana PJE, Samimi BS, Kleinman MT. Exposure assessment and modeling of particulate matter for asthmatic children using personal nephelometers. *Atmospheric Environment*, 2005; 39:3457–69.
- [41] Physick W, Powell J, Cope M, Boast K, Lee S. Measurements of personal exposure to NO₂ and modelling using ambient concentrations and activity data. *Atmospheric Environment* 2011; 45:2095–102.
- [42] Fugas M. Assessment of total exposure to air pollution. *Proceedings of the International Conference on Environmental Sensing and Assessment*, 1975; Paper N°38-5
- [43] Ott W. Concepts of Human Exposure to Air Pollution. *Environment International* 1982; 7:179-19
- [44] WHO. Methods of assessing risk to health from exposure to hazards released from landfills. *World Health Organization Report, EUR/00/5016441, Copenhagen, 2000*.
- [45] Nethery E, Leckie SE, Teschke K, Brauer M. From measures to models: an evaluation of air pollution exposure assessment for epidemiological studies of pregnant women. *Occupational and Environmental Medicine*. 2008; 65(9):579-86.
- [46] Burke JM, Zufall MJ, Özkaynak H. A population exposure model for particulate matter: case study results for PM_{2.5} in Philadelphia, PA. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*. 2001; 11:470–489.
- [47] Mölter, A., Lindley, S., De Vocht, F., Agius, R., Kerry, G., Johnson, K., Ashmore, M.R., Terry, A., Dimitroulopoulou, S., Simpson, A. Performance of a microenvironmental model for estimating personal NO₂ exposure in children. *Atmospheric Environment*, 2012; 51, 225-233.
- [48] Hoek, G., Beelen, R., de Hoogh, K., Vienneau, D., Gulliver, J., Fischer, P., Briggs, D. A review of land-use regression models to assess spatial variation of outdoor air pollution. *Atmospheric Environment*, 2008; 42, 7561-7578.
- [49] Dimitroulopoulou C., Ashmore M.R., Hill M.T.R., Byrne M.A., Kinnersley R. INDAIR: A probabilistic model of indoor air pollution in UK homes. *Atmospheric Environment*, 2006; Volume 40, Issue 33, Pages 6362-6379,
- [50] Zidek, J.V., Shaddick, G., White, R., Meloche, J., Chatfield, C. Using a probabilistic model (pCNEM) to estimate personal exposure to air pollution. *Environmetrics*, 2005; 16, 481-493.
- [51] Gulliver, J., Briggs, D.J. STEMS-Air: A simple GIS-based air pollution dispersion model for citywide exposure assessment. *Science of The Total Environment*, 2011; 409, 2419-2429
- [52] Gerharz, L.E., Klemm, O., Broich, A.V., Pebesma, E. Spatio-temporal modelling of individual exposure to air pollution and its uncertainty. *Atmospheric Environment*, 2013; 64, 56-65.
- [53] Baxter LK, Burke J, Lunden M, Turpin BJ, Rich DQ, Thevenet-Morrison K. Influence of human activity patterns, particle composition, and residential air exchange rates on modeled distributions of PM_{2.5} exposure compared to central-site monitoring data. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*. 2013; 23:241–247.
- [54] Nyberg F, Gustavsson P, Järup L, Bellander T, Berglind N, Jakobsson R, Pershagen G. Urban air pollution and lung cancer in Stockholm. *Epidemiology*. 2000;11(5):487-95.
- [55] Park JY, Lee K., Yunhyung H., Jin HK. Determining the exposure factors of personal and home care products for exposure assessment. *Food and Chemical Toxicology*, 2015; Volume 77, Pages 105-110,

- [56] Herbarth O, Fritz GJ, Rehwagen M, Richter M, Röder S, Schlink U. Association between indoor renovation activities and eczema in early childhood. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*. 2006;209(3):241-7.
- [57] Qingyang L., Yanju L., Meigen Z. Source Apportionment of Personal Exposure to Carbonyl Compounds and BTEX at Homes in Beijing. *China international journal of Aerosol and Air Quality Research*, 2014; Volume 14, No. 1, Pages 330-337
- [58] Lioy PJ. Exposure science: a view of the past and milestones for the future. *Environmental Health Perspectives*, 2010; 118(8):1081-90.
- [59] Hartwell TD, Pellizzari ED, Perritt RL, Whitmore RW, Zelon HS, Sheldon LS. Results from the Total Exposure Assessment Methodology (TEAM) study in selected communities in northern and southern-California. *Atmospheric Environment* 1987; 21:1995–2004.
- [60] Dadvand, P., De Nazelle, A., Triguero-Mas, M., Schembari, A., Cirach, M., Amoly, E., Figueras, F., Basagaña, X., Ostro, B., Nieuwenhuijsen, M.J. Surrounding greenness and exposure to air pollution during pregnancy: an analysis of personal monitoring data. *Environmental Health Perspectives*, 2012; 120, 1286-1290
- [61] Axhausen, K.W., Zimmerman, A., Schönfelder, S., Rindsfuser, G., Haupt, T. Observing the rhythms of daily life: A six-week travel diary. *Transportation*, 2002; 29, 95-124
- [62] Delgado-Saborit, J.M. Use of real-time sensors to characterise human exposures to combustion related pollutants. *Journal of Environmental Monitoring*, 2012; 14, 1824-1837.
- [63] Rindsfuser, G., Mühlhans, H., Doherty, S.T., Beckmann, K.J. Tracing the planning and execution of activities and their attributes - Design and application of a hand-held scheduling process survey. *10th International Conference on Travel Behaviour Research*, 2003; Lucerne, Switzerland.
- [64] Delfino, R.J., Tjoa, T., Gillen, D.L., Staimer, N., Polidori, A., Arhami, M., Jamner, L., Sioutas, C., Longhurst, J. Traffic-related air pollution and blood pressure in elderly subjects with coronary artery disease. *Epidemiology*, 2010; 21, 396-404.
- [65] Elgethun K, Yost MG, Fitzpatrick CTE, Nyerges TL, Fenske RA. Comparison of global positioning system (GPS) tracking and parent-report diaries to characterize children's time-location patterns. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* 2007; 17:196–206.
- [66] Martin, P., Brand, F., & Servais, M. Correlation of the exposure to a pollutant with a task-related action or workplace: The CAPTIV system. *The Annals of Occupational Hygiene*, 1999; 43(4), 221-233.
- [67] INRS. Exposition aux solvants organiques lors de la pose d'électrodes pour électroencéphalogrammes de longue durée. *INRS 2011 Document pour le médecin du travail N°127*
- [68] Kim, S., E. Paulos & M. D. Gross. WearAir: Expressive t-shirts for air quality sensing. *In proceedings of the 4th International Conference on Tangible Embedded, and Embodied Interaction*, 2010; 295-96. Cambridge, MA: ACM.
- [69] Hansen, K.B.; Kuraszynska, N. SiNOxSense: A textile-based wearable simple NOx sensing system.
- [70] Ke Hu; Yan Wang; Rahman, A.; Sivaraman, V. Personalising pollution exposure estimates using wearable activity sensors. *In proceedings of Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP), 2014 IEEE Ninth International Conference, 2014*; pp.1-6, 21-24
- [71] Nima N., Nakul V., Celal Z., Elizabeth B., Nichole Q., Piero Z., Kevin P., Sanjoy D., CitiSense: improving geospatial environmental assessment of air quality using a wireless personal exposure monitoring system. In Proceedings of the conference on Wireless Health (WH '12). ACM, 2012 ; New York, NY, USA,
- [72] Susanne Steinle, Stefan Reis, Clive E. Sabel, Sean Semple, Marsailidh M. Twigg, Christine F. Braban, Sarah R. Leeson, Mathew R. Heal, David Harrison, Chun Lin, Hao Wu. Personal exposure

- monitoring of PM_{2.5} in indoor and outdoor microenvironments. *Science of The Total Environment*, 2015; Volume 508, Pages 383-394,
- [73] Negi I, Tsow F, et al. Novel monitor paradigm for real-time exposure assessment. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*. 2011; 21(4):419–426.
- [74] Rudman, P.; North, S.; Chalmers, M. Mobile pollution mapping in the city. *In Proceedings of the UK-UbiNet workshop on eScience and ubicomp, Edinburg, UK, 19–20 May 2005*.
- [75] Richard H., Eric A. Brewer, Eric P., and Richard W. N-smarts: networked suite of mobile atmospheric real-time sensors. *In Proceedings of the second ACM SIGCOMM workshop on Networked systems for developing regions (NSDR '08). ACM, 2008 ; New York, NY, USA*
- [76] Dutta, P.; Aoki, P.M.; Kumar, N.; Mainwaring, A.; Myers, C.; Willett, W.; Woodruff. A. Common sense: Participatory urban sensing using a network of handheld air quality monitors. *In Proceedings of the 7th ACM conference on embedded networked sensor systems, 2009; Berkeley, CA, USA, pp. 349–350*
- [77] PNSE 3 2015-2019 <http://fr.slideshare.net/ARCAA/1-pnse3-prsentation-colloque-seiq-marano-v2> [En ligne février 2015]

Chapitre 2 : Modélisation d'un système de surveillance temps réel de l'exposition personnelle

| | |
|--|----|
| 1. Introduction | 26 |
| 2. Le projet ANR CAPFEIN | 26 |
| 2.1 Le formaldéhyde | 28 |
| 2.2 Exposition au formaldéhyde dans la population | 29 |
| 2.3 Exposition au formaldéhyde dans le milieu professionnel | 29 |
| 2.4 Méthodes de mesures du formaldéhyde | 31 |
| 2.5 Cahier des charges du système | 33 |
| 2.6 Modèle conceptuel pour le suivi de l'exposition personnelle | 33 |
| 3. Modélisation du système | 35 |
| 3.1 Ingénierie système | 35 |
| 3.2 Méthodologie de conception d'un système | 36 |
| 3.3 Le standard EIA-632 | 36 |
| 3.3.1 Structure d'un système selon l'EIA-632 | 37 |
| 3.3.2 Les processus de conception du système | 38 |
| 3.3.3 Outil de modélisation | 39 |
| 3.4 Diagramme d'exigences | 39 |
| 3.5 Modélisation de la solution logique selon les recommandations de l'EIA-632 | 43 |
| 3.5.1 Diagramme de contexte | 43 |
| 3.5.2 Identification des services | 44 |
| 3.5.3 Diagramme des séquences | 48 |
| 3.5.4 Diagramme d'activités | 51 |
| 4. Conclusion | 52 |

1. Introduction

Après avoir étudié les méthodes d'évaluation sur l'exposition personnelle aux polluants de l'air, nous présentons dans ce chapitre le projet ANR CAPFEIN, dont le principal objectif est de réaliser un système de surveillance temps réel de l'exposition personnelle au formaldéhyde. Le chapitre est structuré en deux parties. La première (section 2) présente le projet de recherche ANR CAPFEIN et l'approche générale que nous proposons. La seconde partie (section 3) montre la conception d'une solution logique qui identifie et modélise les services nécessaires pour répondre aux exigences applicatives en se basant sur une méthodologie d'Ingénierie Système.

2. Le projet ANR CAPFEIN

Le formaldéhyde est un polluant classé comme « hautement prioritaire » dans l'air intérieur. En raison de ses effets sur la santé, la réglementation française émergente (action 7 du PNSE2) vise à mesurer le formaldéhyde dans les lieux publics (écoles, crèches etc.) à partir de 2018. Or, actuellement, aucun appareil sur le marché n'est capable de répondre à ces besoins en termes de précision de la mesure du formaldéhyde, de surveillance en temps réel, et cela à faible coût et « à grande échelle ».

L'objectif du projet CAPFEIN « réseau de CAPteurs de FormaldEhyde intelligents pour la surveillance de l'air INTérieur » financé par l'Agence National de la Recherche (ANR) est de développer un système intelligent permettant d'évaluer l'exposition personnelle au formaldéhyde mais aussi à d'autres sources de pollution atmosphérique dans les environnements publics clos (école, crèche, établissement recevant du public (ERP), etc...) et dans les milieux professionnels (bureau, hôpital, usine, etc...). Ce projet de recherche regroupant des chercheurs en chimie et en génie informatique est décomposé en trois parties :

- Le développement d'un capteur permettant la mesure des concentrations de formaldéhyde dans les environnements clos associant précision et sélectivité au formaldéhyde.
- La mise en œuvre d'un système de localisation d'une personne dans un espace interne à une structure (bâtiment, maison, usine, etc...).
- La conception du système de communication intelligent capable d'évaluer l'exposition personnelle à la pollution dans l'air à partir de données fournies par des capteurs de formaldéhyde et d'autres polluants et à partir d'informations de localisation des personnes en temps réel.

L'équipe de recherche à l'origine du projet est l'équipe de physico-chimie de l'atmosphère dirigée par Stéphane Le Calvé (Institut de chimie et procédés pour l'énergie, l'environnement et la santé (ICPEES) UMR 7515 CNRS de l'Université de Strasbourg). Cette équipe travaille sur la problématique de la qualité de l'air intérieur depuis 2001 et a participé à plusieurs études avec les Hôpitaux Universitaires de Strasbourg sur la pollution de l'air par le formaldéhyde et de ses effets [1, 2, 3, 4]. Une étude clinique et une étude épidémiologique entre 2002 et 2005 menées sur 81 paires asthmatiques/témoins dans la communauté urbaine de Strasbourg dans le cadre d'une thèse dirigée par S. Le Calvé a démontré une augmentation de l'asthme allergique par le formaldéhyde [5].

Ce constat a conduit, dès 2006, à travailler sur le développement d'un outil de mesure du formaldéhyde en temps réel. Du fait de l'impact sanitaire du formaldéhyde dont les concentrations en environnement intérieur varient entre 10 et 100 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, et de l'absence d'appareillage de mesure fiable, portable, peu coûteux, et en temps réel sur le marché, S. Le Calvé et ses collaborateurs ont développé un outil de mesure transportable, permettant une mesure très fine et sélective des concentrations de formaldéhyde dans l'air ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).



Figure 2.1 : Prototype de 2^{ème} génération de l'analyseur. Le prototype est transportable (env. 8 kg) et a une dimension de 28,5 x 23 x 38 cm.

La méthodologie utilisée dans l'analyseur automatique a fait l'objet d'un brevet en France par le CNRS² en 2010 et d'un brevet international³ en 2012.

² S. Le Calvé, W. Zheng, J.-L. Ponche, P. Bernhardt, *Dispositif et procédé de détermination de la concentration d'un composé dans une phase aqueuse ou gazeuse*, brevet français FR2946751, publié le 17 décembre 2010

³ S. Le Calvé, W. Zheng, J.-L. Ponche, P. Bernhardt, *Device and method for determining the concentration of a compound in an aqueous or gaseous phase*, US Patent Application 20120149122.

L'avantage majeur de l'analyseur développé au ICPEES réside dans la combinaison de plusieurs caractéristiques techniques, pratiques et économiques : une excellente sensibilité, une grande sélectivité, une excellente résolution temporelle, une portabilité acceptable, un faible coût de revient et un faible coût de fonctionnement avec des réactifs non dangereux. L'analyseur actuel est le seul à être transportable et à pouvoir suivre les variations rapides de formaldéhyde dans l'air intérieur provenant par exemple de sources discontinues (encens, poêle à pétrole, cheminée au bioéthanol, etc.). L'analyseur offre la possibilité de mesurer les concentrations de formaldéhyde à l'intérieur d'un bâtiment et d'étudier ses variations spatiales et temporelles afin de déterminer les sources ponctuelles ou continues de formaldéhyde. Ceci permet ainsi de mettre en évidence des « pics » de formaldéhyde (potentiellement dangereux pour la santé) à certains moments ou dans des pièces particulières.

2.1 Le formaldéhyde

Le formaldéhyde (N° CAS : 50-00-0) également appelé méthanal ou aldéhyde formique est un gaz incolore fortement irritant. Il est quasi omniprésent dans l'environnement. Il provient de sources naturelles et de sources liées à l'activité humaine. Ce gaz incolore, d'odeur piquante et suffocante, apparaît dans tous les cycles de dégradation de la matière organique (l'incinération des déchets, la combustion de carburant, le tabagisme). Le formaldéhyde est également produit chimiquement par l'oxydation catalytique du méthanol (ou alcool méthylique) pouvant être utilisé dans différentes industries. De plus, le formaldéhyde polymérise facilement, en particulier à froid, formant ainsi des composés solides. Ceci explique son importance industrielle comme intermédiaire de synthèse. Les solutions aqueuses de formaldéhyde sont appelées formaline ou formol. Ces solutions sont très inflammables et peuvent constituer des mélanges explosifs.

Le formaldéhyde est irritant pour la peau, le nez, la gorge et les yeux, mais c'est également un allergène et un cancérigène certain. En milieu de travail, l'exposition au formaldéhyde peut se produire par différentes voies (respiratoires, digestives et contact cutané). Le formaldéhyde gazeux peut être absorbé par les voies respiratoires (inhalation). Dès la fin du 19^e siècle, le formaldéhyde intervient dans l'élaboration de polymères tels que la galalithe ou « pierre de lait », sorte d'ivoire synthétique obtenue à partir de la caséine du lait et qui servait notamment à fabriquer des boutons. Ce type de production s'est arrêté en 1999. En 1990, la consommation annuelle de formaldéhyde en France est de 100 000 tonnes [6]. En 2014, la quantité annuelle de formaldéhyde produite ou distribuée en Europe est de plus de 1 million de tonnes selon les

données recueillies par l'agence européenne des produits chimiques dans le cadre du règlement REACH « Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals » sur l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des produits chimiques [7].

2.2 Exposition au formaldéhyde dans la population

En France, toute la population est concernée par l'exposition au formaldéhyde selon un rapport d'expertise de l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (Afsset) [8]. La présence de formaldéhyde dans de nombreux matériaux et produits (produits d'entretien ménagers, peintures, colles, mousses isolantes, produits cosmétiques, etc...) conduit à envisager deux situations d'exposition :

- Celles se produisant sur une durée courte correspondant à l'utilisation ponctuelle de produits comme par exemple les produits d'entretiens pour sols, bougies parfumées. Ces situations renvoient à une exposition aiguë.
- Celles se produisant sur une durée longue combinant la présence répétée d'une personne dans différents environnements (maison, école, crèches). Ces situations renvoient à une exposition chronique.

L'article N°1 de Décret n° 2011-1727 du 2 décembre 2011 relatif aux valeurs-guides pour l'air intérieur pour le formaldéhyde et le benzène fixe les valeurs-guides d'exposition personnelle au formaldéhyde dans l'air intérieur. La valeur-guide pour le formaldéhyde est fixée pour une exposition de longue durée à $30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ au 1er janvier 2015 et à $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ au 1er janvier 2023 [9].

2.3 Exposition au formaldéhyde dans le milieu professionnel

En milieu professionnel, les applications du formaldéhyde sont très variées. Ce gaz est employé notamment dans l'industrie du bois, qui en est la plus grosse consommatrice. Il est utilisé dans la fabrication de panneaux, de contre plaqués et de charpentes. D'autres activités sont concernées, parmi lesquelles :

- La production de colles : des colles appelées « GRA » sont fabriquées à partir de Gélatine-Résorcine-Formaldéhyde.
- Production de peintures, de vernis et d'encres : les résines dont certaines à base de formol, constituent la plus grande partie de liquide des vernis et peintures. Il est aussi utilisé comme conservateur. On trouve également des résines à base de formaldéhyde dans certaines encres.

- Production de papier : les résines à base de formaldéhyde peuvent être utilisées comme liant dans la fabrication de la pâte à papier. Il est utilisé également comme agent de renforcement de la résistance de papier (carton) à l'état humide.
- Production de mousses isolantes : il s'agit de matériaux d'isolation utilisés dans la construction des bâtiments. Les mousses isolantes UF (urée-formol) sont composées de résines UF, d'agent gonflant et d'air comprimé.
- Fonderie : le procédé de fonderie consiste à couler du métal fondu dans un moule pour obtenir un produit ou une pièce donnée. L'exposition au formaldéhyde est potentiellement provoquée dans les étapes de fabrication des moules et de démoulage.
- Production de matières plastiques (caoutchouc, etc...)
- Production des produits cosmétiques : les solutions de formaldéhyde sont utilisées comme agent désinfectant et conservateur dans des nombreuses préparations tels que les produits cosmétiques (shampoings, savons, vernis à ongle, parfums, etc...) et les produits d'entretien ménager.
- Industrie textile : des résines de formaldéhyde sont utilisées lors de l'impression, l'ennoblissement et l'apprêtage. De plus, des colles à base de résine de formol peuvent être aussi utilisées dans divers objets vestimentaires (chapeaux, chaussures, etc...)
- Produits pharmaceutiques : il existe trois types d'utilisation du formaldéhyde (i) la désinfection des locaux (ii) l'élaboration de spécialités médicamenteuses (iii) l'utilisation en tant que produit de laboratoire pour diverses analyses. Il est dans ce cas imposé par la pharmacopée Européenne. La pharmacopée Européenne répertorie une dizaine de méthodes qui impose le formaldéhyde comme réactif.

En France, plusieurs sources de données sont disponibles pour estimer le nombre d'employés exposés et pour analyser différents aspects de l'exposition professionnelle au formaldéhyde. L'enquête CAREX « CARcinogen EXposure » est une base de données rassemblant des informations sur l'exposition professionnelle aux cancérogènes. Cette base de données permet d'estimer en France l'exposition au formaldéhyde par secteur d'activité pour la période 1990-1993. Ces résultats sont détaillés dans le rapport [10]. L'enquête SUMER « Surveillance MEDicale des Risques professionnels » s'est déroulée sur le terrain de juin 2002 à fin 2003. L'enquête permet de dresser une cartographie des expositions des salariés à un grand nombre d'expositions professionnelles en France dont le formaldéhyde et les résines à base de formaldéhyde. L'enquête a été réalisée sous forme de questionnaires [11]. Une nouvelle enquête SUMER en 2010 montre que 7 salariés sur 1000 se déclarent exposés au formaldéhyde en

France en 2010 dont 23% jugé de façon importante [12]. COLCHIC est une base de donnée d'exposition professionnelle aux agents chimiques créée en 1987 à la demande de la Caisse National de l'Assurance Maladie des Travailleurs Salariés (CNAMTS) qui regroupe les mesures d'exposition réalisées par l'INRS et les laboratoires interrégionaux de chimie des CRAM. Les principales expositions au formaldéhyde en France concernent le secteur de la santé humaine (21%), l'industrie du bois (13%), la fabrication du caoutchouc et de produits plastifiée (12%) et le textile (5%).

Les trois sources de données sur l'exposition professionnelle au formaldéhyde en France (CAREX, SUMER et COLCHIC) montrent que l'exposition professionnelle au formaldéhyde concerne plus de 200 000 travailleurs salariés. Les secteurs de la fabrication des panneaux du bois et les activités de soins constituent l'essentiel des secteurs exposés.

En France, le ministère du travail a fixé des valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) indicatives qui définissent les niveaux de concentration à ne pas dépasser dans l'atmosphère des lieux de travail. La VLEP-8 heures du formaldéhyde est de 0.61 mg.m^{-3} . La VLEP court terme (VLCT) est fixée à 1.23 mg.m^{-3} mesurée sur une période de 15 minutes. L'Anses a toutefois formulé de nouvelles recommandations qui ramènent la VLEP-8 à 0.25 mg.m^{-3} est la VLCT à 0.5 mg.m^{-3} dans l'objectif de protéger des effets irritatifs [8].

2.4 Méthodes de mesures du formaldéhyde

Cette partie présente les différentes méthodes de mesures du formaldéhyde dans l'air intérieur basées sur une analyse en différé ou sur une mesure in situ. Il existe actuellement de nombreuses techniques d'analyse du formaldéhyde comme l'Infrarouge [13], le Formaldimeter [14], la spectroscopie à diode laser [15], la spectrométrie de masse par transfert de protons appelée "PTR-MS" [16] ou encore les techniques chromatographiques après piégeage sur cartouches, dérivation et analyse au laboratoire [3, 4]. Les méthodes de mesure en continu sont indispensables de par leur résolution temporelle, pour rechercher les sources, pour comprendre les mécanismes d'émission et de formation du formaldéhyde. Peu d'appareils pratiques et portables sont aujourd'hui commercialisés pour la mesure du formaldéhyde. C'est pourquoi de nombreuses méthodes sont développées, ou sont en cours de développement, pour satisfaire au besoin de surveillance de ce composé.

On peut citer l'AEROLASER qui est un appareil de mesure du formaldéhyde dans l'air avec une limite de détection inférieur à $0.1 \text{ } \mu\text{g.m}^{-3}$. C'est un système « rackable » de dimensions $45 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 56 \text{ cm}$ et pesant 20 kg (Figure 2.2). Cet appareil est contraignant et ne semble

pas vraiment utilisé en air intérieur. En effet, les solutions de piégeage doivent être fraîchement préparées et réfrigérées, ce qui est donc peu pratique pour des campagnes de terrain. De plus, l'appareil lui-même doit être maintenu à température faible et constante pour assurer la stabilité de la mesure. Les pièces qui le constituent comme les lampes par exemple, sont coûteuses et doivent être changées régulièrement. Le coût de ce système est d'environ 35000 € [17].



Figure 2.2 : Le système AEROLASER

L'INTERSCAN est une autre solution développée sur un mode de détection électrochimique. Il en existe des modèles portables ou « rackables » (Figure 2.3). Cet appareil a été testé par le LCSQA-INERIS en 2009 [18]. Il est peu précis, car il est sensible aux courants d'air et aux mouvements. De plus, il nécessite des réajustements quotidiens. Ce système coûte environ 4000 €.

Pour finir, l'analyseur développé par notre partenaire ICPEES dans le cadre de projet CAPFEIN combine à la fois une bonne sensibilité (inférieure à $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), une bonne résolution temporelle adaptée au suivi en continu (le pas de temps est de quelques minutes.), une grande autonomie (autour d'un mois), un encombrement réduit et un faible coût.



Figure 2.3 : Le système INTERSCAN (modèle portable)

2.5 Cahier des charges du système

Après le développement d'un capteur de formaldéhyde sélectif et innovant par notre partenaire ICCPES à Strasbourg, notre objectif consiste à répondre à des besoins avancés énoncés par les parties prenantes du projet.

Cela a conduit dans un premier temps à doter le capteur de formaldéhyde de capacités de communication pour distribuer les fonctions d'acquisition et d'exploitation des données en temps réel sur plusieurs systèmes physiques organisés en réseau. Etant donné que les capteurs de formaldéhyde doivent être déployés à l'intérieur des bâtiments, plusieurs technologies de communication sont envisageables. Le choix d'une technologie plutôt qu'une autre va dépendre de sa simplicité d'installation, sa facilité de maintenance, son autonomie énergétique, etc...

Dans un second temps, ces capteurs doivent être intégrés au sein d'un système de surveillance temps réel de l'exposition personnelle aux polluants atmosphériques dans un milieu professionnel. Des échanges de données entre l'unité de traitement et les acteurs du système de surveillance doivent donc être spécifiés. De plus le superviseur doit pouvoir paramétrer le système. Des alertes (mail, SMS, etc...) doivent pouvoir être envoyées aux autorités locales en cas de dépassement de seuils. Il faut aussi développer des échanges pour faire des analyses online et offline pour identifier les causes et les sources (lieu, tâche, etc...) d'une exposition élevée. Ces analyses permettront de choisir les actions à entreprendre en fonction du taux de formaldéhyde et du contexte environnemental global (température, humidité).

Le coût du système est un critère important. Le système ne doit pas être onéreux pour faciliter ensuite sa diffusion commerciale et assurer sa pérennité.

2.6 Modèle conceptuel pour le suivi de l'exposition personnelle

Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, il existe plusieurs méthodes d'évaluation de l'exposition personnelle aux polluants de l'air. Certaines méthodes, comme les biomarqueurs, les échantillonneurs passifs et les échantillonneurs actifs, demandent des analyses en laboratoire pour avoir une valeur moyenne de l'exposition personnelle sur toute la durée de la surveillance, ce qui ne répond pas à nos besoins (temps réel, plusieurs durées, etc...). Les méthodes d'estimations par modèle et par les questionnaires sont généralement utilisées pour étudier l'exposition des grandes populations mais elles sont moins précises et moins efficaces que les méthodes qui mesurent les activités des individus pour le suivi des taux

d'exposition individuelle. D'autres chercheurs ont proposés des approches temps réel d'évaluation de l'exposition personnelle à des polluants dans l'air (voir chapitre 2.1). Le tableau 1 résume ces approches.

Tableau 2.1 : Exemple de systèmes temps réel de suivi de l'exposition personnelle aux polluants de l'air

| Système | Mesure de polluant | Localisation | Sauvegarde de données | Alerte |
|--------------|--|--------------|-----------------------|--------|
| CAPTIV | Capteur porté par la personne | Vidéo | Oui | Non |
| WearAir | Indicateur | Non | Non | Non |
| SiNoxSense | Capteur_textile | GPS | Non | Oui |
| CitiSense | 6 Capteurs de polluants | GPS | Non | Non |
| Ke Hu et al. | Capteur portable | GPS | Oui | Non |
| Dylos | Instrument de mesure dans un sac à dos | GPS | Oui mais limité | Non |
| Negi et al. | Capteur intégré dans le badge | GPS | Oui | Oui |
| The eGS | Capteur portable | GPS | Non | Non |
| N-Smarts | 2 Capteurs de polluants | GPS | Non | Non |
| Common Sense | 3 Capteurs de polluants | GPS | Oui | Non |

L'approche qui répond le plus à nos besoins (estimer l'exposition personnelle à la pollution de l'air intérieur, sauvegarder de données, alerter, pas de contraintes physiques pour la personne etc...) et celle proposée par Negi et al. [19]. Elle consiste à intégrer les capteurs de pollution directement sur un badge connecté à un smartphone. Mais, la contrainte physique du capteur de formaldéhyde développé par notre partenaire (poids : 8 Kg, dimension : 28.5 x 23 x 38 cm) et l'aspect multi-capteurs de notre système ne permettent pas d'envisager l'utilisation de cette solution qui se base sur un nombre limité de capteurs miniaturisés.

Nous proposons une approche temps réel de surveillance de l'exposition personnelle aux polluants dans l'air intérieur basée sur la méthode indirecte de suivi par microenvironnement mesure - mesure. La figure 2.4 présente le modèle conceptuel pour le suivi de l'exposition personnelle aux pollutions dans l'air intérieur. Ce modèle conceptuel se décompose en blocs, et distingue deux fonctions principales :

- L'estimation de l'exposition personnelle E_{TWai} .
- La prévention des risques sanitaires (Alertes et actions à entreprendre en cas de dépassements de seuil).

L'estimation de l'exposition personnelle se divise elle aussi en deux blocs :

- Les concentrations de polluants (dont le formaldéhyde) dans l'air intérieur.
- Le temps passé par la personne dans chaque microenvironnement durant la période de surveillance.

Les concentrations des polluants dans l'air intérieur sont fournies en temps réel par le réseau de capteurs mesurant les polluants regroupés en « nœud multi-capteurs » et placés dans chaque microenvironnement. Ce modèle conceptuel donne un premier aperçu de l'approche globale du système. L'objectif de la section suivante est d'approfondir la description de ce système en considérant les exigences des différentes parties prenantes.

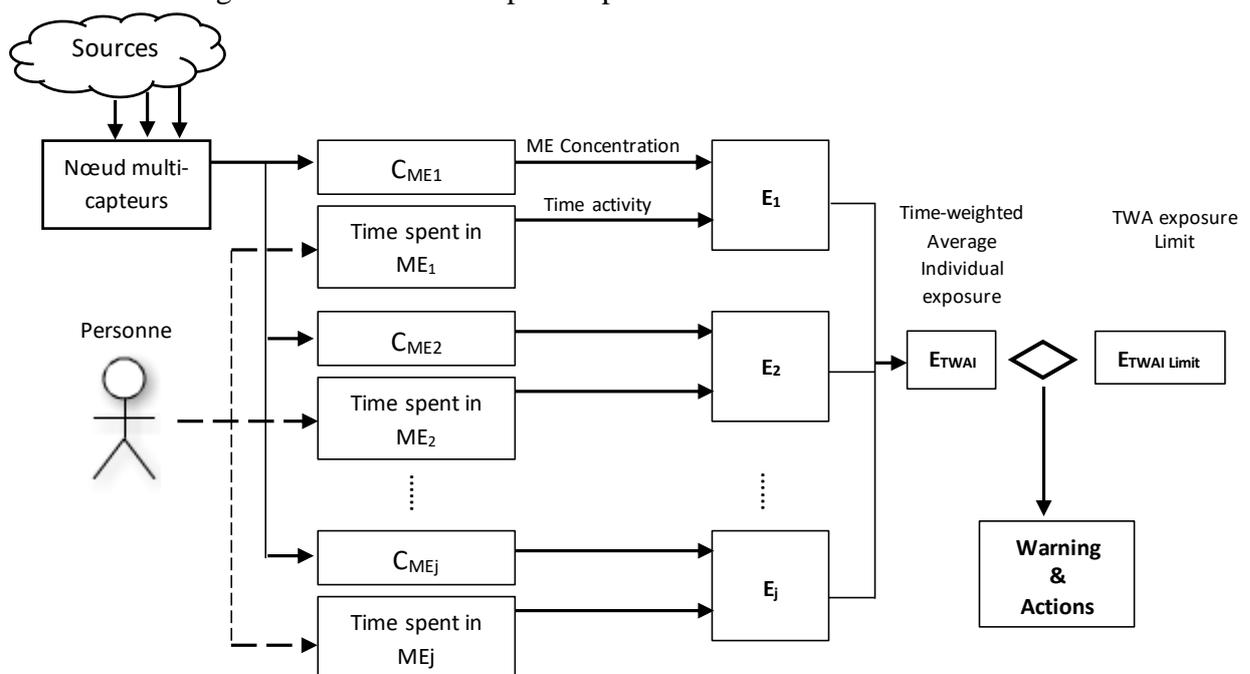


Figure 2.4 : Modèle conceptuel pour le suivi de l'exposition personnelle aux pollutions dans l'air intérieur

3. Modélisation du système

3.1 Ingénierie système

L'Ingénierie Système (IS) est une approche interdisciplinaire et collaborative et concerne la capacité de résolution de problèmes de réalisation des systèmes [20]. L'IS est une méthodologie de travail qui aide à définir un système satisfaisant les besoins des parties prenantes tout en respectant des contraintes environnementales et économiques dans toutes les étapes de développement du système, voire jusqu'à sa fin de vie. L'objectif de l'IS est donc d'organiser et de formaliser le processus de création afin de permettre la conception de nouveaux systèmes. Le processus global d'IS est le regroupement de deux processus : le

processus de management et le processus technique. Le but du premier processus est de suivre le respect des délais et le coût financier du projet ainsi que la coordination entre les équipes de développement et les parties prenantes. Le processus technique représente les différentes activités d'IS. Il est appliqué pour spécifier, concevoir et valider le système développé.

3.2 Méthodologie de conception d'un système

La résolution du problème de conception du produit nécessite l'emploi d'un processus pour piloter le projet, de l'expression des exigences au déploiement du système. Le terme processus d'Ingénierie Système est utilisé pour désigner ce type de processus. La conception de système doit donc s'appuyer sur des démarches proposées par les standards de l'ingénierie des systèmes. Dans cette logique, nous proposons d'utiliser les recommandations de standard de l'ingénierie des systèmes EIA-632 [21] dans notre démarche de conception du système de suivi en temps réel de l'exposition personnelle aux polluants de l'air intérieur dans le milieu professionnel.

Le standard EIA-632 couvre le cycle de vie du produit à concevoir depuis la capture des besoins jusqu'au transfert du système à l'utilisateur. Selon les recommandations de l'EIA-632, il faut dans un premier temps élaborer un modèle fonctionnel logique du système à concevoir en se basant sur un cahier des charges bien détaillé. Après cette phase, le standard définit le processus de vérification et de validation du système. Dans le cadre de cette thèse, notre travail sera limité aux processus de définition du système et d'établir un modèle logique du système. Nous utilisons les méthodes de test et de prototypage pour la vérification et la validation du système.

3.3 Le standard EIA-632

Dans cette section, nous présentons les principes préconisés par le standard EIA-632. Ce standard est conçu pour conduire le développement de systèmes techniques de la définition des besoins jusqu'à leur mise en service. La figure 2.5 présente les différents processus du standard. L'EIA-632 propose au développeur système un ensemble de processus regroupés en 5 groupes :

- Les processus de management technique
- Les processus d'acquisition et de fourniture
- Les processus de conception système
- Les processus de réalisation du produit
- Les processus d'évaluation technique

Ces cinq catégories regroupent treize processus qui sont à appliquer sur chaque sous-système pour permettre de spécifier, modéliser, développer et valider ces sous-systèmes tout en respectant un certain nombre d'exigences. Tous ces processus sont gérés et contrôlés par les processus de management technique. Les processus d'évaluation technique permettent des analyses systèmes, des validations d'exigences, des vérifications systèmes et des validations des produits durant le développement.

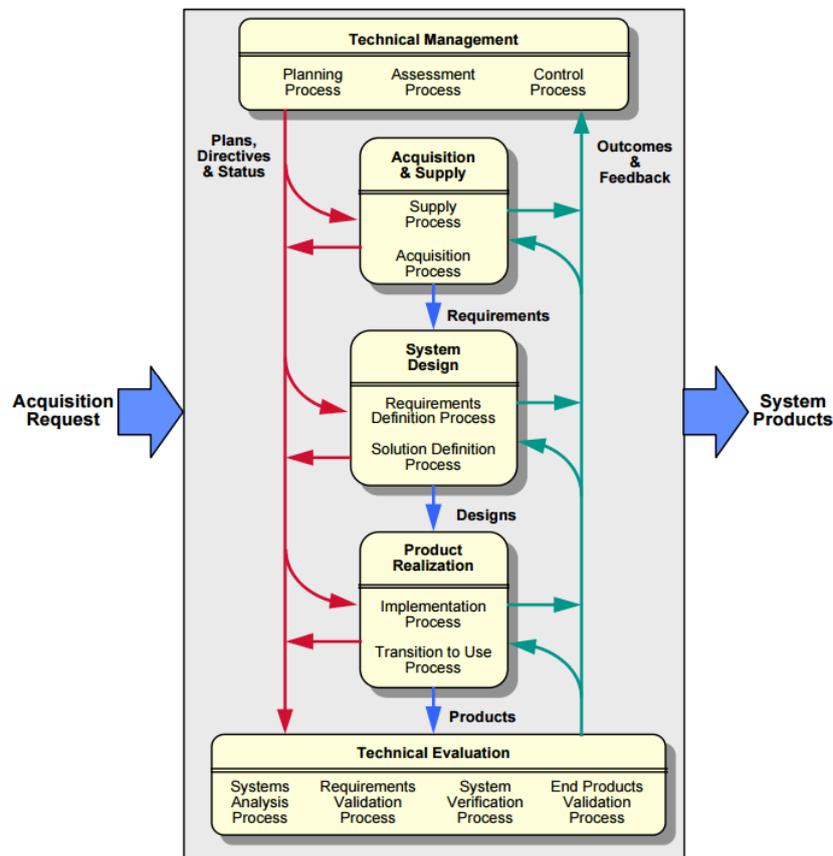


Figure 2.5 : Les processus de l'EIA-632

Le standard EIA-632 définit 33 sous processus que le développeur système doit sélectionner en fonction de son étude. Dans le cadre du projet « CAPFEIN » nous utilisons le processus de définition des exigences et le processus de définition de la solution.

3.3.1 Structure d'un système selon l'EIA-632

Selon l'EIA-632, un système peut être représenté sous la forme d'un arbre constitué d'un nombre de blocs de construction « *building block* ». Chaque bloc de construction présente la même structure quel que soit son emplacement dans l'arbre. Chaque bloc de construction est alors considéré comme un produit qui a des caractéristiques et des exigences identifiées. Le système est décomposé en un ou plusieurs produits finis associés eux-mêmes à un ensemble de

produits contributeurs. La décomposition du système continue jusqu'à l'identification d'un des trois produits finis :

- Produits finis sur étagère
- Produits finis pouvant être implémentés directement
- Produits finis pouvant être fournis par un sous-traitant

3.3.2 Les processus de conception du système

Les processus de conception du système permettent de fournir les différentes spécifications, le plan et les modèles de la solution logique à partir des exigences de toutes les parties prenantes à savoir les exigences d'acquéreur et les exigences des autres parties prenantes. Pour traiter ces exigences, deux processus sont utilisés : le processus de définition des exigences et le processus de définition de la solution. La figure 2.6 présente les interactions entre ces deux processus.

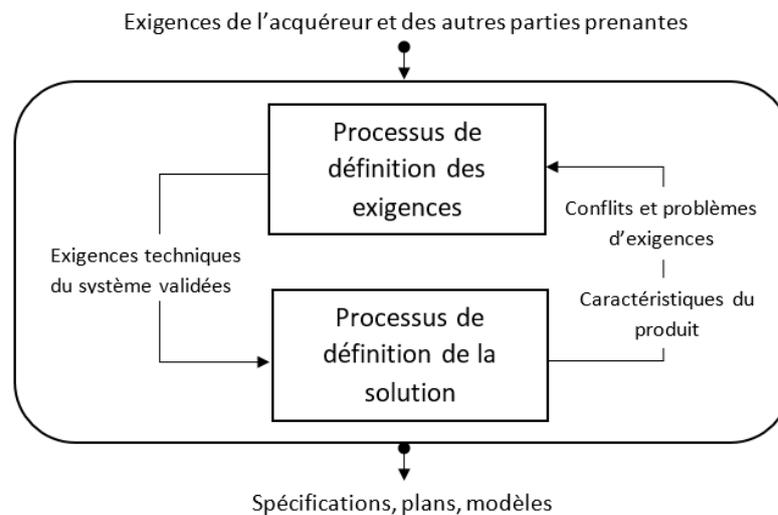


Figure 2.6 : Le processus de conception selon l'EIA-632

3.3.2.1 Le processus de définition des exigences

Le processus de définition des exigences permet de convertir les exigences des parties prenantes en un ensemble d'exigences techniques du système. Ce processus regroupe trois sous processus :

- Les exigences de l'acquéreur : le développeur doit identifier, collecter et hiérarchiser les besoins de l'acquéreur.
- Les exigences des autres parties prenantes : le développeur doit spécifier les besoins des autres parties prenantes concernées précisément par certains produits contributeurs.

- Les exigences techniques du système : le développeur doit définir les contraintes opérationnelles du système et les exigences de performances.

3.3.2.2 Le processus de définition de la solution

Le processus de définition de la solution définit les spécifications, représentations, plans et modèles correspondant à la solution de conception à partir de l'ensemble des exigences techniques du système (voir figure 2.6). Trois sous processus sont associés à ce processus générant les représentations de la solution logique, les représentations de la solution physique et les exigences spécifiées. L'utilisation des modèles conceptuels formels ou semi-formels (UML, SysML, réseaux de Pétri, machine à états finis...) est recommandé pour les présentations de la solution logique.

3.3.3 Outil de modélisation

Dans notre étude, nous choisissons d'utiliser l'outil SysML « System Modeling Language ». SysML est un langage de modélisation graphique dérivé d'UML « Unified Modeling Language ». En plus de diagrammes déjà intégrés dans l'UML, SysML propose deux nouveaux diagrammes pour bien répondre aux besoins de l'IS à savoir le diagramme d'exigences et le diagramme paramétrique.

3.4 Diagramme d'exigences

Gérer les exigences d'un système est une activité fondamentale pour réussir sa conception. Une exigence correspond à une expression de besoin de l'acquéreur ou de toutes autres parties prenantes en lien avec le système à développer. La figure 2.7 présente le diagramme d'exigences de la solution de suivi de l'exposition personnelle. Ce diagramme modélise les exigences devant être vérifiées par le système en liant les solutions mises en œuvre sur le système avec les besoins définis dans le cahier des charges. Une exigence est définie comme un stéréotype « requirement » de classe UML. Elle inclut les propriétés pour spécifier son identifiant unique, sa description textuelle, sa priorité et d'autres propriétés optionnelles.

Il existe plusieurs relations d'exigences qui permettent de relier des exigences à d'autres exigences ou à d'autres éléments de modèles. On trouve des relations pour définir une hiérarchie d'exigences (contenance), des exigences dérivées « deriveReq », des exigences satisfaites par d'autres éléments du modèle « satisfy », des scénarios de tests vérifiant des exigences « verify » et des exigences affinées « refine ». Afin de présenter plus lisiblement les

critères et niveaux associés à chaque exigence, nous avons détaillé ces exigences dans le tableau 2.2. Ce tableau permet aussi d'identifier les exigences importantes à considérer dans l'étude de notre système.

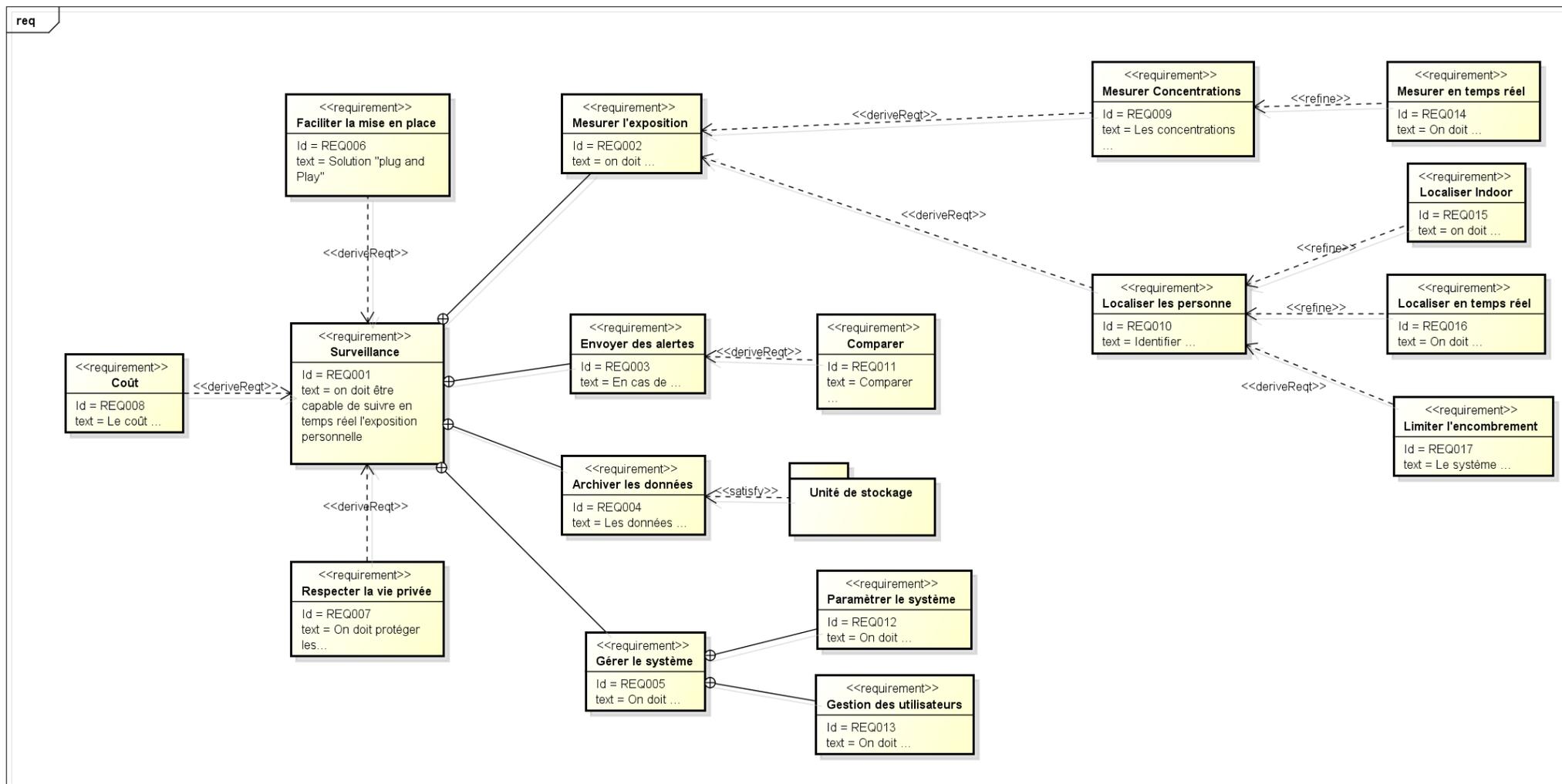


Figure 2.7 : Diagramme des exigences du système de surveillance de l'exposition personnelle aux polluants de l'air intérieur

Tableau 2.2: Liste des exigences du système de suivi de l'exposition personnelle

| Exigence | Priorité | Description |
|--|-----------------|---|
| Surveiller de l'exposition personnelle | Haute | On doit être capable de suivre en continu et en temps réel l'exposition personnelle aux polluants de l'air intérieur dans un milieu professionnel |
| Mesurer l'exposition personnelle | Haute | On doit être capable de mesurer l'exposition personnelle moyenne aux polluants de l'air intérieur |
| Mesurer les concentrations | Haute | On doit être capable de mesurer les concentrations de polluants dans l'air intérieur |
| Mesurer en continu et en temps réel | Haute | On doit être capable de mesurer plusieurs polluants en continu et en temps réel |
| Localiser les personnes | Haute | On doit être capable d'identifier l'emplacement d'une personne |
| Localiser indoor | Haute | On doit être capable de localiser les personnes à l'échelle d'une salle |
| Localiser en continu et en temps réel | Haute | On doit être capable d'identifier l'emplacement des personnes périodiquement et en temps réel |
| Limiter l'encombrement | Haute | On doit développer un système de localisation qui ne gêne pas l'utilisateur |
| Envoyer des alertes | Haute | On doit être capable de détecter le dépassement d'un seuil et d'envoyer un message d'alerte vers le superviseur |
| Archiver les données | Haute | On doit être capable de sauvegarder les données pour des analyses ultérieures |
| Gérer le système | Haute | On doit être capable de configurer les différents paramètres du système |
| Paramétrer le système | Haute | On doit être capable de modifier les paramètres du système tels que la période de mesure, la période de localisation, les seuils etc... |
| Gérer des utilisateurs | Haute | On doit être capable d'ajouter de modifier et de supprimer un utilisateur ou un participant |
| Faciliter la mise en place | Moyenne | On doit être capable d'installer facilement le système (solution "Plug and Play" ne nécessitant pas l'intervention d'un expert). |
| Respecter la vie privée | Faible | On doit être capable de protéger les données sur la vie privée d'utilisateurs |
| Considérer le coût du système | Moyenne | On doit être capable de développer une solution à moindre coût. |

3.5 Modélisation de la solution logique selon les recommandations de l'EIA-632

Après l'identification et la modélisation du diagramme des exigences, le standard EIA-632 préconise d'élaborer le modèle logique de la solution en se basant sur le processus de présentation de la solution logique. La solution logique ne propose pas de technologies de réalisation. Seuls les concepts sont mis en avant sous la forme de fonctions. La solution logique précède la solution physique qui intégrera la dimension technologique construite à partir des technologies et des fournitures disponibles. L'étape finale d'assemblage conduit au prototypage réel que l'on devra valider expérimentalement.

3.5.1 Diagramme de contexte

Le diagramme de contexte permet de représenter le système au sein de son environnement. Ce diagramme est une modélisation qui met en évidence la fonction principale du système, les acteurs qui sont des entités ou des personnes interagissant avec le système et les interactions entre les acteurs et le système. Il est nécessaire dans un premier temps de définir les fonctions techniques et les interactions du système avec d'autres systèmes ou personnes en se basant sur la description dans le cahier des charges.

Après une analyse du cahier des charges, nous avons défini les fonctions attendues et les besoins que le développeur doit satisfaire :

- Surveiller en temps réel l'exposition personnel aux polluants de l'air intérieur dans un milieu professionnel,
- Mesurer les concentrations de polluants en temps réel dans chaque pièce du milieu professionnel,
- Mesurer la température et l'humidité dans chaque pièce de milieu professionnel,
- Identifier chaque employé.
- Détecter et identifier la présence des employés dans chaque pièce en temps réel,
- Alerter le superviseur en cas de dépassement de seuils,
- Configurer la fréquence de mesure des polluants, la période de mise à jour de l'emplacement des employés, les seuils d'exposition par durée et par polluants, les actions d'alerte,

Après l'énumération des fonctions techniques, nous avons retenus trois acteurs principaux : l'employé ou participant, l'environnement intérieur et le superviseur. Ces acteurs interagissent tous avec d'autres entités du système :

- Le participant interagit en fournissant son identifiant unique et sa localisation.
- L'environnement intérieur interagit avec le système en indiquant les valeurs de pollution, la température intérieure et l'humidité intérieure.
- Le superviseur interagit en configurant la période des mesures de concentrations de polluants, en configurant la période de localisation des participants, en configurant les seuils d'exposition et en traitant les alertes reçus visant à protéger la santé des participants.

La figure 2.8 présente le diagramme de contexte que nous retenons.

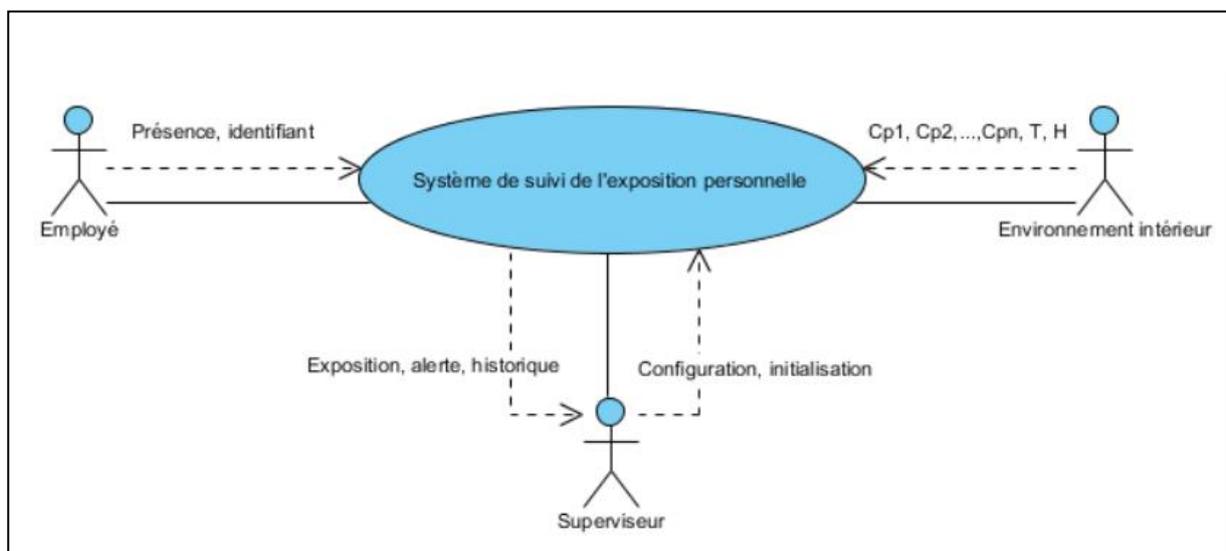


Figure 2.8 : Diagramme de contexte

3.5.2 Identification des services

Le diagramme de cas d'utilisation permet de décrire l'utilisation qui est faite du système par ses acteurs pour répondre à un besoin. La figure 2.9 représente le diagramme de cas d'utilisation du système de surveillance de l'exposition personnelle. Ce diagramme présente l'ensemble des services exigés par le cahier des charges. Le diagramme de cas d'utilisation sert à compléter et à classer les fonctionnalités déjà perçues dans le diagramme de contexte et représenter toutes les fonctionnalités à partir du diagramme des exigences.

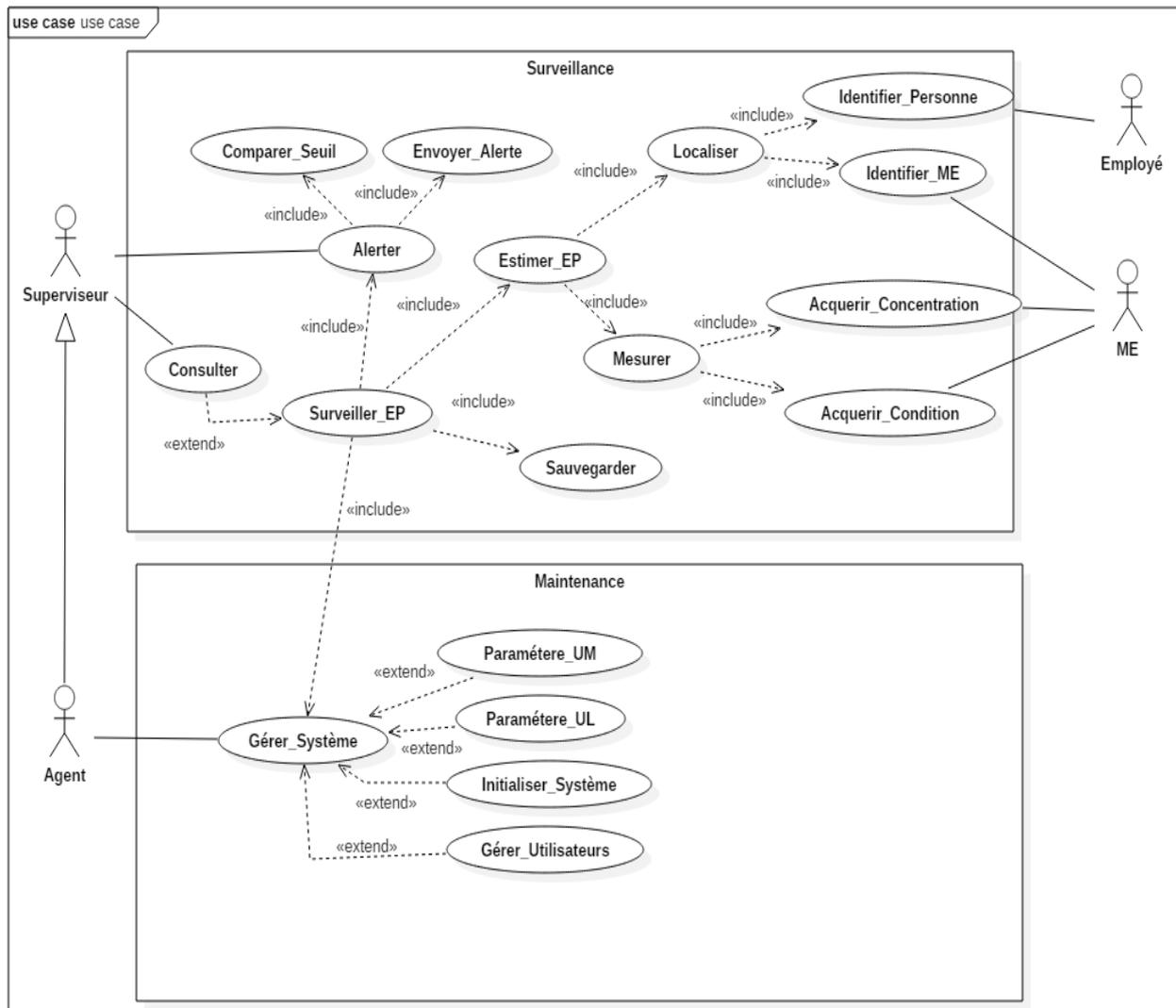


Figure 2.9 : Cas d'utilisation du système de surveillance de l'exposition personnelle

Trois relations entre cas d'utilisation sont possibles : les relations « include », « extend » et la relation de communication entre acteur et cas d'utilisation.

- Une relation « include » est utilisée pour indiquer que le cas d'utilisation source (départ de la flèche) contient toujours le cas d'utilisation inclus.
- Une relation « extend » est utilisée pour indiquer que le cas d'utilisation source (à l'origine de la flèche) est nécessaire dans certaines situations.
- Une relation entre un acteur et un cas d'utilisation suppose une interface de communication et d'échange d'informations entre l'acteur et le système.

Pour faciliter la lecture de ce diagramme, nous avons distingué deux cas d'utilisation : la surveillance de l'exposition personnelle et la maintenance du système. Dans la surveillance de l'exposition personnelle, il y a cinq services principaux : la mesure de l'environnement qui

permet de remonter des informations sur les polluants et des informations d'ambiance (température, humidité), la localisation d'une personne par rapport à un micro environnement, le calcul des taux d'exposition, et l'affichage des données en mode consultation ou à la suite d'une alerte. Pour la maintenance, des services de configuration ou paramétrage sont associées pour chacun de services précédents.

Nous décrivons dans la suite de façon plus fine ces services.

- **Le service de mesure** : ce service permet de mesurer les concentrations de formaldéhyde et d'autres polluants dans l'air intérieur en temps réel en se basant sur le capteur développé par notre partenaire de projet ICCPES.

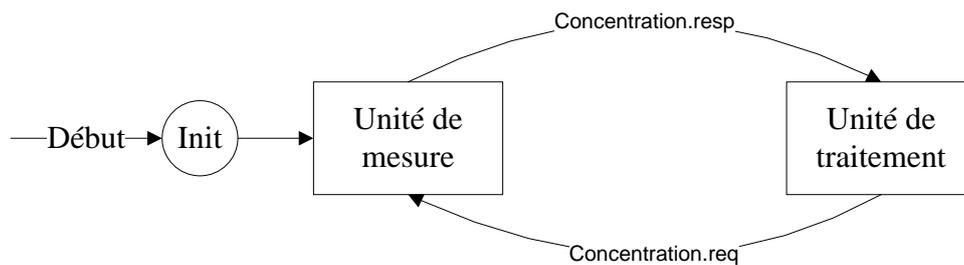


Figure 2.10 : Service de mesure de la pollution dans l'air intérieur

- **Le service de localisation** : Ce service permet de suivre de chaque employé. Le sous-système lié à la personne doit envoyer périodiquement et en temps réel les informations sur sa position.

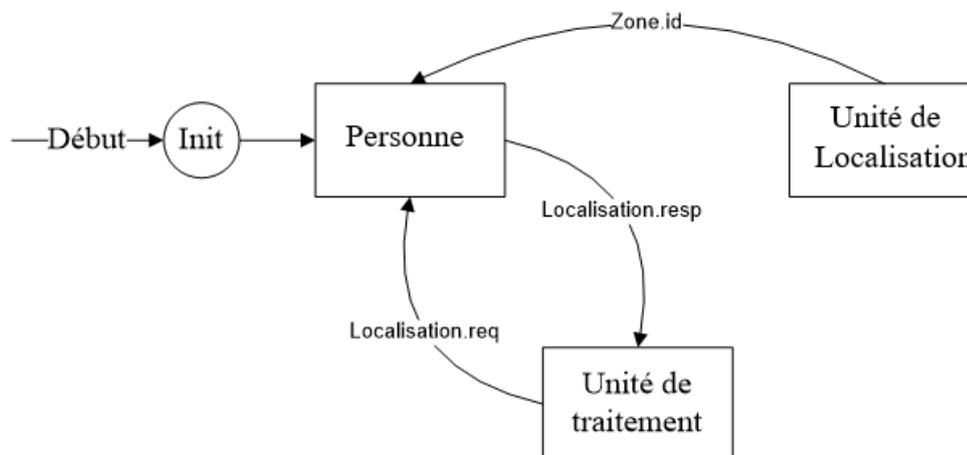


Figure2.11 : Le service de localisation de personnes

- **Le service d'estimation de l'exposition personnelle moyenne** : Ce service permet d'évaluer l'exposition personnelle aux polluants à l'intérieur des bâtiments. L'exposition personnelle est estimée en faisant le lien entre les mesures de

concentrations des polluants dans les différentes zones et les informations sur l'emplacement des employés.

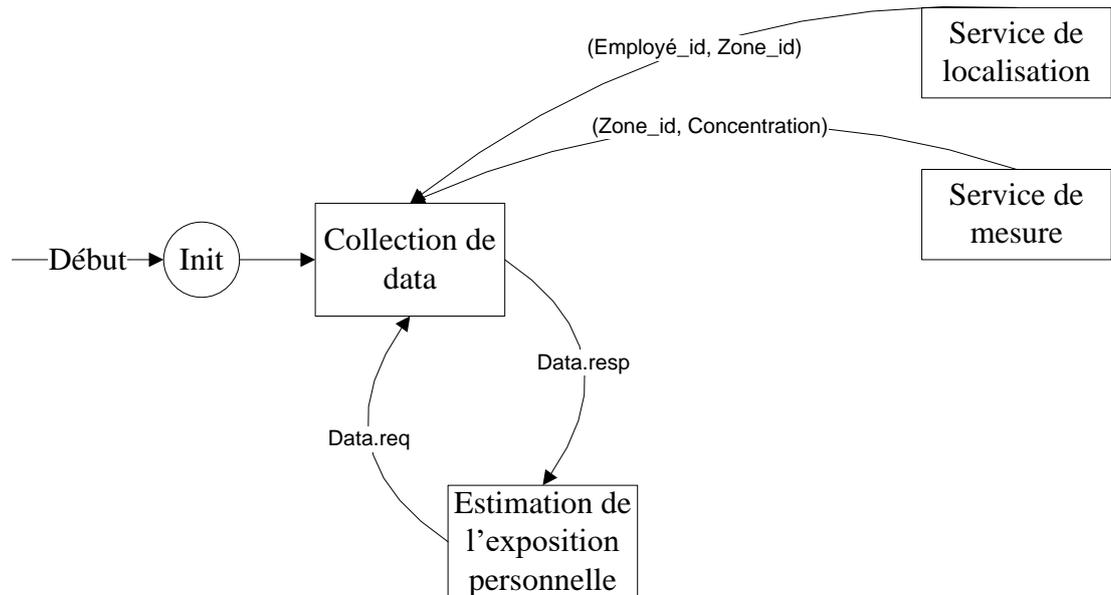


Figure 2.12 : Le service de mesure de l'exposition personnelle

- **Le service d'alerte** : Ce service permet de prévenir les responsables hygiène sécurité environnement en temps réel en cas de dépassement des seuils d'exposition fixés par la réglementation et les organismes de surveillance de la qualité d'air intérieur.

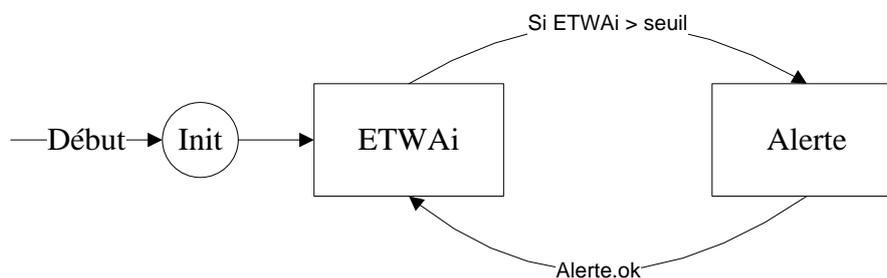


Figure 2.13 : Le service d'alerte

- **Le service de stockage** : Ce service permet de sauvegarder les différentes informations dans une unité de stockage pour des analyses ultérieures. Ces informations incluent les concentrations de polluants, les emplacements de chaque personne, les alertes et l'exposition personnelle.

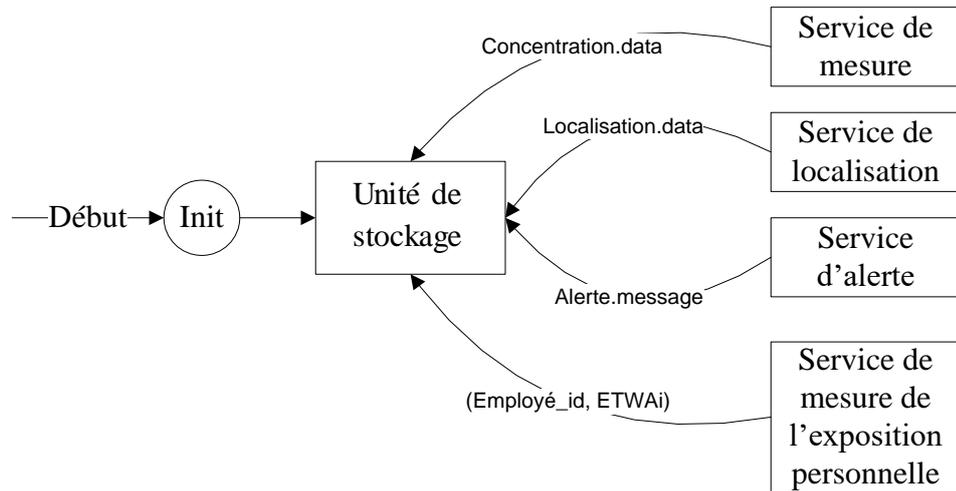


Figure 2.14 : Le service de stockage de données

- **Le service de gestion du système** : Ce service permet de modifier les paramètres du système tels que la période de mesure, la période de mise à jour de l'emplacement, Zone_id, Employé_id etc...

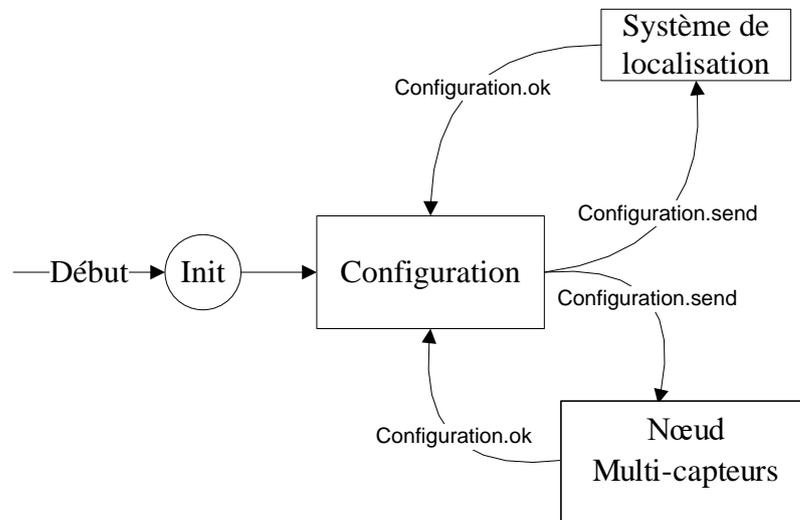


Figure 2.15 : Le service de configuration

3.5.3 Diagramme des séquences

Les diagrammes des séquences précisent la logique séquentielle du système et les relations inter fonctionnelles. Dans notre étude le diagramme maître est celui du suivi de l'exposition personnelle. Le diagramme de séquence de la figure 2.16 présente les interactions entre les différents éléments du système. On distingue six entités (logiques ou physiques) :

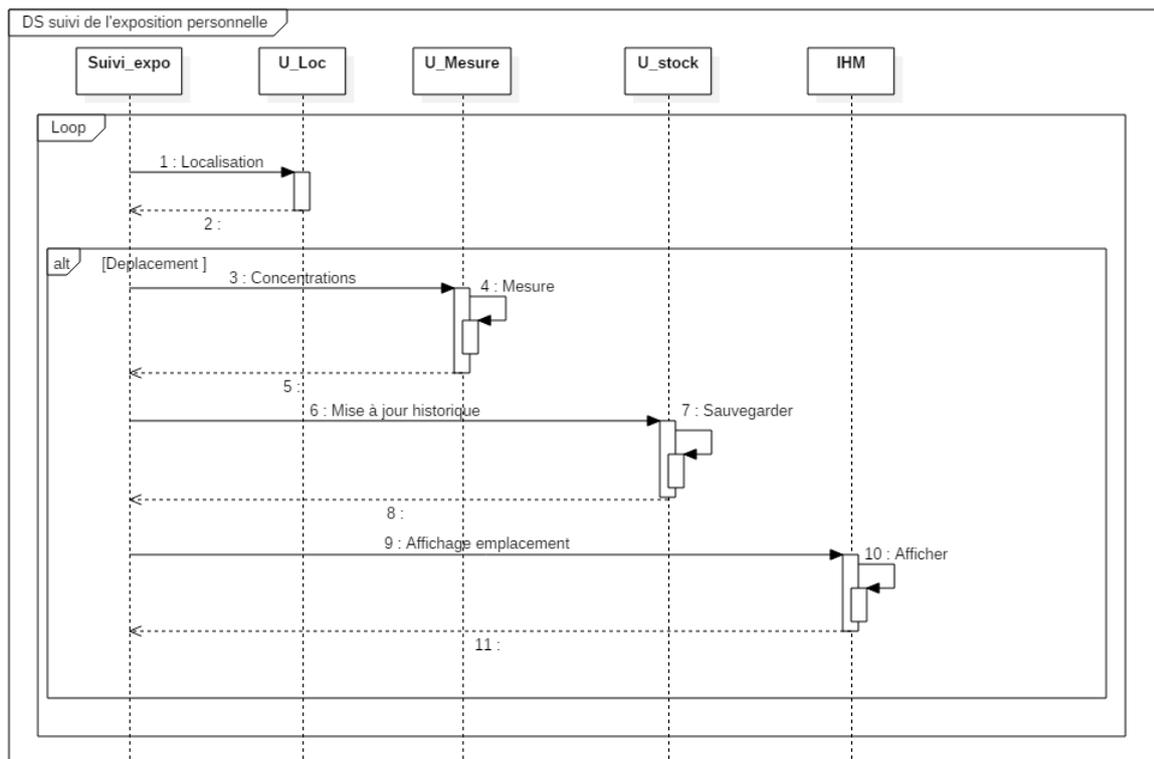
- Suivi_expo : entité qui traite le suivi de l'exposition.
- U_Loc : entité qui localise les personnes à l'intérieur d'un bâtiment.

- U_Mesure : entité qui mesure les concentrations des polluants
- Exposition : entité qui calcule l'exposition personnelle.
- U_Stock : entité qui stocke les données.
- IHM : entité qui présente l'Interface Homme Machine (Superviseur-Systeme).

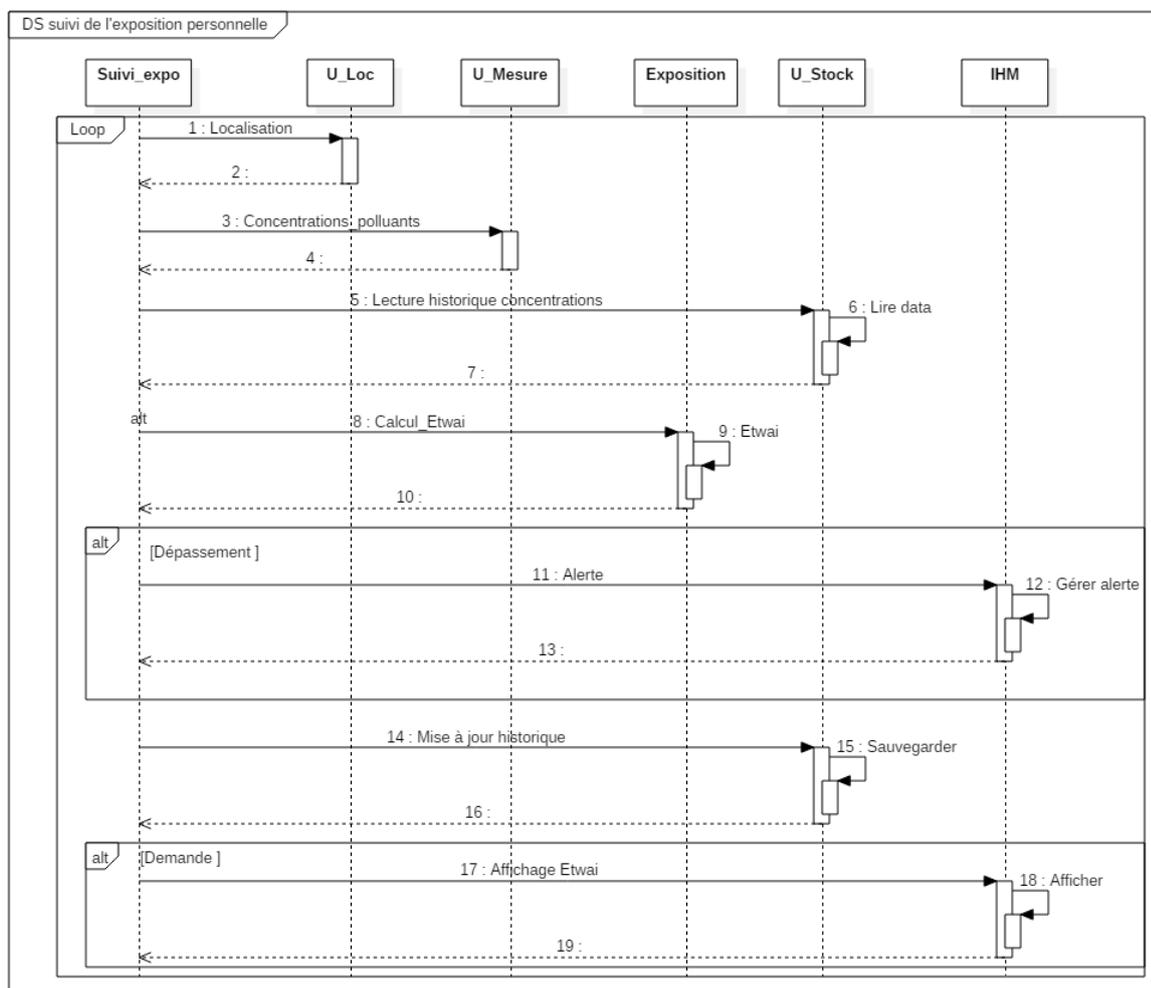
Le suivi de l'exposition personnelle est composé de deux processus indépendants et qui se déclenche périodiquement suivant les valeurs β et γ . β , appelé aussi période d'estimation, est la période de mise à jour de l' $E_{TW_{Ai}}$. C'est le temps nécessaire à un capteur de polluants de l'air pour mesurer la concentration. Ce temps varie de quelques minutes à une dizaine de minutes selon le polluant et les caractéristiques du capteur. Le réglage de cette période est fonction de l'échantillonnage nécessaire pour donner les durées d'exposition λ mentionnées par la législation et les organismes de surveillance de la qualité d'air intérieur (15min, 30min, 1H, 2H, 8H, 5 jours, etc...). γ , appelé aussi période de localisation, représente la période de mise à jour de l'emplacement des personnes. Elle permet de détecter tout changement d'emplacement entre deux estimations successives de l' $E_{TW_{Ai}}$. γ doit être impérativement inférieur à β . Son réglage est lié à la fréquence de déplacement des personnes dans les différents microenvironnements de façon à pouvoir détecter tous les changements de pièces.

Description du processus décrit dans la figure 2.16.a : Suite à l'expiration de γ , le système localise les participants et il compare leur emplacement actuel avec le dernier emplacement connu. Si le système détecte un changement d'emplacement, le système récupère les concentrations dans les anciens microenvironnements et met à jour les concentrations de polluant associées à ces participants. Toutes ces données sont sauvegardées dans une unité de stockage et elles seront utilisées dans le processus décrit dans la figure 2.16.b.

Description du deuxième processus (figure 2.16.b) : Suite à l'expiration de β , le système localise tout d'abord les participants puis il récupère la dernière mesure de concentrations dans les différents microenvironnements. Cette dernière mesure (mesure courante) est utilisée avec celles stockées dans le processus de la figure 2.16.a pour mettre à jour l'exposition personnelle moyenne $E_{TW_{Ai}}$ pour chaque polluant de l'air intérieur et pour chaque durée d'exposition. En cas de dépassement de seuils, le système doit alerter le superviseur en lui envoyant un message d'alerte (Figure 2.16.b). Ces informations peuvent être consultées par le superviseur.



(a)



(b)

Figure 2.16: Diagramme de séquence : suivi d'exposition personnelle

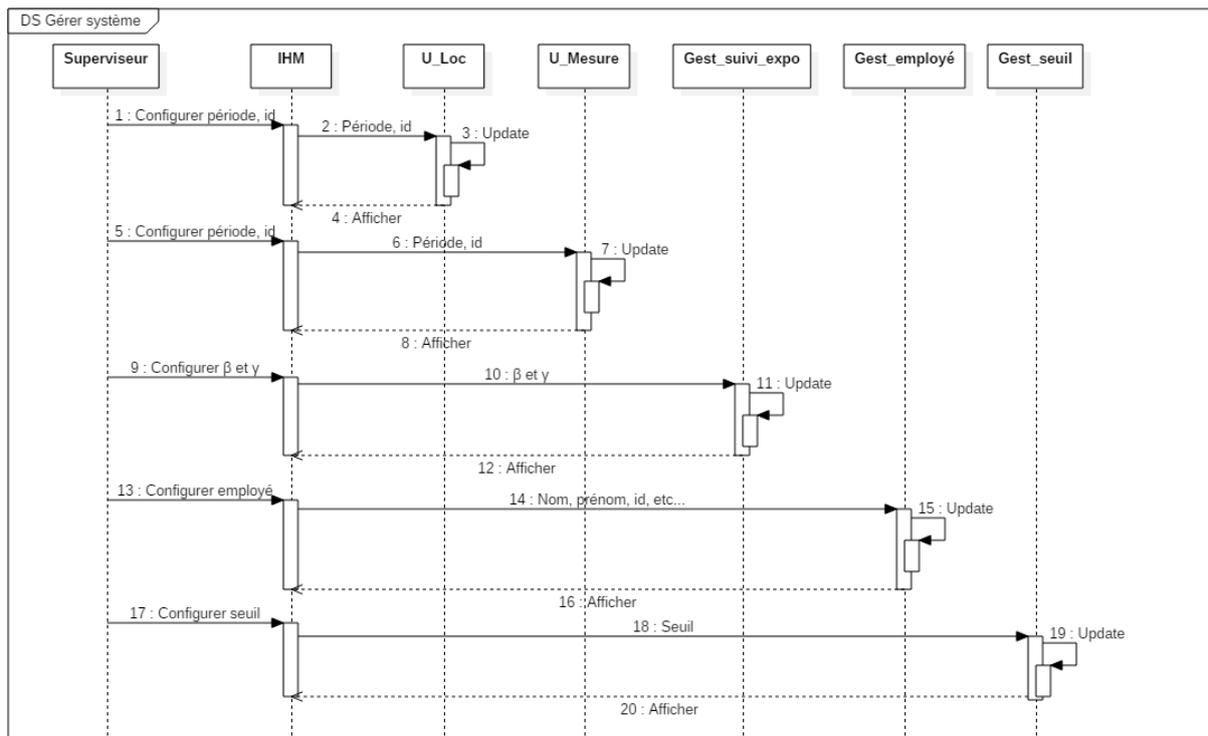


Figure 2.17 : Diagramme de séquence : Gérer Système

Le deuxième diagramme de séquence (figure 2.17) représente le cas d'utilisation « Gérer_système ». Ce diagramme montre les messages échangés avec les différentes entités pour paramétrer le système selon les consignes du superviseur. Les entités Gest_suivi_expo, Gest_Employé et Gest_Seuls représentent respectivement le processus de gestion de suivi d'exposition pour régler les paramètres β et γ , le processus de gestion des employés et le processus de gestion des seuils.

3.5.4 Diagramme d'activités

Le diagramme d'activités synthétise les actions successives effectuées par le système. Ce diagramme consolide la spécification des cas d'utilisation. Nous élaborons le diagramme d'activité sur la base des diagrammes des séquences. La figure 2.18 montre le diagramme d'activité correspondant au cas d'utilisation « Surveiller l'exposition personnelle » mais sans mentionnant les entités impliquées. Ce diagramme d'activités montre qu'après la mise en marche (état de départ) le système reste en état d'attente d'un événement pour déclencher une série d'actions. Les actions sont déclenchées périodiquement selon les valeurs β et γ .

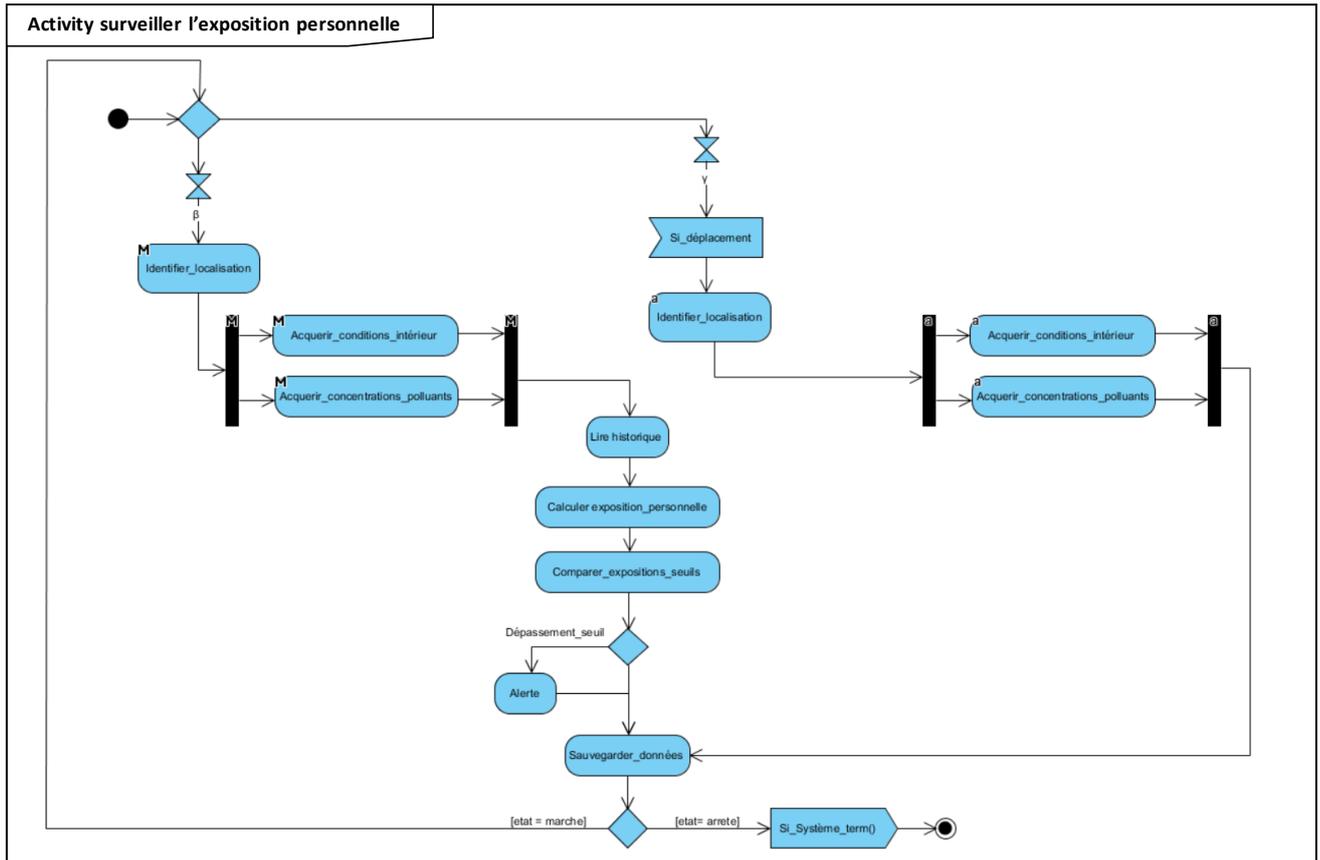


Figure 2.18 : Diagramme d'activité : surveiller l'exposition personnelle

A chaque période γ , le système met à jour la localisation de la personne et acquiert les concentrations de polluants dans l'air ainsi que les conditions intérieures des microenvironnements les personnes ont été repérées. Ensuite, le système sauvegarde ces données et se met en sommeil jusqu'à la prochaine période.

A chaque période β , le système récupère les informations sur la localisation et la pollution de l'air. Ces informations sont utilisées en complément de l'historique des données pour calculer le taux d'exposition de chaque participant $E_{TW_{Ai}}$. En cas de dépassement de seuil, le système envoie une alerte au superviseur. Finalement le système sauvegarde les données et se met en sommeil jusqu'à la prochaine période.

4. Conclusion

Le chapitre 2 a présenté le contexte du projet « ANR CAPFEIN » et la démarche que nous avons suivie dans le cadre de ce projet en se concentrant sur l'objectif de conception des solutions logiques selon le standard d'ingénierie de systèmes EIA-632. Cette partie du travail a été validée lors de réunions avec les partenaires du projet CAPFEIN avant de passer aux

solutions physiques. Dans notre étude, pour analyser le taux d'exposition des personnes, il faut être capable de mesurer la pollution de l'air. La solution utilisée dans le projet CAPFEIN pour faire cette mesure est celle proposée par nos partenaires. Et il faut aussi être capable de localiser les personnes dans un bâtiment et dans notre cas particulier dans un microenvironnement. Dans le chapitre suivant, nous faisons un état de l'art sur les solutions existantes en matière de localisation intérieure que nous pourrions choisir ou dont nous pourrions nous inspirer pour notre application.

Bibliographie

- [1] Casset, A., Marchand, M., Le Calvé, S., Mirabel, P. and de Blay, F. Human Exposure Chamber to known formaldehyde levels: Generation and validation. *Indoor Built Environment*, 2005; 14, 173-182.
- [2] Casset A., Marchand C., Purohit A., Le Calvé S., Donnay C., Meyer P., Pauli G., de Blay F. Inhaled formaldehyde exposure: effect on bronchial response to mite allergen in sensitized asthmapatients. *Allergy*, 2006; 61,344-50
- [3] Marchand, C., Bulliot B., Le Calvé S. and Mirabel P. Aldehyde Measurements in indoor environment in Strasbourg (France). *Atmospheric Environment*, 2006; 40: 1336-1345.
- [4] Marchand, C., Le Calvé S., Mirabel P., Glasser N., Casset A., N. Schneider and de Blay F. Indoor aldehydes concentrations and determinants in 162 homes in Strasbourg (France). *Atmospheric Environment*. 2008 ; 42: 505-516.
- [5] Marchand C. "Incidences des teneurs en aldéhydes mesurées dans l'air intérieur et extérieur sur des patients sujets à l'asthme" *Thèse soutenu en 2005 Université de Strasbourg*
- [6] IARC monographs on the evaluation of the carcinogenic risk of chemicals to humans. Lyon, *Centre international de recherche sur le cancer*, 1995, Vol 65, 217 p.
- [7] Reach 2015 <http://www.formacare.org/regulatory-information/reach/> [En ligne Mars 2015]
- [8] Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (Afsset). Evaluation des risques sanitaires pour la population générale liés à la présence de formaldéhyde dans les environnements intérieurs et extérieurs, *Afsset 2008*
- [9] Legifrance, <http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000024909119&categorieLien=id> [En ligne Mars 2015]
- [10] Vincent R., Kaupinnen T., Toikkanen J., D. Pedersen, R. Yong, Kogevinas M. CAREX, "Système international d'information sur l'exposition professionnelle aux agents cancérigènes en Europe. *Cahiers de Notes Documentaires de l'INRS*," ND 2113-176-99, 1999, 176, pp. 49-58.
- [11] Guignon N., Niedhammer I., Sandret N. Les facteurs psychosociaux au travail. Une évaluation par le questionnaire de Karasek dans l'enquête SUMER 2003. *INRS Document pour le Médecin du Travail N°115 3e trimestre 2008*.
- [12] DARES : L'enquête surveillance médicale des expositions aux risques professionnels (SUMER) *DARES 2010*
- [13] Pinceloup, S., G. Laverdet, F. Maguin, J. F. Doussin, P. Carlier and G. Le Bras, Laboratory investigation of the photooxidation of formaldehyde combining FTIR analysis of stable species and HO2 detection by the chemical amplifier technique. *Journal of Photochemistry and Photobiology A : Chemistry*, 2003; 157: 275-281.
- [14] Vaizoglu, S. A., S. Aycan, M. A. Deveci, T. Acer, B. Bulut, U. D. Bayraktar, B. Akyollu, M. Celik, U. Arslan, F. Akpınar, Z. Baris, S. Arslan, A. Deniz, E. D. Evci and C. Güler Determining Domestic Formaldehyde Levels in Ankara, Turkey. *Indoor Built Environment*. 2003; 12: 329 - 336.
- [15] Hanoune, B., L. T., L. Allou, C. Marchand and S. Le Calvé, Formaldehyde measurements in libraries: Comparison between infrared diode laser spectroscopy and a DNPH-derivatization method. *Atmospheric Environment*, 2006; 40: 5768-5775.
- [16] Wisthaler, A., E. C. Apel, J. Bossmeyer, A. Hansel, W. Junkermann, R. Koppmann, R. Meier, K. Müller, S. J. Solomon, R. Steinbrecher, R. Tillmann and T. Brauers, Technical Note: Intercomparison of formaldehyde measurements at the atmosphere simulation chamber SAPHIR. *Atmospheric Chem. Phys*, 2008; 8: 2189-2200.
- [17] INERIS 2013, Métrologie et niveaux de concentration du formaldéhyde en air intérieur : étude bibliographique. *INERIS 2013*
- [18] LCSQA 2009 "Air intérieur Mesure du formaldéhyde."

- [19] Negi I, Tsow F, et al. Novel monitor paradigm for real-time exposure assessment. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*. 2011; 21(4):419–426.
- [20] IEEE P1220, Standard for Application and Management of the Systems Engineering Process, 1994.
- [21] EIA-632 – Processes for Engineering a System– *Electronic Industries Alliance*, Janv. 1999

Chapitre 3 : Etude comparative des solutions de localisation en intérieur

| | |
|--|----|
| 1. Introduction | 57 |
| 2. Les techniques de localisation en intérieur | 58 |
| 2.1 Les techniques de triangulation | 58 |
| 2.1.1 Localisation par mesure du temps d'arrivée | 59 |
| 2.1.2 Localisation par mesure des différences du temps d'arrivée | 60 |
| 2.1.3 Localisation par mesure des angles d'arrivée | 61 |
| 2.1.4 Localisation par mesure de la puissance du signal reçu..... | 63 |
| 2.2 Localisation par analyse de l'empreinte du signal | 64 |
| 2.3 Localisation par proximité | 66 |
| 2.4 Localisation par analyse visuelle | 70 |
| 3. Les critères d'évaluation d'un système de localisation intérieur..... | 71 |
| 3.1 Performances | 71 |
| 3.2 Robustesse et tolérance aux pannes | 71 |
| 3.3 Coût et complexité | 72 |
| 3.4 Sécurité et respect de la vie privée..... | 73 |
| 4. Synthèse..... | 73 |
| 5. Conclusion..... | 75 |

1. Introduction

Le système proposé pour surveiller l'exposition personnelle aux polluants de l'air intérieur en milieu professionnel a été décrit fonctionnellement dans le chapitre 2. Il intègre un sous-système de localisation pour identifier le budget espace-temps des personnels puisque cette information est nécessaire pour pouvoir calculer leur exposition aux polluants. Rappelons que le budget espace-temps d'une personne correspond à la liste des microenvironnements qu'il a fréquentés et le temps passé dans chacun d'eux [1].

Au regard des exigences exprimées par les parties prenantes (voir tableau 2.2 du chapitre 2), il est clair que nous avons besoin d'un système de localisation main libre pour ne pas gêner les personnels dans leurs activités et habitudes de travail. Le terme main libre signifie que le sous-système de localisation opère sans l'usage des mains. Les solutions de localisation à base de carte à puce ou de reconnaissance d'empreintes digitales ne sont donc pas adaptées à nos besoins puisqu'elles nécessitent une action de la personne. Elles sont donc exclues de notre étude.

Plusieurs travaux pour la surveillance de l'exposition personnelle, comme nous les avons présentés dans la section 5 du chapitre 1, ont adopté le GPS (Global Positioning System) pour estimer le budget espace-temps de chaque personne. L'exactitude de la position fournie par le GPS dépend de la sensibilité du récepteur et de la nature des obstacles entre le récepteur et les satellites dédiés puisqu'ils sont des sources d'atténuation du signal. Il est toutefois assez courant que le signal GPS ne soit pas reçu à l'intérieur des bâtiments, notamment ceux dont la structure est en béton armé. L'erreur de position est de l'ordre de 3 mètres en extérieur et de 6 mètres dans les endroits clos pour des récepteurs GPS de grande sensibilité (inférieure à -160 dBm) [2]. Par conséquent, cette technologie sera elle aussi exclue de notre étude.

Nous présentons dans ce chapitre une étude comparative des techniques de localisation main libre envisageables en milieu intérieur dans l'objectif d'identifier les solutions les plus adaptées aux exigences des parties prenantes du projet ANR CAPFEIN. Le chapitre est composé de 5 parties. La section 2 décrit les principales techniques de localisation en intérieur et présente les produits qui sont disponibles sur le marché. La section 3 présente les critères d'évaluation d'un système de localisation intérieur. La section 4 rappelle les exigences relatives à notre système de surveillance en temps réel de l'exposition personnelle aux polluants de l'air intérieur et cible les solutions qui y répondent le mieux.

2. Les techniques de localisation en intérieur

Les techniques qui peuvent être utilisées pour localiser des personnes ou des objets mobiles en milieu intérieur sont intimement liées à la nature de l'information qui est recherchée : une localisation physique sous la forme de coordonnées spatiales identifiant la position du mobile dans un espace en 2 ou 3 dimensions, ou une localisation symbolique identifiant sa proximité avec un point particulier parmi tout un ensemble de points de référence.

La plupart des techniques font appel à des technologies de communication sans fil (exceptée bien sûr celle basée sur la vision qui fait appel à un réseau de caméras) et la localisation est alors déterminée à partir de la transmission de signaux entre des systèmes de communication fixes (les balises dont les positions sont connues) et le système de communication embarqué sur l'objet à localiser (le mobile, il prend souvent la forme d'un badge porté par la personne dans les produits du marché).

2.1 Les techniques de triangulation

Ces techniques s'appuient sur les lois physiques de la propagation des ondes dans l'air pour estimer les distances entre le mobile et les balises à partir de mesures réalisées sur le signal reçu. A noter que pour la localisation en intérieur, le mobile est généralement l'émetteur du signal et les balises qui le reçoivent effectuent les mesures. Puis ces mesures sont transmises à une station maître qui calcule la position du mobile. Ce type de fonctionnement est donc inverse du GPS où le mobile est le récepteur et calcule lui-même sa position à partir des mesures effectuées sur les signaux qu'il a reçus. La position du mobile peut être calculée à partir de mesures sur le temps de propagation, l'angle d'arrivée ou la puissance du signal reçu par exemples. Les modèles mathématiques donnant la distance entre l'émetteur et le récepteur en fonction de la valeur mesurée considèrent toutefois que le signal est propagé en ligne directe entre l'émetteur et le récepteur. Cette hypothèse est tenable en espace ouvert mais pas réaliste dans les bâtiments en raison des obstacles (murs, sol, plafonds, mobiliers, etc...) et toutes sortes de surfaces qui entraînent une réflexion d'une partie du signal et une diversité des chemins suivis [3]. Il n'y a aucun modèle satisfaisant pour prendre en considération les caractéristiques de la diversité des chemins en milieu intérieur, la marge d'erreur des techniques de triangulation ne peut donc pas être négligée. Ce problème peut être traité, mais pas résolu, en augmentant le nombre de balises à déployer dans le bâtiment.

2.1.1 Localisation par mesure du temps d'arrivée

La distance entre l'émetteur et un récepteur est directement proportionnelle (en ligne directe) au temps de propagation du signal puisqu'elle correspond au produit de ce temps avec la vitesse de propagation de l'onde (la célérité de la lumière pour les ondes radio). La mesure du temps d'arrivée (TOA pour « Time Of Arrival ») doit être effectuée par un minimum de trois balises pour pouvoir calculer la position du mobile par triangulation. L'émetteur diffuse un message horodaté et les balises mesurent le temps d'arrivée avec la date de réception du message. La technique TOA nécessite donc que le mobile et les balises soient parfaitement synchronisés. C'est le gros inconvénient de cette technique car cela aura un impact sur la complexité du système de géolocalisation.

Mandal et al. [4], ont proposés une solution nommée BEEP qui utilise la technique TOA. Ce système est basé sur un signal sonore généré par le mobile et au moins 4 balises par pièce, puisque les ondes sonores n'ont pas une bonne propriété de pénétration dans les matériaux opaques. Les balises transmettent les informations à la station maître par Wi-Fi. Pour réduire le coût du système, il est possible d'utiliser les téléphones mobiles, PDA (Personal Digital Assistant), etc... comme dispositif porté par la personne en se servant du signal sonore provenant de ces appareils. L'exactitude de ce système de localisation peut atteindre jusqu'à 40 cm dans 90% des cas selon les évaluations de performances réalisées par les auteurs. Cependant, l'effet du bruit réel et des obstacles peut réduire l'exactitude de la localisation de 6 à 10%. Comme le signal sonore génère un son audible, il peut être perturbé par d'autres bruits sonores dans les situations intérieures changeantes et dynamiques. De plus, ces « beeps » deviennent rapidement des sources de bruit indésirables pour les utilisateurs.

La technique TOA a aussi été adoptée par des chercheurs du laboratoire AT&T Cambridge. Ils ont développé un système appelé Active Bat [5, 6] qui est basé sur les ultrasons. Il permet de faire de la localisation en 3D et de fournir des informations d'orientation. L'émetteur des signaux est conçu sous la forme d'un badge porté par la personne. Les balises sont installées au plafond selon l'agencement d'une matrice de récepteurs comme le montre la figure 3.1. Le badge de petite taille (7.5 cm x 3.5 cm x 1.5 cm) est alimenté par une batterie de 3.6V avec une durée de vie qui peut aller jusqu'à 15 mois. Pour couvrir 1000 m², il faut fixer 720 balises pour traquer jusqu'à 75 badges, ce qui est beaucoup et donc coûteux. En contrepartie, la position estimée a dans ce cas une exactitude de 3 cm. La fréquence de mise à jour de la position est de 50 fois par seconde.

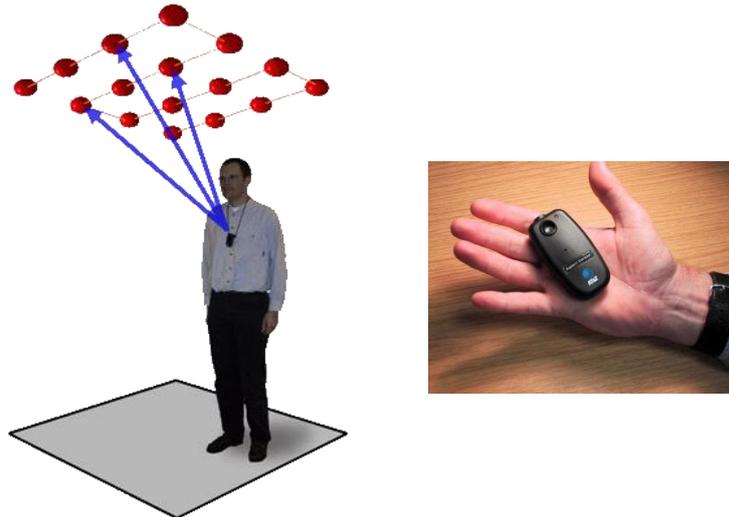


Figure 3.1 : Le système de localisation en intérieur Active Bat

Cricket est une autre solution de localisation basée sur la technologie ultrason, développée dans le cadre du projet Oxygen du MIT [7, 8]. Ce système utilise aussi la technique TOA. Il est constitué d'émetteurs ultrason fixes dont les positions sont connues, et c'est le mobile qui joue le rôle de récepteur et qui estime donc sa position. Des expériences ont montrées que la position estimée a une exactitude de l'ordre de 10 cm quand les balises sont dans la même pièce.

2.1.2 Localisation par mesure des différences du temps d'arrivée

Il est possible de s'affranchir du problème de synchronisation entre le mobile et les balises par la mesure des différences du temps d'arrivée (TDOA pour « Time Difference Of Arrival »). Le mobile diffuse toujours un message mais celui-ci n'a plus besoin d'être horodaté. Les balises qui reçoivent le message fournissent toujours les dates d'arrivée, mais au lieu de calculer le temps d'arrivée, ce sont les différences de temps entre chaque paire de balises qui sont calculées. Pour chaque paire de balises, l'ensemble des positions possibles du mobile correspond à un hyperboloïde dont les foyers sont les deux balises considérées (figure 3.2). La position du mobile est identifiée avec trois mesures, c'est-à-dire avec un minimum de 3 balises. Evidemment, les balises doivent être parfaitement synchronisées pour que la technique puisse être appliquée mais le mobile, quant à lui, n'a plus besoin de l'être et cela va donc réduire sa complexité.

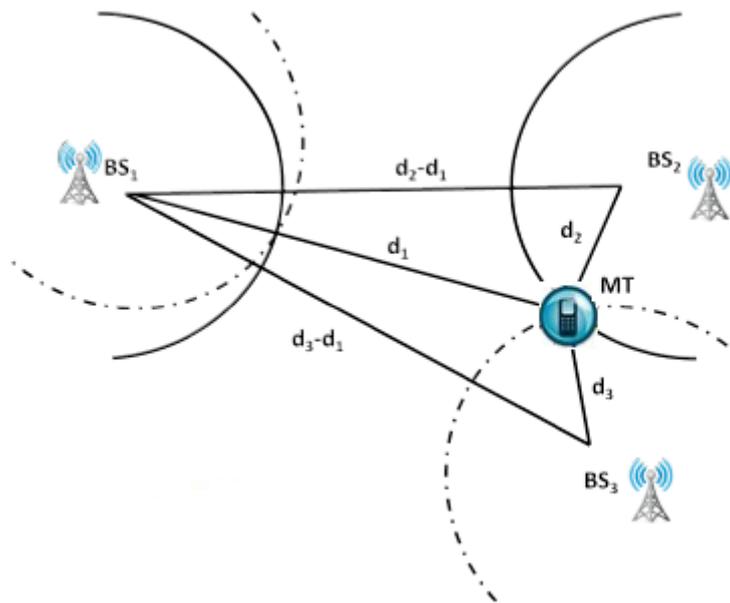


Figure 3.2 : La technique TDOA

WhereNet est un exemple de produit du marché qui utilise la technique TDOA. Il est développé par l'entreprise « Zebra Technologies » [9]. Les communications entre le boîtier porté par le mobile et les balises fixes se font par la technologie RFID active. Le boîtier de petite taille (43.7 x 66.0 x 21.3 mm) et très léger (51g) est alimenté par batterie. Son autonomie est d'environ 5 ans. Il émet périodiquement un message contenant son identifiant unique. Les balises de localisation transmettent les informations (identifiant et date d'arrivée du message) à une station maître par Ethernet ou Wi-Fi. La configuration des boîtiers est rapide et facile puisqu'elle se fait par communication RFID. Par exemple, la fréquence d'émission de l'identifiant est réglable entre 5 secondes et 1 heure. Le fabricant indique dans sa documentation que la position estimée par son système a une marge d'erreur d'environ 3 mètres dans les situations courantes.

2.1.3 Localisation par mesure des angles d'arrivée

La mesure des angles d'arrivée (AOA ou « Angle Of Arrival ») trouve son intérêt dans le fait qu'il suffit de deux mesures, donc deux balises, pour identifier la position du mobile dans un espace à deux dimensions (voir figure 3.3) au lieu de 3 mesures pour les autres techniques. De plus, les balises n'ont pas besoin d'être synchronisées. Pour mesurer l'angle d'arrivée du signal, les récepteurs doivent être équipés d'un réseau de petites antennes. A la réception du signal diffusé par le mobile, chaque balise utilise la phase ou le temps d'arrivée du signal au niveau de chaque antenne pour mesurer l'angle d'arrivée, c'est-à-dire l'angle entre le plan d'antennes et le mobile à localiser. L'angle d'arrivée permet de définir une demi-droite entre la

balise et le mobile, la position du mobile correspondant à l'intersection de deux demi-droites. Deux mesures sont donc suffisantes. Les inconvénients de cette technique sont liés au coût et à l'encombrement des balises, ainsi qu'au besoin de calibrer régulièrement chaque réseau d'antennes.

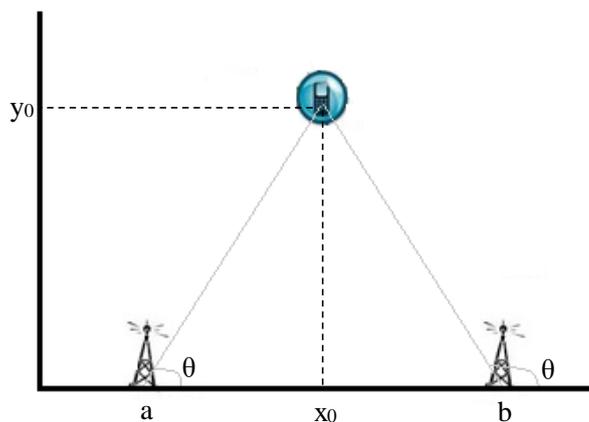


Figure 3.3 : Principe de la technique AOA

Un exemple de produit du marché est le système Ubisense [10], conçu pour localiser les produits sur les chaînes de production dans une logique de contrôle par le produit. Même si ce n'est pas sa vocation première, il peut être utilisé aussi pour localiser des personnes. Ce système est basé sur la technologie Ultra Large Bande (ULB). C'est une technologie de transmission radio basée sur la transmission d'impulsions de très courte durée (inférieure à 1 ns), ce qui permet de filtrer les signaux réfléchis indésirables. Elle est donc moins sensible aux trajets multiples ce qui permet d'améliorer l'exactitude.

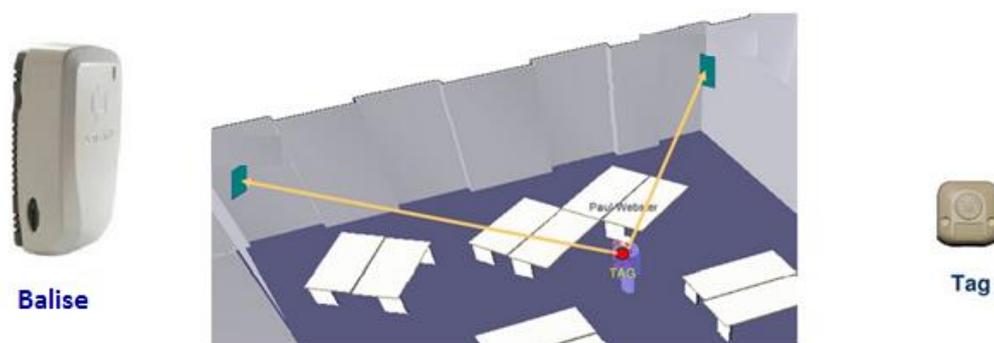


Figure 3.4 : Architecture du système de localisation ULB Ubisense

Des tags ULB fixés sur les objets à localiser, (ou portés par les personnes à suivre) envoient des signaux à des balises réparties dans l'environnement intérieur (voir figure 3.4). La technique

de triangulation, combinant la mesure de différence de temps d'arrivée (TDOA) et la mesure de l'angle d'arrivée (AOA), est employée pour estimer la position de chaque tag. Le système Ubisense peut atteindre une exactitude de 15 cm. La périodicité de mise à jour de la position est de 20 fois par seconde. Le système est extensible pour suivre la localisation sur une grande surface. Le tag est léger (45g) et la durée de vie de la batterie est d'environ 5 ans.

2.1.4 Localisation par mesure de la puissance du signal reçu

La puissance du signal reçu décroît linéairement en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur. La mesure de la puissance du signal reçu (RSS ou « Received Signal Strength ») nécessite un minimum de 3 balises pour estimer la position du mobile, comme les techniques TOA et TDOA, mais aucune synchronisation entre balises n'est nécessaire. C'est son principal atout. Cette technique nécessite toutefois que la puissance de sortie de l'émetteur et les gains d'antennes soient parfaitement connus. La mesure de la puissance du signal reçu est aussi fortement sensible aux interférences, il peut y avoir des écarts importants d'une mesure à l'autre.

Essensium est un exemple de produit du marché qui utilise la technique RSS [11]. Le badge interroge les balises placées dans des endroits connus et estime la puissance du signal reçu par chacun de ces balises. Le badge transmet les informations (identifiant et les mesures des RSS) à une station maître qui calcule la position (x,y,z). Le badge est de petite taille (6.8cm X 4.2cm X 1.8cm) et très léger (40 g). Il est alimenté par une batterie rechargeable de 500 mAh.

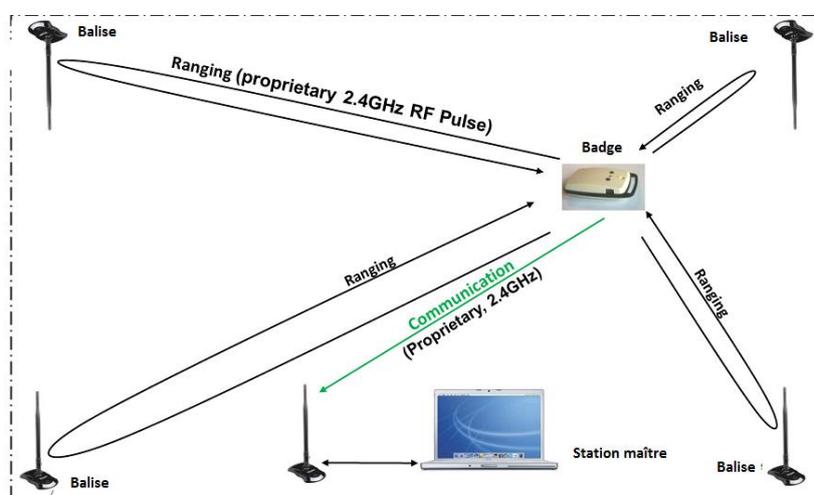


Figure 3.5 : Architecture de la solution Essensium

2.2 Localisation par analyse de l’empreinte du signal

Les performances des techniques de localisation par triangulation sont discutables en milieu intérieur puisqu’il y a une très forte probabilité pour que le signal ne suive pas un trajet direct pour arriver jusqu’aux récepteurs. La technique de localisation par analyse de l’empreinte du signal (dite technique de « fingerprinting ») permet de s’affranchir de l’hypothèse de trajet direct en utilisant une base de mesures caractéristiques du signal (empreintes numériques ou « fingerprints ») collectées en différents points de référence dans l’espace du bâtiment. La technique est habituellement appliquée sur les signaux radio fréquence avec la mesure de puissance du signal reçu pour l’empreinte (pas besoin de synchronisation) même si bien sûr, elle peut être généralisée à d’autres caractéristiques du signal et à d’autres types de signaux. Cette technique est plus adaptée aux environnements clos que les techniques de triangulation mais a besoin d’être recalibrée à chaque changement significatif de l’environnement [12, 13]. La technique se déroule en deux étapes : une étape d’apprentissage et une étape d’utilisation. La première étape se fait hors-ligne. Elle consiste à construire la base de données en prélevant des mesures du signal aux emplacements de référence. L’espace est donc décomposé en un ensemble de points judicieusement choisis et de positions connues où les empreintes du signal sont capturées puis enregistrées dans la base de données. Plus il y aura de points, plus la technique sera performante. La deuxième étape se fait en ligne, c’est la phase opérationnelle où la position du mobile est estimée. Le mobile émet un signal, les balises qui le reçoivent mesurent les caractéristiques du signal reçu et les mesures sont ensuite comparées aux valeurs de référence enregistrées dans la base de données pour en déduire la position du mobile.

L’algorithme de localisation doit être capable d’extrapoler une position non contenue dans la base de données. Plusieurs algorithmes peuvent être utilisés tels que l’algorithme des k-moyens [14] ou des algorithmes basés sur les réseaux de neurones [15]. Par exemple, la technologie Wi-Fi a été utilisée dans les travaux de [16]. Une surface de 25m x 25m a été équipée avec trois points d’accès (AP) (figure 3.6-a). Des empreintes du signal ont été collectées par des mesures du RSS. Suite à cette étape, on obtient une carte de RSS par point d’accès (figure 3.6-b). Dans la deuxième étape, en se basant sur les cartes de RSS, le système utilise l’algorithme des K plus proches voisins pour la localisation.

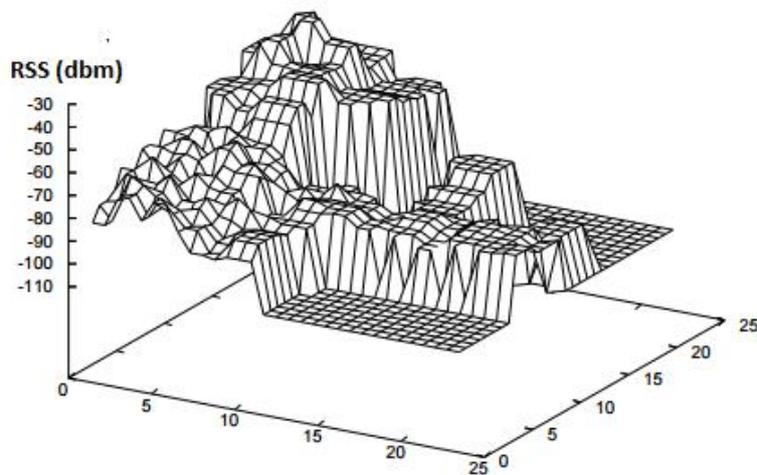
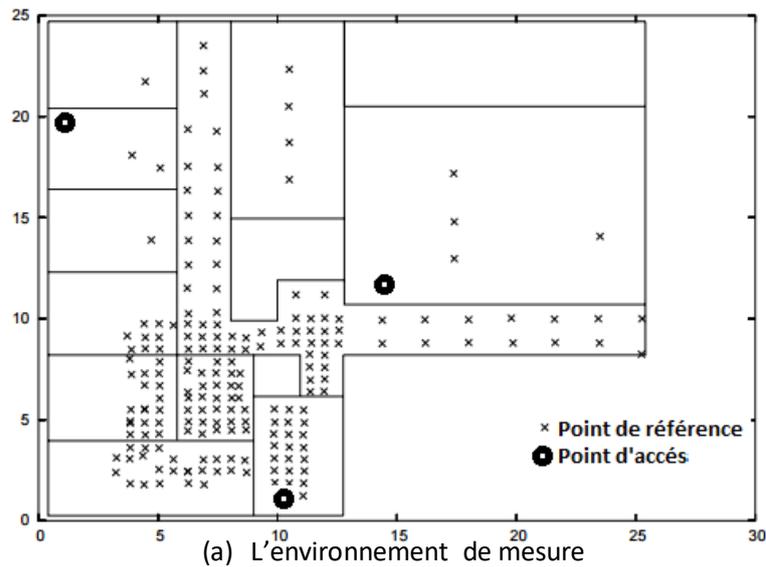


Figure 3.6 : Exemple d'utilisation de la technique de localisation par analyse de l'empreinte du signal

La technique de localisation par analyse d'empreinte est par exemple utilisée par le produit du marché Ekahau. Il est basé sur la technologie Wi-Fi [17]. Le système d'Ekahau peut donc utiliser l'infrastructure de réseau sans fil déjà présente dans le bâtiment, ce qui permet de réduire les coûts. La position des mobiles est estimée à partir de mesures de puissance de signal reçu. Ekahau est composé de trois parties : un outil logiciel pour faire l'étude de site, les badges Wi-Fi et le serveur de localisation. L'architecture du système de localisation Ekahau est schématisée figure 3.7.

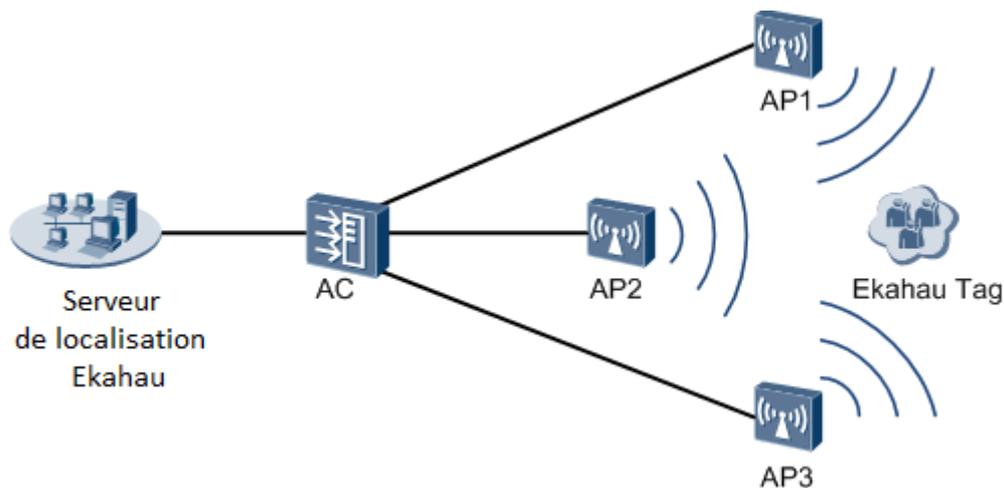


Figure 3.7 : Architecture du système de localisation en intérieur Ekahau

L'étude de site est une étape nécessaire pour estimer en temps réel la position de mobile dans le milieu intérieur. Cette étape permet de calibrer les différentes zones de site et de créer une base de données (une carte de RSS par AP) en utilisant un outil logiciel développé par Ekahau. La deuxième partie du système est le badge Wi-Fi qui peut être porté par la personne et qui transmet périodiquement un signal RF. Chaque point d'accès mesure la puissance du signal reçu et envoie les données au serveur de localisation via le réseau local qui estime la position du mobile et affiche en temps réel son emplacement sur la carte de site. Le système Ekahau permet de localiser une personne dans l'environnement intérieur avec une marge d'erreur pouvant atteindre 1 mètre si on l'utilise avec trois points d'accès. Le système est capable de suivre 1000 équipements ou personnes en même temps. Le badge Wi-Fi d'Ekahau est confortable pour l'utilisateur. Il a une petite taille (45 mm x 55 mm x 19 mm), il est très léger (48g) et la durée de vie de la batterie peut atteindre 5 ans [18].

2.3 Localisation par proximité

Le principe des techniques par proximité est radicalement différent des techniques par triangulation et analyse d'empreintes puisqu'on cherche ici une localisation symbolique et non plus une position physique absolue. Les distances entre le mobile et les balises n'ont donc plus besoin d'être estimées par des mesures sur le signal reçu. Tout simplement ici, l'arrivée d'un message est l'événement qui fournit l'information utile puisque si le signal est reçu, cela veut dire que le récepteur est à portée de l'émetteur (relation de proximité). Aucune synchronisation n'est requise.

Sur le principe, les techniques par proximité sont de faible complexité puisqu'elles ne nécessitent pas de faire des mesures du signal au niveau du ou des récepteurs. Toutefois, des

mesures du signal reçu peuvent s'avérer nécessaires lorsque le réseau de balises est dense pour traiter les situations de conflit. Ces conflits peuvent apparaître quand plusieurs balises (récepteurs) reçoivent simultanément le signal des mobiles (émetteurs) ou quand le mobile (récepteur) reçoit simultanément des signaux de plusieurs balises (émetteurs). Ces situations sont nécessairement à prévoir lorsqu'on utilise des signaux radio fréquence. Ce problème ne se pose pas pour les signaux qui n'ont pas la propriété de pénétrer les matériaux opaques (infrarouge, ultrason, etc....).

ZONITH est un exemple de produit du marché faisant la localisation par proximité. Les badges et les balises communiquent par la technologie Bluetooth. Tous les appareils dotés déjà de Bluetooth peuvent être utilisés en lieu et place de badges dédiés, c'est un avantage pour réduire les coûts. Si plusieurs balises sont à portée du mobile, le conflit est traité à l'aide d'une mesure de la puissance du signal reçu. Les balises transmettent l'information à la station maître par Ethernet.

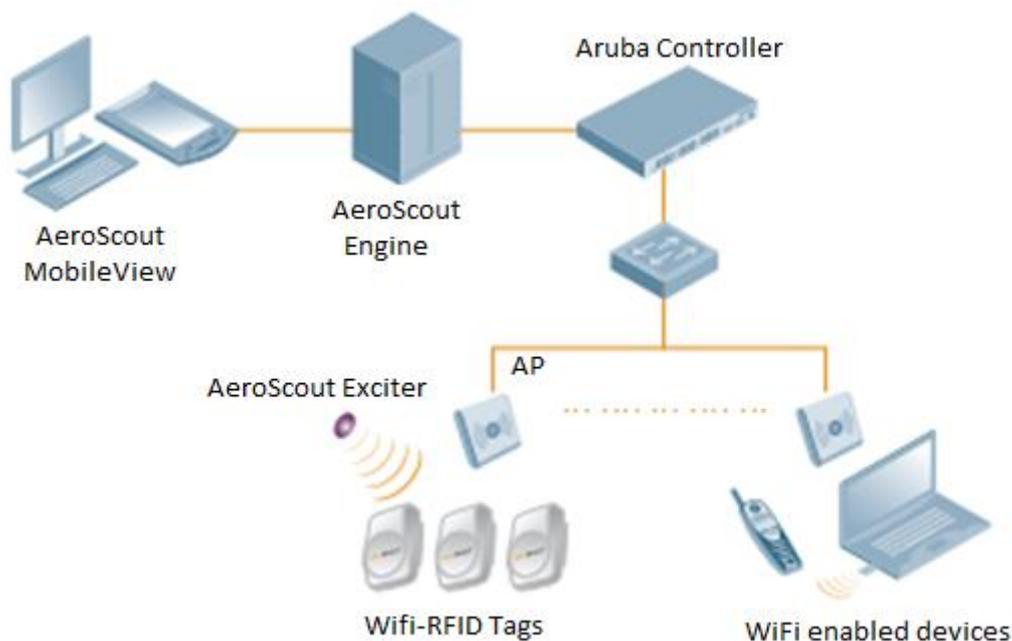


Figure 3.8 : Architecture du système de localisation AeroScout

AeroScout est un autre produit du marché qui utilise la technologie RFID [19]. Cette fois-ci, ce sont les balises fixes qui sont les émetteurs. La Figure 3.8 montre l'architecture du système AeroScout. Les balises (les « AeroScout Exciter ») sont placées à l'entrée de chaque zone. Les badges portés par les personnes sont des récepteurs RFID. Lorsqu'ils passent à proximité d'une balise, ils reçoivent l'identifiant de la zone et ils transmettent l'information à la station maître par Wi-Fi. Ils ont donc deux interfaces de communication, une RFID et une Wi-Fi. Ils sont alimentés par batterie et leur autonomie est estimée à 4 ans. AeroScout met à profit

l'infrastructure existante, ce qui permet un déploiement plus rapide, simplifie la maintenance et réduit les coûts.

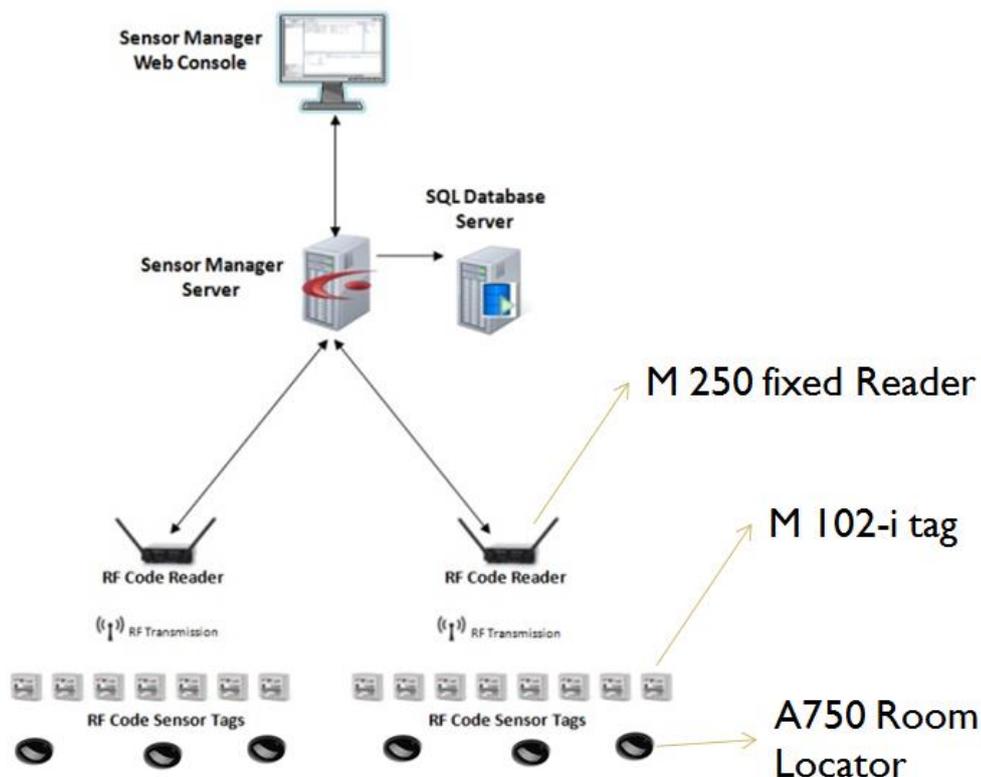
Le produit Sonitor développé par « Sonitor Technologies Inc. » [20] est quant à lui basé sur la technologie ultrason pour la localisation et le Wi-Fi pour la transmission des données à la station maître. Chaque personne porte un badge qui émet périodiquement un signal ultrason avec son identifiant unique. Ce signal est reçu par les balises fixes situées dans la même pièce. Les balises transmettent les informations à la station maître en utilisant le réseau filaire ou sans fil existant pour l'enregistrement et l'affichage de la localisation de chaque badge en temps réel. Les badges sont alimentés par batterie pour une durée de vie estimée à 5 ans. Leur taille est de 57.7 mm x 32.9 mm x 19.5 mm et leur poids de 28g. Les chercheurs de Sonitor ont développé un algorithme de traitement du signal pour protéger le signal ultrason contre les perturbations de l'environnement intérieur [21].

Plusieurs systèmes de localisation par proximité utilisent la technologie infrarouge. Active Badge est par exemple, un système développé par les chercheurs du laboratoire AT&T Cambridge [6, 22]. Un badge infrarouge est porté par chaque personne à localiser (figure 3.9). Le badge émet un signal infrarouge (son identifiant unique) périodiquement. Un ou plusieurs récepteurs infrarouges fixes sont déployés dans chaque pièce. Ils transmettent les messages qu'ils reçoivent des badges à une station maître pour visualiser et stocker les informations de localisation.



Figure 3.9 : Le badge du système Active Badge

Le produit RF Code est un autre système de localisation par proximité qui utilise la technologie infrarouge. Ce système est développé par RF Code Inc. [23]. A la différence d'Active Badge, les balises (les A750 room locators) sont ici les émetteurs infrarouges et les badges les récepteurs. Les badges transmettent les informations à la station maître par radio fréquence dans la bande des 433 MHz. Comme le protocole n'est pas le Wi-Fi, des passerelles (les M250 fixed readers) font l'interconnexion avec le réseau Ethernet ou Wi-Fi de bâtiment, comme représenté dans la figure 3.10. Les badges sont de petite taille (44.95x33.78x11.20 mm) et leur poids est de 14.7g. Ils sont alimentés par une pile avec une durée de vie estimée à 4 ans.



La Communication par lumière visible (VLC pour Visible light communication LiFi) est une technologie émergente qui permet de transmettre des données à partir d'une LED pour du haut débit par communication optique utilisant le spectre visible, fournissant de fait une double fonction : l'éclairage et la communication. Cette technologie peut donc être facilement utilisée pour faire de la localisation en milieu intérieur [24]. LucioM, une société française du Calvados, propose déjà des produits de géolocalisation par identifiant unique. L'émetteur (la balise) est muni d'une lampe à LEDs et le récepteur (le badge) d'une photodiode. Elle peut être intéressante pour les bâtiments de dernière génération où le réseau de LEDs est déjà en service. Cette technologie est bien adaptée à la localisation par proximité.

2.4 Localisation par analyse visuelle

Cette technique fait appel à un réseau de caméras pour localiser les personnes. Contrairement aux techniques présentées précédemment, elles ne nécessitent pas d'instrumenter les personnes pour pouvoir les localiser. Les images vidéo capturées par ces caméras sont transmises à une station maître qui les traite pour identifier et localiser des formes spécifiques en se basant sur des algorithmes de reconnaissance faciale. Les objets détectés peuvent être des marqueurs visuels ou des objets naturels.

Les systèmes de localisation par analyse visuelle posent toutefois le problème du respect de la vie privée des personnes. Ils sont aussi très coûteux en raison du nombre de caméras à déployer pour couvrir tout l'espace d'un bâtiment et de la puissance de calcul requise par la station qui assure le traitement des images vidéo. Enfin, ils peuvent présenter un taux d'échec important puisque les sujets doivent être vus de face et les scènes bien éclairées (pas d'effet de contre-jour par exemple) pour que les algorithmes de reconnaissance faciale aient une chance de succès.

Un groupe de recherche de Microsoft a développé un système de localisation multi-personnes par analyse visuelle dans le cadre d'un projet d'environnement intérieur intelligent nommé Easy Living [25]. Ce système utilise deux caméras stéréoscopiques (c'est-à-dire équipées de deux objectifs pour avoir un effet relief) pour pouvoir couvrir l'espace d'une pièce comme montré dans la figure 3.11. L'identification de la position des personnes se fait par combinaison de la couleur et de la profondeur des images capturées et d'algorithme de soustraction de fond et de segmentation des contours. Les expériences réalisées pour évaluer les performances du système ont montré que le système détecte correctement jusqu'à 3 personnes dans la pièce.

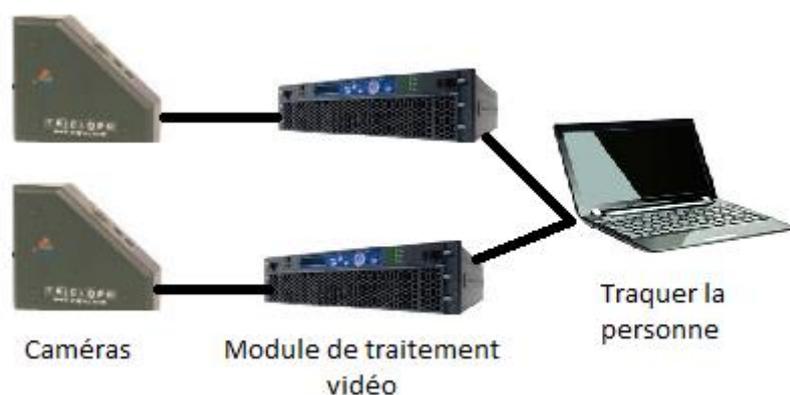


Figure 3.11 : Système de localisation en intérieur par vidéo Easy Living

3. Les critères d'évaluation d'un système de localisation intérieur

Les systèmes de localisation en milieu intérieur s'avèrent nombreux et répondent à des attentes très différentes. Une bonne connaissance des critères d'évaluation de ces systèmes est nécessaire pour choisir la meilleure solution et répondre aux besoins de l'application. Ces critères peuvent être classifiés en quatre grandes catégories : Performances, robustesse et tolérances aux pannes, coût et complexité et sécurité et respect de la vie privée.

3.1 Performances

L'exactitude et la précision sont deux des principaux critères de performances pour évaluer un système de localisation. L'exactitude est la distance maximale d'erreur entre la position estimée et la position réelle d'un objet ou une personne (appelée aussi mobile). La précision est définie comme la probabilité d'estimer avec succès la position de mobile tout en respectant l'exactitude prédéfinie. Les valeurs de l'exactitude et de la précision sont donc données ensemble. La périodicité de mise à jour de la position, la latence, la scalabilité et la couverture du système sont d'autres critères de performance. La périodicité de mise à jour de la position est la fréquence à laquelle les positions sont calculées (périodique, sur demande, suite à la réception d'un événement, ...). La latence du système représente le délai d'attente pour que la nouvelle position soit disponible. La latence dépend du temps de mesure, du temps de calcul de la position de mobile et du temps de transmission des informations au système de surveillance. La scalabilité est définie comme le nombre de mobiles qu'un système est capable de localiser dans un laps de temps donné. La couverture décrit l'espace où la performance du système de localisation doit être garantie (une chambre, un étage, quelque cm, etc...).

3.2 Robustesse et tolérance aux pannes

Un système robuste et tolérant aux pannes devrait être en mesure de continuer à fonctionner, éventuellement de manière réduite au lieu de tomber en panne, même dans certaines situations critiques tel que la défaillance d'un équipement dans le système de localisation où l'épuisement de la batterie d'un équipement portable. L'intégrité, la disponibilité et la continuité du service de localisation sont les principaux critères pour évaluer la robustesse et la tolérance aux pannes d'un système de localisation en milieu intérieur.

L'intégrité mesure la confiance qui peut être placée dans l'exactitude des données fournies par le système, c'est-à-dire garantir que les données sont bien celles que l'on croit être. Elle mesure la capacité du système à donner un avertissement en temps opportun lorsqu'une

défaillance d'une partie du système conduit à une position estimée qui diffère significativement de la position réelle.

La disponibilité d'un système est obtenue en divisant la durée durant laquelle le système est opérationnel par la durée totale durant laquelle on aurait souhaité qu'il le soit. La disponibilité d'un système de localisation est le pourcentage de temps pendant lequel le service de localisation est disponible avec la précision et l'intégrité requises.

La continuité est la capacité du système à fonctionner en continu sur une période de temps donné pour réaliser une fonction spécifique. Il peut s'agir par exemple de la durée d'une journée de travail pendant lequel nous aurons recours aux données de localisation fournies par le système.

3.3 Coût et complexité

Le coût total du système de localisation est un critère d'évaluation très important qui doit considérer les coûts sur tout son cycle de vie :

- Les coûts en temps, qui comprennent des facteurs tels que le temps requis pour l'installation, l'administration et la maintenance du système.
- Les coûts d'investissement et d'infrastructure, qui comprennent le prix des équipements et les salaires des techniciens qui en ont la charge.
- Les coûts d'entretien, qui comprennent les dépenses nécessaires pour maintenir le bon fonctionnement du système comme par exemple le prix et la durée de vie de la batterie.
- Les coûts en espace impliquent le nombre d'équipements et la taille de l'infrastructure à installer.

En général, il y a un compromis entre le coût et la performance d'un système de localisation en milieu intérieur. Un système qui offre une meilleure performance a bien souvent un coût plus élevé et une plus grande complexité.

L'intervention humaine et l'effort nécessaire pour le déploiement et la maintenance du système de localisation sont deux indices de complexité du système. Plus le système est complexe et plus sa mise en place risque d'être longue et coûteuse. Plus il sera aussi difficile à maintenir et à utiliser pour les personnels, ce qui engendre des coûts pour la formation. Un autre aspect de la complexité est le temps nécessaire pour calculer la position du mobile. En raison de la limitation des ressources (processeur, énergie, mémoire, etc...) dans les équipements

portables généralement intégré dans le système de localisation, un système avec une complexité de calcul faible est souhaité.

3.4 Sécurité et respect de la vie privée

Un système de localisation en milieu intérieur doit être sécurisé et respecter la vie privée des utilisateurs. La sécurité d'un système est la protection contre certaines actions indésirables ou malveillantes telles que le vol, la perte d'information et le piratage des données personnelles. La sécurité et le respect de la vie privée pourraient être réalisés au niveau logiciel (cryptage de données, utilisation de mot de passe, etc...) et au niveau de l'architecture du système (données non centralisées, traitement sur différents équipements, etc...).

4. Synthèse

Après avoir présenté les différentes solutions de systèmes de localisation intérieur basées sur la technique de triangulation, d'analyse de l'empreinte du signal, par proximité et d'analyse visuelle, nous allons comparer ces solutions en se basant d'une part sur les critères d'évaluation cités dans la section 3 et sur les exigences que nous avons définies dans le chapitre 2. En général, le milieu professionnel est un lieu décomposé en plusieurs salles, bureaux, espaces, etc... limités par des murs d'où la nécessité d'avoir un système de localisation qui permet d'identifier l'emplacement d'une personne à l'échelle d'une salle.

Le tableau 3.1 présente les caractéristiques de solutions de localisations intérieures basées sur la technique de triangulation. Toutes ces solutions (sauf Active Bat) ne permettent pas de localiser la personne à l'échelle d'une salle et par conséquent ces solutions ne sont pas adaptées à nos besoins. L'installation de la solution Active Bat est très complexe (plusieurs récepteurs à installer) ce qui engendre une augmentation du coût total du système. Ainsi, cette solution ne répond pas aux exigences du système de surveillance de l'exposition personnelle.

Tableau 3.1 : les solutions de localisation intérieure qui se basent sur la technique de triangulation

| Solution | Méthode | Performances | Complexité | Coût | Adapté? |
|----------|-------------|---|---------------------------|--------|---------|
| WhereNet | TDOA | Ne permet pas la localisation à l'échelle d'une salle | Installation complexe | Elevé | Non |
| Ubisense | TDOA et AOA | Ne permet pas la localisation à l'échelle d'une salle | Installation non complexe | Elevé | Non |
| Beep | TOA | Ne permet pas la localisation à l'échelle d'une salle | Installation non complexe | Faible | Non |

| | | | | | |
|------------|-----|---|---------------------------|--------|-----|
| Active Bat | TOA | Possibilité de localisation à l'échelle d'une salle | Installation complexe | Elevé | Non |
| Cricket | TOA | Ne permet pas la localisation à l'échelle d'une salle | Installation non complexe | Faible | Non |
| Essensium | RSS | Ne permet pas la localisation à l'échelle d'une salle | Installation non complexe | Faible | Non |

Le deuxième tableau (tableau 3.2) présente les caractéristiques de solutions de localisation en intérieur basées sur la localisation par vidéo, par analyse d'empreinte et par proximité. Toutes les solutions de localisation par proximité permettent d'identifier la localisation d'une personne à l'échelle d'une salle. Ce sont des solutions faciles à installer et leur coût est moyennement faible par rapport aux autres solutions. Ces solutions sont bien adaptées à nos besoins et aux exigences définies dans le chapitre 2.

Tableau 3.2 : les solutions de localisation intérieur qui se basent sur la localisation par vidéo, fingerprinting et par proximité

| Solution | Méthode | Performances | Complexité | Coût | Adapté? |
|--------------|---------------------|---|---------------------------|--------|---------|
| Easy Living | Vidéo | Localisation à l'échelle d'une salle | Installation complexe | Elevé | Non |
| Ekahau | Analyse d'empreinte | Ne permet pas la localisation à l'échelle d'une salle | Recalibrage complexe | Faible | Non |
| ZONITH | Proximité et RSS | Localisation à l'échelle d'une salle | Installation complexe | Faible | Non |
| Active Badge | Proximité | Localisation à l'échelle d'une salle | Installation non complexe | Faible | Oui |
| Sonitor | Proximité | Localisation à l'échelle d'une salle | Installation non complexe | Faible | Oui |
| AeroScout | Proximité | Localisation à l'échelle d'une salle | Installation non complexe | Faible | Oui |
| RF Code | Proximité | Localisation à l'échelle d'une salle | Installation non complexe | Faible | Oui |

5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes solutions de systèmes de localisation en intérieur basées sur des techniques et technologies différentes et qui permettent de suivre les mouvements d'une personne dans un environnement intérieur. Les solutions basées sur les techniques de triangulation tels que WhereNet, ZONITH, Ubisense, Beep, Active Bat et Cricket ne sont pas adaptées à nos besoins et aux exigences du système de surveillance de l'exposition personnelle à cause de leurs limites de détecter avec précision l'emplacement d'une personne au niveau d'une salle ou leurs complexités à les mettre en place. D'autre part, les solutions basées sur la localisation par proximité tels qu'Active Badge, Sonitor, AeroScout et RF Code répondent bien à nos besoins et aux exigences du système. Finalement, nous avons choisi d'utiliser une solution de localisation basée sur la technologie infrarouge parce qu'elle est plus robuste et moins chère que l'ultrason (problème de trajet multiple). Nous avons donc sélectionné la solution de système de localisation en intérieur RF Code pour des raisons de disponibilité du produit chez les fournisseurs. Nous intégrons ce système dans la première solution technique que nous présentons dans le prochain chapitre.

Bibliographie

- [1] INVS Description du budget espace-temps et estimation de l'exposition de la population française dans son logement. Saint-Maurice. Institut de veille sanitaire 2010, 37 p.
- [2] Elgethun K, Yost MG, Fitzpatrick CTE, Nyerges TL, Fenske RA. Comparison of global positioning system (GPS) tracking and parent-report diaries to characterize children's time-location patterns. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology* 2007; 17:196–206.
- [3] Liu H., Darabi H., P. Banerjee and Liu J. Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems, in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 2007; vol. 37, no. 6, pp. 1067-1080.
- [4] Mandal A., Lopes C. V., T. Givargis, A. Haghghat, R. Jurdak, and Baldi P. Beep: 3D Intérieur Positioning Using Audible Sound, *IEEE Consumer Communications and Networking Conference, 2005*; Las Vegas
- [5] Active Bat 2015 <http://www.cl.cam.ac.uk/research/dtg/attarchive/bat/> [En ligne Août 2015]
- [6] Harter A., Hopper A., Steggles P., Ward A. and Webster P. The Anatomy of a Context-Aware Application. *5th Ann. Intl Conf. Mobile Computing and Networking (Mobicom 99)*, 1999; New York, pp.59-68.
- [7] Priyantha N., Chakraborty A., and Balakrishnan H. The cricket location- support system *Proc. ACM Conference on Mobile Computing and Networking, 2000*
- [8] Priyantha N. B., “The Cricket Intérieur Location System”, *PhD thesis, MIT, 2005*
- [9] Zebra technologies
<https://www.zebra.com/gb/en/products/location-solutions/wherenet.html> [En ligne Août 2015]
- [10] Ubisense <http://ubisense.net/en/blog/manufacturing/everything-you-need-know-about-real-time-location-system-rtls> [En ligne Août 2015]
- [11] Essensium <http://www.essensium.com/products.html> [En ligne Août 2015]
- [12] Wang Y., Jia X., and Lee H. K. An Intérieur wireless positioning system based on wireless local area network infrastructure. *6th International Symposium on Satellite Navigation Technology Including Mobile Positioning and Location Services, 2003*.
- [13] King T., Kopf S., Haenselmann T., C. Lubberger and Effelsberg W. COMPASS: A Probabilistic Intérieur Positioning System Based on 802.11 and Digital Compasses. *First ACM Intl Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental evaluation and CHaracterization (WiNTECH)*, 2006 ; Los Angeles, CA, USA
- [14] Pan J.J., Pan S.J., V.W. Zheng, and Q. Yang, Digital wall : A power-efficient solution for location-based data sharing. *Sixth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, 2008*; pages 645–650
- [15] Lei Yu, Mohamed Laaraiedh, Stephane Avrillon, Bernard Uguen. Fingerprinting localization based on neural networks and ultra-wideband signals. *IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT)*, 2011; Bilbao, Spain. pp.184 -189
- [16] Brunato M. and Csaba K. Transparent location fingerprinting for wireless services. *Proc. Med-Hoc-Net* , 2002.
- [17] Ekahau <http://www.ekahau.com/real-time-location-system> [En ligne Août 2015]
- [18] Ekahau
http://www.ekahau.com/userData/ekahau/documents/datasheets/Ekahau_RTLS_A4_DS.pdf [En ligne août 2015]
- [19] Aer Scout www.aer Scout.com/ [En ligne Août 2015]
- [20] Sonitor <http://www.sonitor.com/products-rtls-engine.html> [En ligne Août 2015]

- [21] Holm, S., Ultrasound positioning based on time-of-flight and signal strength *International Conference on in Intérieur Positioning and Intérieur Navigation (IPIN), 2012*; pp.1-6, 13-15
- [22] Want R., Hopper A., Falcao V., Gibbons J. The Active Badge LocationSystem. *ACM Trans. Information Systems, 1992*; vol. 10, no. 1, pp. 91-102.
- [23] RF Code <http://www.rfcode.com/rf-code-real-time-operational-intelligence-for-enterprise-data-centers-and-it> [En ligne Août 2015]
- [24] Daniel Iturralde, Cesar Azurdia-Meza, Nicolas Krommenacker, Ismael Soto, Zabih Ghassemlooy, et al. A new location system for an underground mining environment using visible light communications. *9th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing, CSNDSP'2014, Jul 2014*, Manchester, United Kingdom
- [25] Krumm J., Harris S., Meyers B., Brumitt B., M. Hale, and Shafer S. Multi-Camera Multi-Person Tracking for Easy Living. *3rd IEEEInt'l Workshop Visual Surveillance, IEEE Press, Piscataway, 2000*.

Chapitre 4 : Conception d'un système de surveillance en temps réel de l'exposition personnelle

| | |
|---|-----|
| 1. Introduction | 79 |
| 2. Architecture et scénario retenus | 79 |
| 2.1 Modèle d'architecture de l'Internet des objets | 79 |
| 2.2 Scénario retenu | 81 |
| 2.3 Proposition d'un modèle de suivi de l'exposition personnelle basé sur l'IoT | 82 |
| 2.3.1 Description du modèle | 82 |
| 2.3.2 Architecture matérielle..... | 83 |
| 2.3.3 Architecture logicielle..... | 86 |
| 3. Implémentation de la plateforme proposée | 87 |
| 3.1 Implémentation de service de mesure..... | 87 |
| 3.2 Implémentation du service de localisation..... | 88 |
| 3.3 Implémentation du service d'estimation de l'exposition personnelle moyenne | 90 |
| 3.4 Implémentation de service d'alerte..... | 92 |
| 3.5 Implémentation du service de stockage | 94 |
| 3.6 Implémentation de service de configuration..... | 96 |
| 4. Analyse et validation des données de la plateforme | 96 |
| 5. Conclusion..... | 103 |

1. Introduction

Après avoir étudié les différentes solutions pour localiser les personnes à l'intérieur d'un bâtiment, nous allons présenter dans ce chapitre la méthodologie de conception de la solution technique que nous proposons pour estimer en temps réel l'exposition des employés à la pollution de l'air intérieur. Cette solution technique repose sur les modèles logiques développés dans le chapitre 2.

Le calcul des taux d'exposition doit reposer sur une architecture de communication efficace et adaptée. Cette architecture doit être capable de remonter des informations sur la pollution de l'air et sur la localisation des personnes et de calculer à travers ces informations des taux d'exposition. Dans une première approche, nous avons choisi de sélectionner des produits sur étagère pour éviter de réinventer des solutions existantes et pour nous concentrer uniquement sur la conception de nouveaux services. De façon globale, nous allons reprendre des produits de localisation des personnes déjà commercialisés, et les capteurs de pollution développés par les partenaires du projet CAPFEIN. Notre contribution sera d'une part de rendre communicant le capteur de formaldéhyde, et d'autre part de concevoir une architecture centralisée de calcul de taux d'exposition en se basant sur les concepts de l'Internet des objets et sur les approches de calcul de taux d'exposition par microenvironnement.

Ce chapitre est structuré en trois parties. Nous définissons dans un premier temps l'architecture du système et le scénario retenu dans la section 2, puis nous présentons la méthodologie d'implémentation des différents services dans la section 3. L'évaluation et l'analyse des performances par expérimentation présentées à la fin de l'étude valident les exigences initialement définies.

2. Architecture et scénario retenus

2.1 Modèle d'architecture de l'Internet des objets

L'explosion du nombre de composants intelligents connectés a été l'origine de la création de nouvelles architectures basées sur l'internet des objets. La seule définition officielle internationale de l'internet des objets a été fournie par l'Union Internationale des Télécommunication ITU-T Y.2060 [1]. L'internet des objets est une « infrastructure mondiale pour la société de l'information, qui permet de disposer de services évolués en interconnectant des objets physiques ou virtuels grâce aux technologies de l'information et de la communication interopérables existantes ou en évolution ». Une définition plus synthétique est la suivante : «

l'Internet des objets comme un réseau de réseaux qui permet, via des systèmes d'identification électronique normalisés et unifiés, et des dispositifs mobiles sans fil, d'identifier directement et sans ambiguïté des entités numériques et des objets physiques et ainsi de pouvoir récupérer, stocker, transférer et traiter, sans discontinuité entre les mondes physiques et virtuels, les données s'y rattachant » donnée par Pierre-Jean Benghozi [2]. L'Internet des objets repose donc sur l'idée que tous les objets sont connectés à internet d'une manière ou d'une autre, qu'ils sont donc capables d'émettre de l'information et éventuellement de recevoir des commandes. Une architecture basée sur l'IoT doit inclure des dispositifs permettant de collecter, stocker, transmettre et traiter des données issues du monde physique.

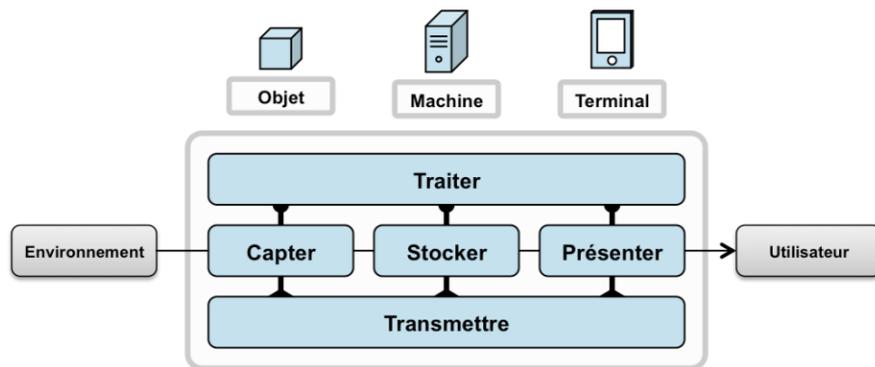


Figure 4.1 : Concept de l'internet des objets

Les objets sont donc des sources de données identifiables de façon unique et ayant un lien direct ou indirect avec Internet. Il existe deux types d'objets : les objets passifs qui nécessitent le recours à un système de lecture par exemple les étiquettes RFID, et les objets actifs qui peuvent intégrer plusieurs capteurs et des actionneurs et avoir une capacité de communication pour transmettre leurs données directement vers Internet ou indirectement via un autre équipement réseau.

Le modèle type d'architecture de l'Internet des objets est présenté dans la figure 4.2. Chaque processus à un rôle bien défini. Capter désigne l'action de transformer une grandeur physique en une donnée numérique. Concentrer permet d'interfacer un réseau spécifique d'objets à un réseau IP standard. Stocker permet de sauvegarder des données brutes, et enfin présenter indique le processus de reconstituer les données sous une forme compréhensible par l'homme en lui offrant la possibilité d'interagir. Deux processus ne sont pas apparents sur la figure 4.2, car ils sont transverses et omniprésents, à savoir le traitement des données et la transmission des données qui peuvent intervenir à tous les niveaux depuis la capture de l'information jusqu'à sa reconstitution.

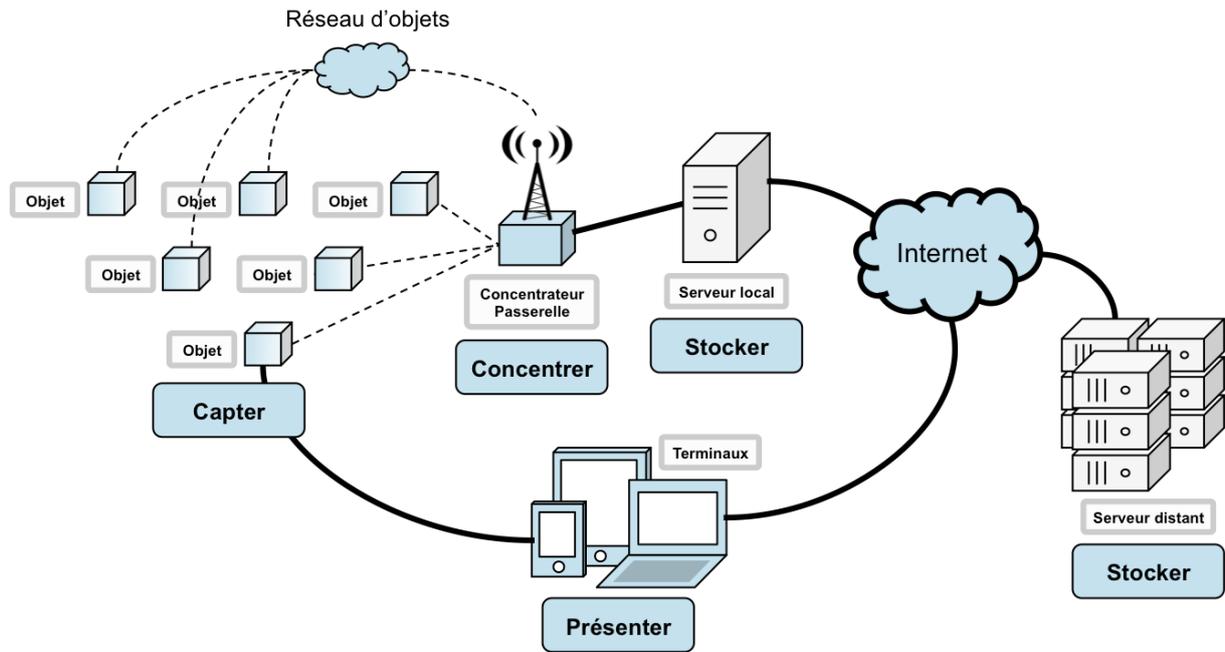


Figure 4.2 : Modèle d'architecture de l'internet des objets

2.2 Scénario retenu

Le scénario retenu dans notre solution de surveillance en temps réel de l'exposition personnelle aux polluants atmosphériques dans le milieu professionnel est illustré sur la figure 4.3.

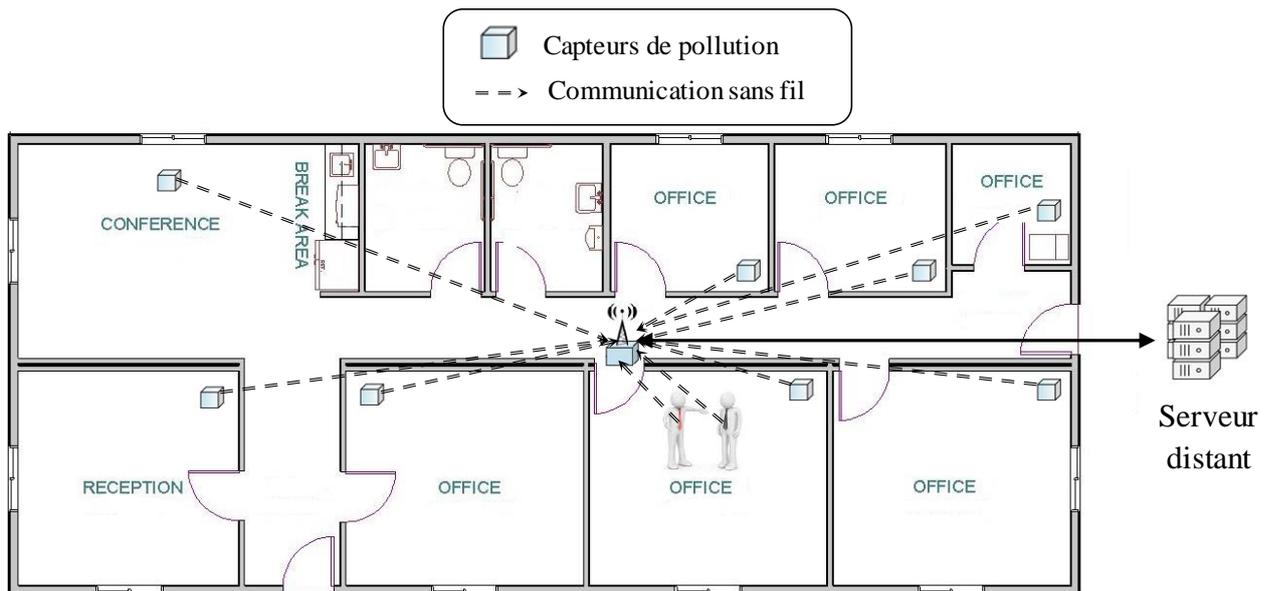


Figure 4.3 : Scénario retenu

Un employé est surveillé dans un milieu professionnel clos (administration, hôpital, intérieur d'une usine, etc...). Cette personne est mobile et pratique ses activités professionnelles habituelles. Le système doit être capable de s'adapter continuellement aux mouvements de cette

personne. Un système de localisation mobile doit être embarqué sur la personne et doit pouvoir communiquer ses informations via le réseau en se basant sur un standard de communication sans fil. Des capteurs de pollution de l'air intérieur mesurent le niveau de polluants atmosphériques dans les différentes zones d'une manière périodique et en temps réel et ils doivent être capables de transmettre leurs données. Dans ce cas, nous proposons une solution technique centralisée avec un serveur distant. En effet, le système central (le serveur) reçoit et traite toutes les données afin que le superviseur surveille l'exposition personnelle (niveau d'exposition personnelle en temps réel, alertes, historiques, analyses, etc...).

2.3 Proposition d'un modèle de suivi de l'exposition personnelle basé sur l'IoT

2.3.1 Description du modèle

Le modèle proposé pour le suivi en temps réel de l'exposition personnelle aux polluants de l'air en milieu professionnel est basé sur le concept de l'internet des objets comme illustré par la figure 4.4.

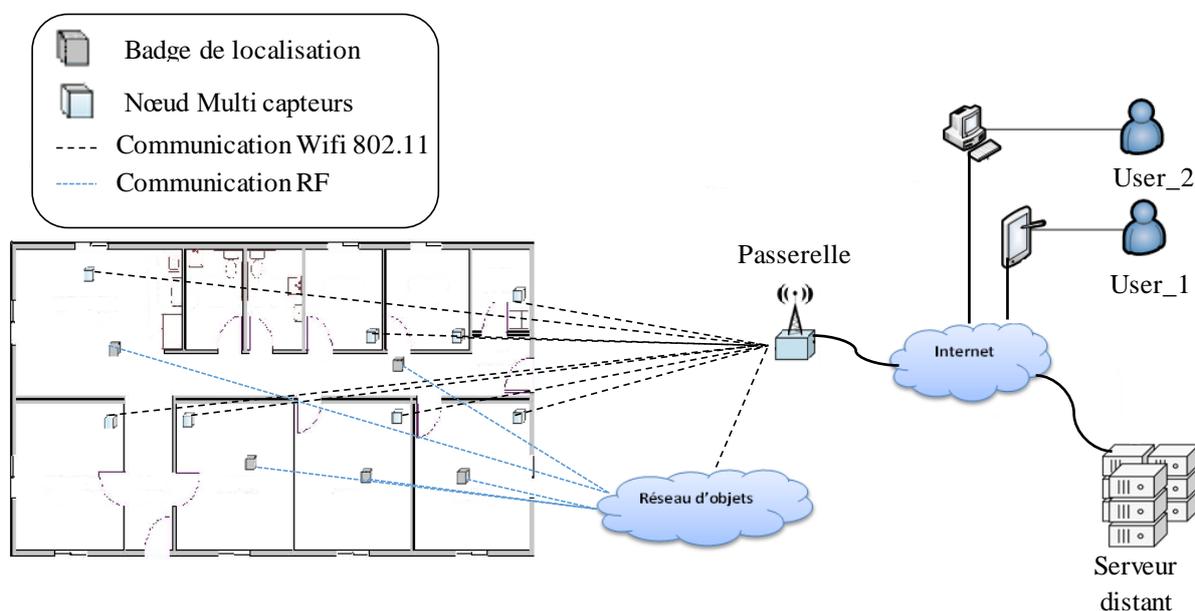


Figure 4.4 : Modèle proposé pour le suivi de l'exposition personnelle basé sur le concept de l'internet des objets

On distingue deux types d'objets qui permettent de mesurer les données environnementales. Le premier type d'objets est le nœud multi-capteurs, qui regroupe les capteurs de polluants de l'air. Ils sont placés dans chaque microenvironnement et permettent de mesurer périodiquement les niveaux de polluants dans l'air. Chaque nœud multi capteurs possède un identifiant unique et est capable de communiquer avec les autres éléments via le réseau Wi-Fi. Le deuxième type d'objet est le badge de localisation porté par chaque employé qui permet de suivre leurs

mouvements dans le milieu clos. Chaque badge a un identifiant unique et communique ses données indirectement vers Internet via un réseau d'objets relié à un concentrateur « passerelle ». Un réseau d'objet, regroupe les éléments spécifiques nécessaires pour relier des objets à Internet (dans ce cas les objets n'ont pas d'adresse IP pour communiquer directement via internet). Chacun de ces objets a des capacités de traitement de données en local plus ou moins importantes. Les données captées par ces objets sont envoyées en temps réel vers un serveur distant via Internet (serveur Cloud). Ces données sont collectées, combinées, traitées, stockées et présentées aux utilisateurs par un ensemble de services regroupés dans une application implantée dans le serveur.

2.3.2 Architecture matérielle

Notre système de surveillance de l'exposition personnelle aux polluants de l'air intérieur consiste en un ensemble comportant des capteurs de polluants de l'air, des capteurs environnementaux (température, humidité), un sous-système de localisation des personnes et un serveur distant (serveur Cloud). L'architecture globale du système est présentée sur la figure 4.5. Le capteur de formaldéhyde développé par notre partenaire ICPEES dans le cadre de projet CAPFEIN décrit dans la section 2 du chapitre 2 permet de mesurer la concentration de formaldéhyde dans l'air mais il n'est pas communicant. Un sous-système de mise en réseau de ces capteurs (nœud multi-capteurs) est alors nécessaire pour intégrer ces capteurs dans le système de surveillance.

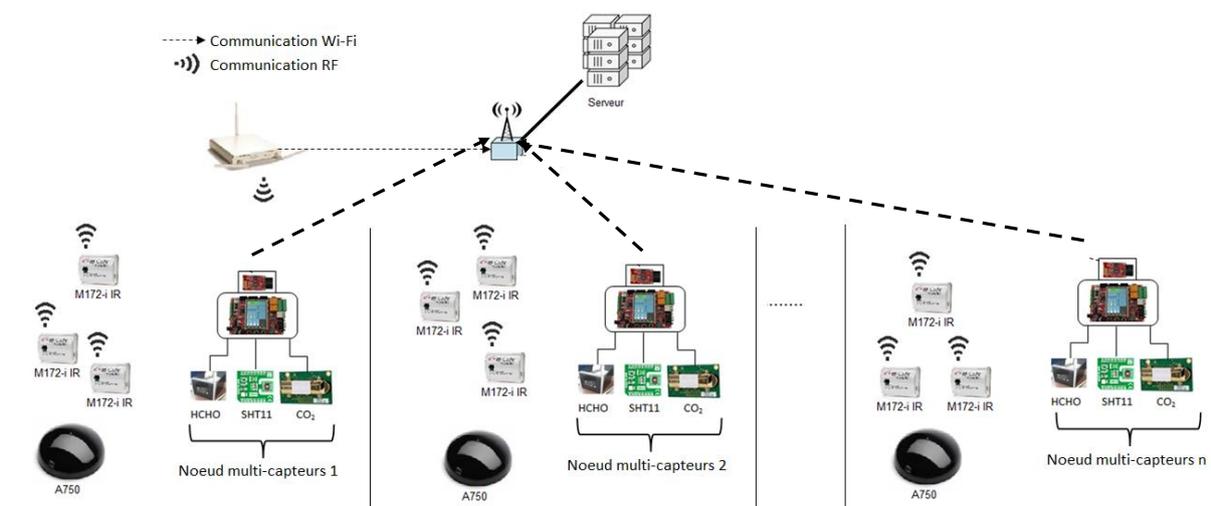


Figure 4.5 : Architecture matérielle du système de suivi de l'exposition personnelle

La figure 4.6 présente l'architecture matérielle d'un nœud multi-capteurs. Il est composé d'un capteur de formaldéhyde (HCHO), d'un capteur de CO2 *Telair 6613C* [3], d'un capteur de température et d'humidité relative *SHT11* [4] et d'un module Wi-Fi IEEE 802.11 b/g

MRF24WG0MA [5] branché directement sur une carte de traitement de données *Olimex PIC32-Maxi-Web* basée sur un microcontrôleur 32 bit *PIC32MX795F512L* [6]. Le choix de la carte de développement *Olimex PIC32-Maxi-Web* est lié d'une part aux interfaces disponibles pour connecter les différents capteurs (I2C, SPI, UART, etc...) et à sa capacité à traiter les données et à communiquer via l'Internet en utilisant le module Wi-Fi. Nous avons choisi le standard Wi-Fi pour la communication entre le nœud multi capteurs et les différents éléments dans le réseau. L'intérêt est que la plupart des entreprises ont déjà déployé des infrastructures de communication Wi-Fi et que notre système pourra donc s'intégrer sur cette infrastructure existante limitant ainsi des coûts additionnels d'installation de bornes d'accès sans-fil dédiées à la surveillance de la pollution de l'air.

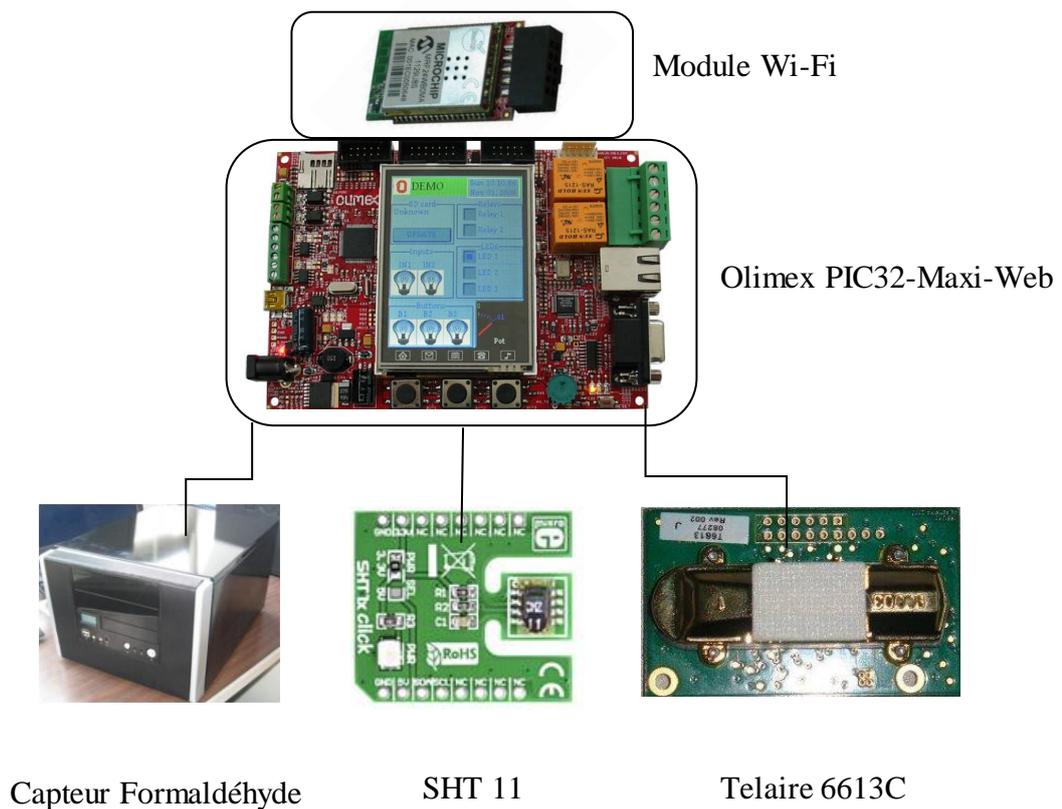


Figure 4.6 : Architecture matérielle d'un nœud multi-capteurs

La figure 4.7 présente le badge M172-i IR (Infra Rouge) et la balise A750. Chaque badge est équipé d'un lecteur IR, d'un module RF 433 Mhz et d'un capteur de mouvement. Cette famille de badge est conçue pour être déployée avec la balise A750. Le badge intègre deux modes de fonctionnements : le mode ralenti lorsque le capteur ne bouge pas « mode low power » et le mode rapide lorsque le capteur de mouvement est activé « mode full power ». Ceci permet d'augmenter l'autonomie de la batterie qui peut aller jusqu'à 4 ans. Le tableau 4.1

illustre les spécifications du badge M172-i IR. La balise A750 est l'émetteur IR qui permet aux badges M172-i IR de se repérer dans un environnement intérieur.

Chaque balise transmet en continu un motif d'impulsion infrarouge contenant un code d'emplacement unique à 3 chiffres. La puissance d'émission des impulsions est réglable manuellement avec une couverture maximale de 10 mètres. La couverture est limitée aussi par les murs. Ceci permet de localiser un employé à l'échelle d'une salle (notion de microenvironnement). Le tableau 4.2 donne les spécifications d'une balise RF Code A750.



Figure 4.7 : Le badge M172-i IR et la balise A750

Tableau 4.1: Spécification de la balise M172-i IR

| Paramètre | Spécification |
|--------------------------|---|
| Fréquence | 433.92 MHz |
| Identifiant | Plus de 540 000 identifiants uniques |
| Distance de transmission | Supérieure à 91 mètres |
| Taille et poids | 44.95x33.78x11.20 mm pour 14.7g |
| Type de batterie | Lithium CR2032 |
| Durée de vie | Plus de 4 ans en fonctionnement nominal |

Tableau 4.2 : Spécification du détecteur de zones A750

| Paramètre | Spécification |
|--------------------------|-------------------------------|
| Modulation Infrarouge | 36 kHz |
| Puissance | Ajustable de 10% jusqu'à 100% |
| Distance de transmission | 10 mètres |
| Taille et poids | 11.3x11.3x3.5 cm pour 186g |
| Type d'alimentation | 24V AC- 12W |

Périodiquement, chaque badge envoie ses informations de localisation vers un lecteur central M250. La figure 4.8 présente le sous-système de localisation développé autour du lecteur central M250 qui permet d'interfacer l'ensemble des badges à Internet en passant par une passerelle (réseau d'objets : badges). Le sous-système de localisation des personnes inclut les trois éléments de la solution de localisation RF Code à savoir le badge M127-i IR, la balise A750 et le lecteur central M250. La topologie en étoile est utilisée comme modèle de communication dans ce sous-système comme décrit dans la figure 8. Cette topologie est caractérisée par des nœuds qui communiquent leurs données dans ce cas les badges, directement vers un nœud central (le lecteur central M250). Son avantage est qu'elle est très économe en énergie.

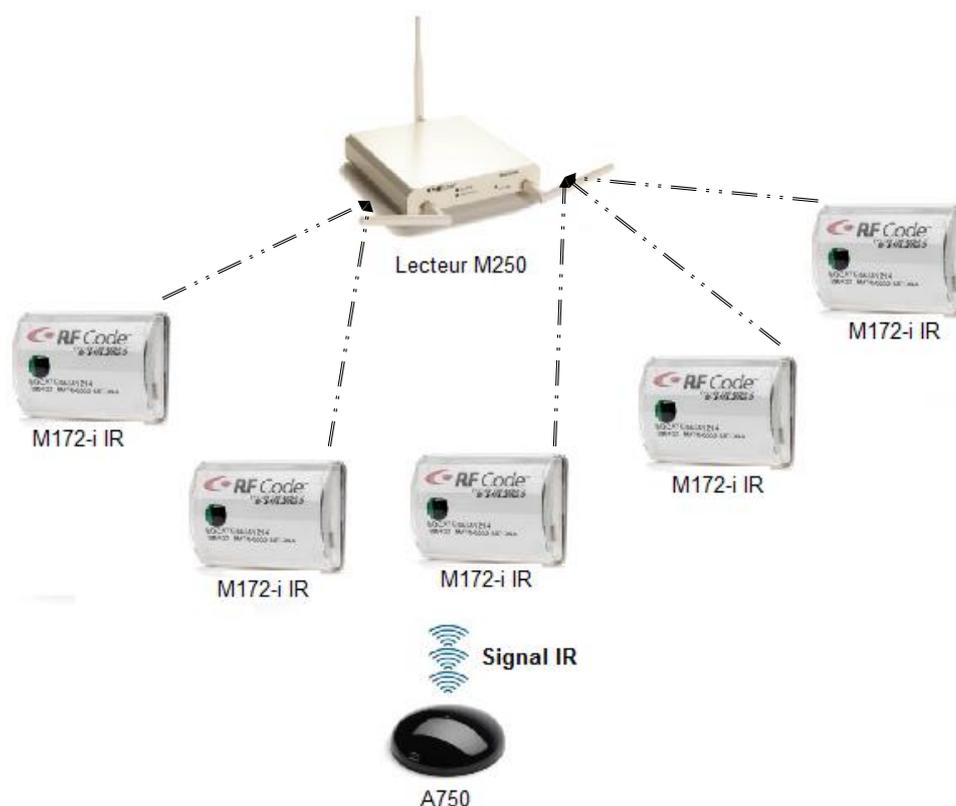


Figure 4.8 : Architecture du sous-système de localisation

2.3.3 Architecture logicielle

Notre système de suivi de l'exposition personnelle aux polluants dans l'air en milieu professionnel se base sur une approche centralisée. Toutes les informations sont envoyées vers un serveur. Une application a été développée dans le serveur qui permet de fournir l'ensemble des services nécessaires pour répondre aux besoins de notre système de suivi. L'application se divise en trois grandes parties : le collecte de données, le traitement de ces données (combiner, calculer, analyser, stocker, etc...) et la présentation des données et des analyses sous une forme

compréhensible par le superviseur en lui offrant la possibilité d'interagir. La figure 4.9 montre l'interface d'accueil de l'application de surveillance que nous avons développée et implantée dans le serveur. Cette application intègre les principaux services de suivi de l'exposition personnelle à savoir le service de mesure de niveau de pollution dans l'air intérieur, le service de localisation des personnes, le service d'estimation de l'exposition personnelle, le service de stockage, le service d'alerte et le service de configuration.

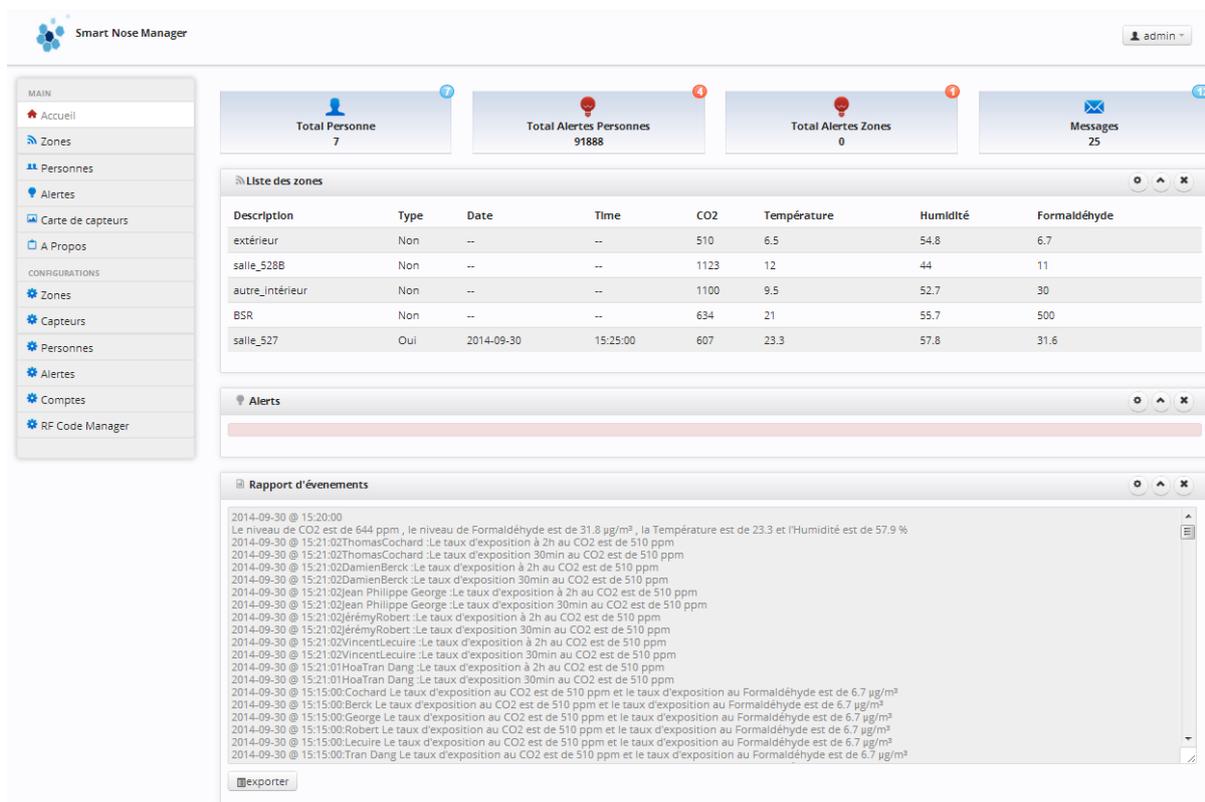


Figure 4.9 : Interface d'accueil de l'application de surveillance

3. Implémentation de la plateforme proposée

3.1 Implémentation de service de mesure

Le suivi en temps réel du niveau de concentration de substances polluantes dans le milieu professionnel et particulièrement le niveau de formaldéhyde dans les différents microenvironnements est la fonction principale dans notre système de surveillance.

La figure 4.10 illustre le service de mesure. Son but est de collecter les mesures envoyées par les nœuds multi capteurs. Nous avons utilisé le protocole SNMP (Simple Network Management Protocol) pour envoyer périodiquement (période d'estimation β) les valeurs mesurées par les nœuds multi-capteurs placés dans les différents microenvironnements selon l'approche que nous avons proposée dans le chapitre 2.

Un service de gestion SNMP est exécuté par notre application de surveillance implanté dans le serveur qui a le rôle de la station de management de réseau NMS. Ces données sont utilisées par d'autres services avant d'être sauvegardées dans la base de données (SGBD : Système de Gestion de la Base de données).

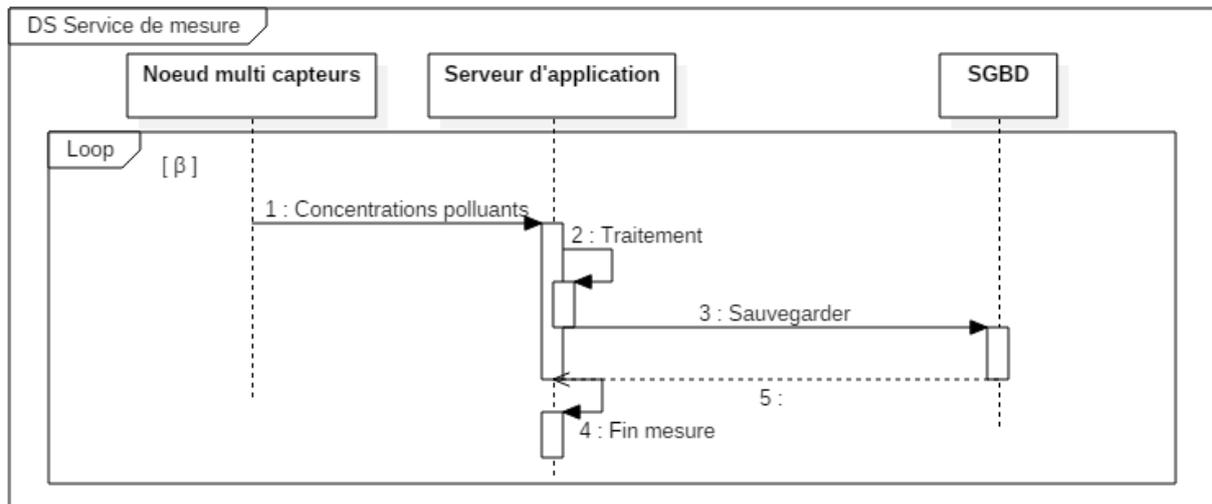


Figure 4.10 : Diagramme de séquence du service de mesure

3.2 Implémentation du service de localisation

Connaître l'emplacement de chaque employé est un élément nécessaire dans notre approche. Le milieu professionnel est connu pour sa complexité (endroit clos, des salles juxtaposées, plusieurs étages, etc...) ce qui rend difficile le suivi des employés. Après une étude de solutions de systèmes de localisation en intérieur dans le chapitre 3, nous avons choisi la solution RF Code basée sur les technologies combinées RF et IR.

Des badges de type M172-i IR et des balises « A750 Room Locator » sont utilisés pour traquer les employés en temps réel avec une précision à l'échelle d'une salle. L'architecture du système de localisation intérieure RF Code a été décrite dans la section précédente. Les signaux infrarouges utilisés pour localiser les employés sont combinés avec des signaux RF comme décrit dans la figure 4.11. Les signaux RF effectuent la synchronisation et la coordination de système de positionnement (badge, lecteur M250) et permet d'augmenter la zone de couverture de sous-système de localisation.

Ce sous-système fonctionne de la manière suivante : Une ou plusieurs balises A750 sont fixées dans chaque microenvironnement et transmettent en permanence un message d'identification unique « *Location_id* ». Chaque employé porte un badge M172-i IR qui reçoit le signal IR envoyé par la balise placée dans ce microenvironnement. Ce badge envoie périodiquement (β) un message de localisation sous la forme « *Tag_id, Location_id* », avec

Tag_id est l'identifiant unique du badge, vers une passerelle spécifique « RF Code M250 fixed reader » via le signal RF. Ensuite, les données de suivi et de localisation des employés sont transmises en temps réel au système central via le réseau Internet. En estimant l'emplacement du badge porté par l'employé, le système de localisation intérieure RF Code est capable de localiser des employés dans sa zone de couverture avec une précision à l'échelle d'un microenvironnement.



Figure 4.11 : Interaction entre le badge et les éléments du sous-système de localisation

Le service de localisation des employés est exécuté dans le serveur. La figure 4.12 modélise le service de localisation des employés. Son but est de collecter les données envoyées par les badges portés par les personnes. Le système de surveillance active le service de localisation périodiquement suite à deux événements : (i) la fin du temps d'attente pour l'estimation de l'exposition personnelle, c'est-à-dire la période β (ii) la fin du temps d'attente de détection de changement d'emplacement, c'est-à-dire la période γ . (voir section 3 chapitre 2). Dans le premier cas, le badge envoie un message de localisation. Ces données sont utilisées par d'autres services implantés dans le serveur d'application et sont sauvegardées dans la base de données (BDD). Dans le deuxième cas, le badge envoie un message de localisation. Le service de localisation compare l'emplacement actuel de la personne avec le dernier emplacement connu. S'il détecte un changement d'emplacement, le service met à jour les niveaux de polluants de l'air C_i liés au microenvironnement j . C_j correspond à l'ancien emplacement. Un autre processus estime le temps passé par la personne dans le microenvironnement j . A la fin, le service sauvegarde les données (historique de données) dans la BDD.

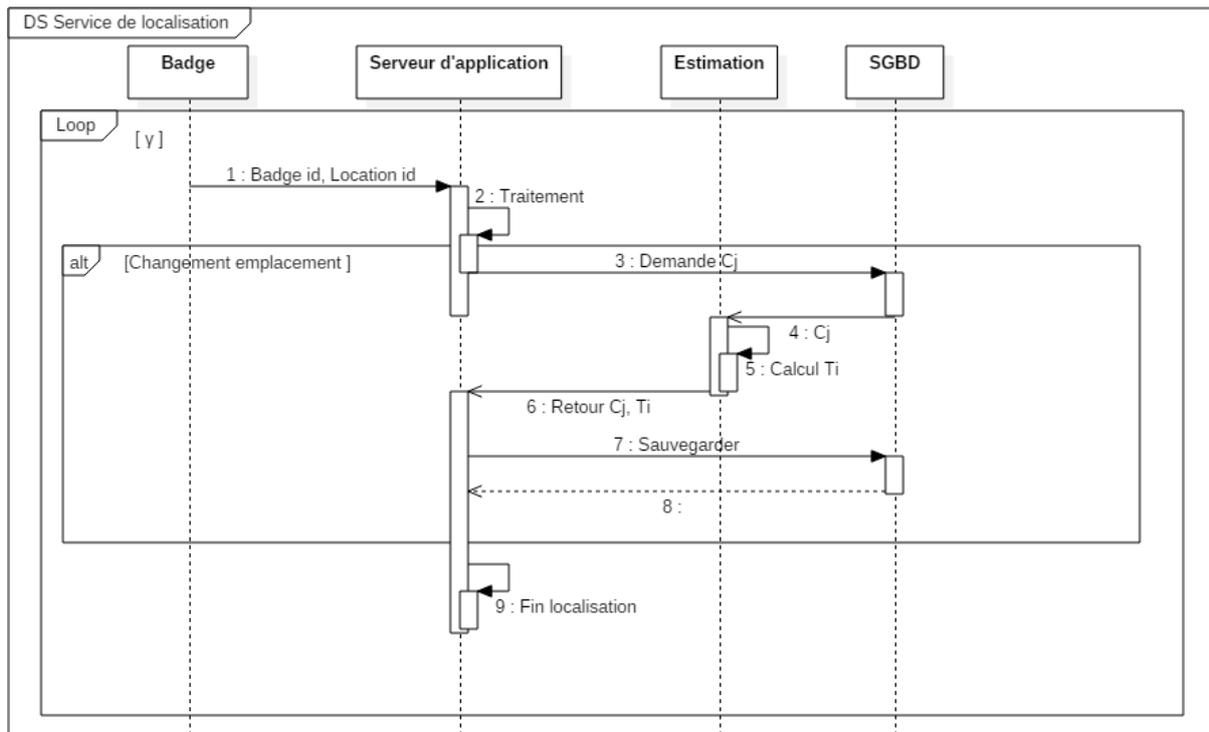


Figure 4.12 : Diagramme de séquence du service de localisation

3.3 Implémentation du service d'estimation de l'exposition personnelle moyenne

Après avoir collecté les informations sur le niveau de pollution atmosphérique dans les différents microenvironnements et les données de localisation, notre système de surveillance d'exposition personnelle aux polluants atmosphériques doit être capable de combiner ces deux informations pour estimer l'exposition personnelle moyenne pondérée dans le temps E_{TWAI} . Cette partie présente l'algorithme du service d'estimation de l'exposition personnelle moyenne implanté sur le serveur. La figure 4.13 donne l'algorithme. Le service d'estimation peut être déclenché par l'un de ces deux événements :

- Suite à la réception d'une nouvelle mesure de niveau de pollution atmosphérique (période β).
- Suite à la détection d'un événement de changement d'emplacement d'un ou plusieurs employés.

Dans le premier cas, après la réception des nouvelles valeurs de concentration de polluants $C_j(t_n)$ dans les différents microenvironnements j , le processus collecte les données sur l'emplacement de chaque employé « *Tag_id, Location_id* » déjà sauvegardé dans une base de données. Chaque *Location_id* correspond à un microenvironnement prédéfini par le superviseur dans l'application. En se basant sur ces informations, le processus met à jour la concentration individuelle $C_i(t_n)$ avec la nouvelle valeur $C_j(t_n)$ où le microenvironnement j représente l'emplacement de l'individu à l'instant t_n . Dans ce cas, le temps passé par l'individu dans le

microenvironnement j est $T_i = t_n - t_{last}$ où t_n est l'instant de réception de la nouvelle mesure et t_{last} est l'instant de déclenchement du dernier évènement. Les deux dernières étapes sont la mise à jour de t_{last} ($t_{last} = t_n$) et le calcul de E_{TWAi} de chaque employé en temps réel en se basant sur la formule (1) pour faire le lien entre le niveau de pollution individuelle C_i et la durée d'exposition T_i . Cette moyenne est recalculée à chaque période d'estimation β et pour chaque période d'exposition λ (Moyenne glissante dans le temps pour chaque λ).

$$E_{TWAi,\lambda} = \frac{\sum_{n=1}^k C_i(t_n) * T_i}{\lambda} \quad (1)$$

Où k est le nombre d'évènements déclenchés durant la période d'exposition λ et $k_{init} = \frac{\lambda}{\beta}$

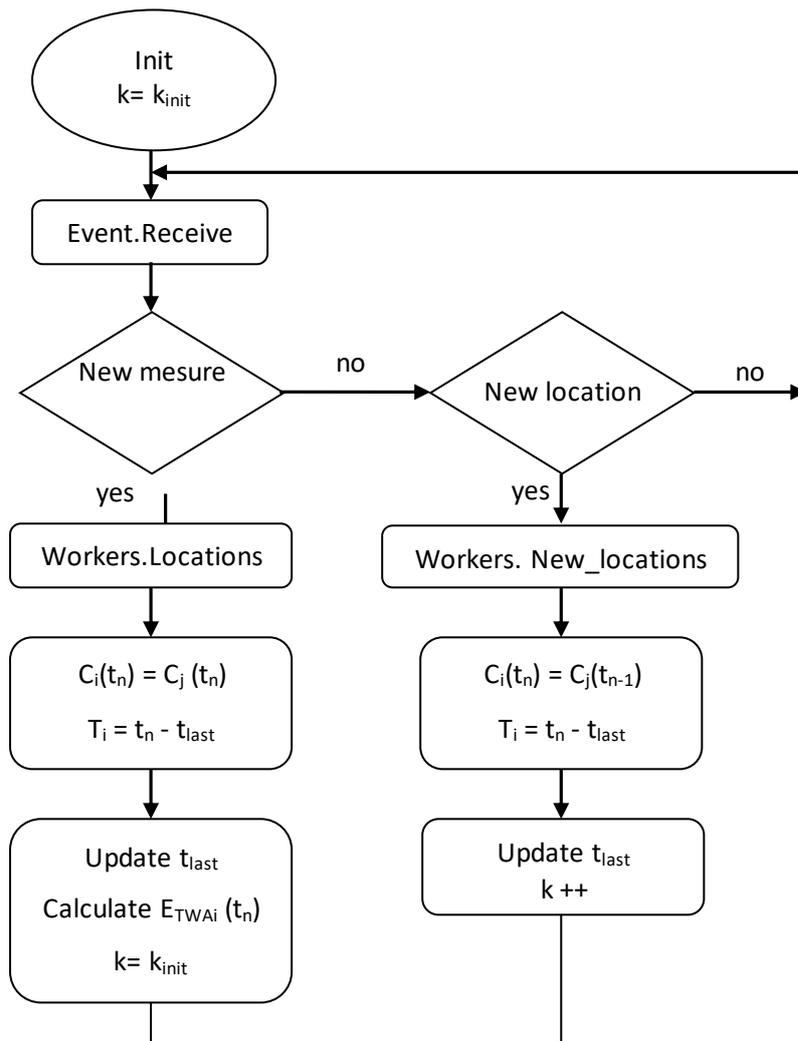


Figure 4.13 : Algorithme de mesure de l'exposition personnelle

Dans le cas d'une détection de changement d'emplacement des employés, le processus récupère les données relatives à sa localisation depuis la base de données et met à jour le niveau de pollution individuelle avec la dernière valeur $C_j(t_{n-1})$ reçue. C'est le dernier

microenvironnement visité par l'employé. Dans ce cas, le temps passé dans ce microenvironnement depuis le dernier événement est $T_i = t_n - t_{last}$ où t_n est l'instant de réception de changement de microenvironnement. Enfin, le processus met à jour le t_{last} ($t_{last} = t_n$) et incrémente le nombre d'évènements déclenchés k .

La figure 4.14 modélise le service d'estimation de l'exposition personnelle dont l'objectif est de calculer périodiquement l'exposition personnelle moyenne pondérée dans le temps E_{TWAI_λ} pour chaque λ . Pour calculer E_{TWAI_λ} le service a besoin des k dernières données sur les concentrations des polluants liées à chaque personne C_i et à sa durée $T_i \ll C_i, T_i \gg$. A la fin, le processus sauvegarde la dernière concentration $C_i = C_j$ et sa durée T_i .

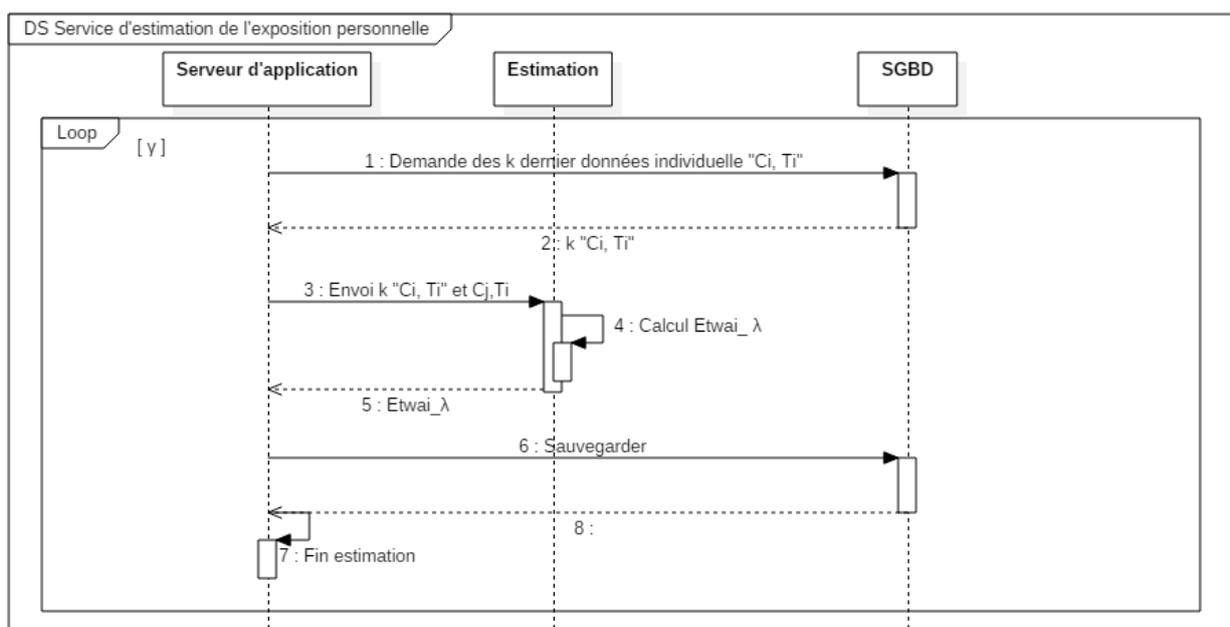


Figure 4.14 : Diagramme de séquence du service d'estimation de l'exposition personnelle

3.4 Implémentation de service d'alerte

L'objectif du service d'alerte est de protéger la santé des employés contre la pollution atmosphérique et de les prévenir en cas de risques sanitaires. Dans notre application, nous nous intéressons principalement à l'exposition personnelle au formaldéhyde. Plusieurs organisations internationales de sécurité et de santé au travail proposent des valeurs guides d'exposition au formaldéhyde dans le milieu professionnel. Comme on peut le constater dans le tableau 4.3, ces valeurs guides sont classées en fonction de la durée d'exposition. Une valeur guide de $100 \mu\text{g.m}^{-3}$ pour une durée de 30 minutes a été définie comme une concentration limite en ce qui concerne l'effet cancérigène dans l'organisme humain [7]. Des valeurs guides entre $94 \mu\text{g.m}^{-3}$ et $123 \mu\text{g.m}^{-3}$ sont spécifiées pour une exposition d'une heure [8]. En France, trois valeurs

guides ont été proposées par l'ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) $500 \mu\text{g.m}^{-3}$, $250 \mu\text{g.m}^{-3}$ et $50 \mu\text{g.m}^{-3}$ respectivement pour une durée d'exposition de 15 minutes, 2 heures et 8 heures (une journée de travail). En Pologne et en Norvège deux valeurs guides de $50 \mu\text{g.m}^{-3}$ et $60 \mu\text{g.m}^{-3}$ sont respectivement proposées pour une exposition de 24 heures. Ces valeurs moyennes pondérées dans le temps ont été conçues pour protéger l'employé dans des environnements professionnels contre les effets chroniques de formaldéhyde.

Tableau 4.3 : Valeurs guides d'exposition au formaldéhyde dans un milieu clos

| λ | Value | Country or organization |
|-----------|--------------------------|---------------------------------|
| 15 min | $500 \mu\text{g m}^{-3}$ | ANSES-France |
| 30 min | $100 \mu\text{g m}^{-3}$ | Australia-Japan-Norway-U.K.-WHO |
| 1 h | $123 \mu\text{g m}^{-3}$ | Canada |
| | $100 \mu\text{g m}^{-3}$ | China |
| | $94 \mu\text{g m}^{-3}$ | USA |
| 2 h | $250 \mu\text{g m}^{-3}$ | France |
| 8 h | $50 \mu\text{g m}^{-3}$ | Canada |
| | $120 \mu\text{g m}^{-3}$ | Singapore-Korea |
| | $33 \mu\text{g m}^{-3}$ | USA |
| | $50 \mu\text{g m}^{-3}$ | France |
| 24 h | $50 \mu\text{g m}^{-3}$ | Poland |
| | $60 \mu\text{g m}^{-3}$ | Norway |

Comme nous l'avons indiqué dans le modèle conceptuel de la section 2 du chapitre 2, les valeurs guides proposées par l'ANSES et l'OMS sont considérées comme l'exposition individuelle moyenne limite E_{TWAi_limite} (voir tableau 4.4).

Tableau 4.4 : Valeurs guides proposées par l'ANSES et l'OMS

| Pollutant | λ | Value ($\mu\text{g m}^{-3}$) | Organization | Level |
|-----------|-----------|--------------------------------|-------------------|-------|
| HCHO | 5 days | 30 | ERP | 1 |
| HCHO | 2 h | 50 | ANSES | 2 |
| HCHO | 30 min | 100 | WHO | 3 |
| HCHO | 8 h | 250 | ANSES VLEP-8h | 4 |
| HCHO | 15 min | 500 | ANSES VLEP-15 min | 5 |

Le processus d'alerte intégré dans notre application compare chaque exposition personnelle moyenne pondérée dans le temps E_{TWAi} calculé à un instant t_n avec la valeur limite qui correspond à cette durée d'exposition. Dans notre cas, quatre E_{TWAi} sont calculés par employé (E_{TWAi_15min} , E_{TWAi_30min} , E_{TWAi_2h} et E_{TWAi_8h}) à chaque instant t_n en se basant sur une moyenne glissante.

En cas de dépassement des limites d'exposition individuel, le service d'alerte envoie un message d'alerte au superviseur (affichage sur l'interface d'application) et à une liste prédéfinie

des responsables (E-mail) selon le niveau de la limite dépassée. La Figure 4.15 modélise les interactions de service d'alerte.

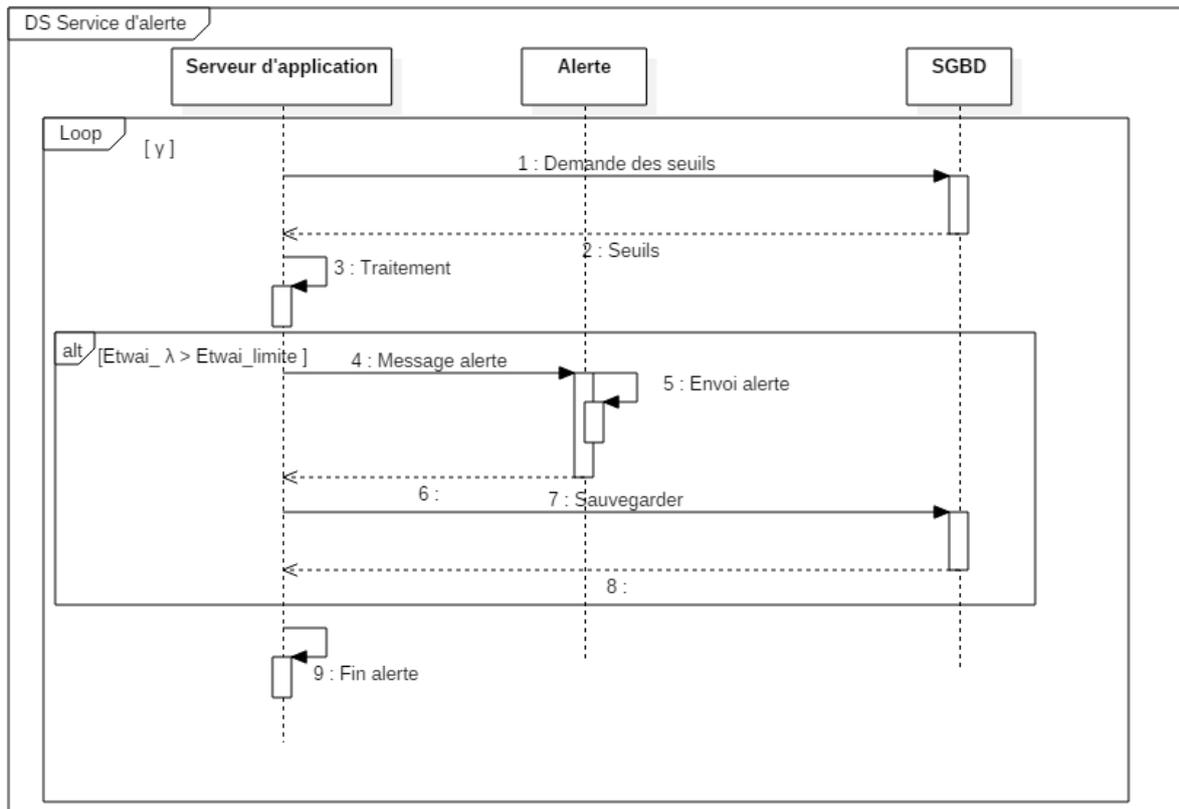


Figure 4.15 : Diagramme de séquence de service d'alerte

3.5 Implémentation du service de stockage

Plusieurs données sont envoyées régulièrement vers le serveur par les différents éléments inclus dans la plateforme proposée à savoir les nœuds multi capteurs et les badges de localisation. D'autres informations doivent rester disponibles pour des analyses ultérieures comme l'exposition individuelle à chaque instant et les événements d'alertes. L'approche adoptée pour répondre à ce besoin est de stocker et de regrouper ces informations dans une base de données. La figure 16 montre le modèle conceptuel de la base de données que nous avons intégré dans notre application. Ce modèle de base de données permet de rendre notre système de suivi de l'exposition personnelle flexible et extensible (ajouter ou supprimer des nœuds de capteurs, modification de microenvironnements, etc...) sans engendrer des modifications majeures côté matériel ou au niveau de l'application.

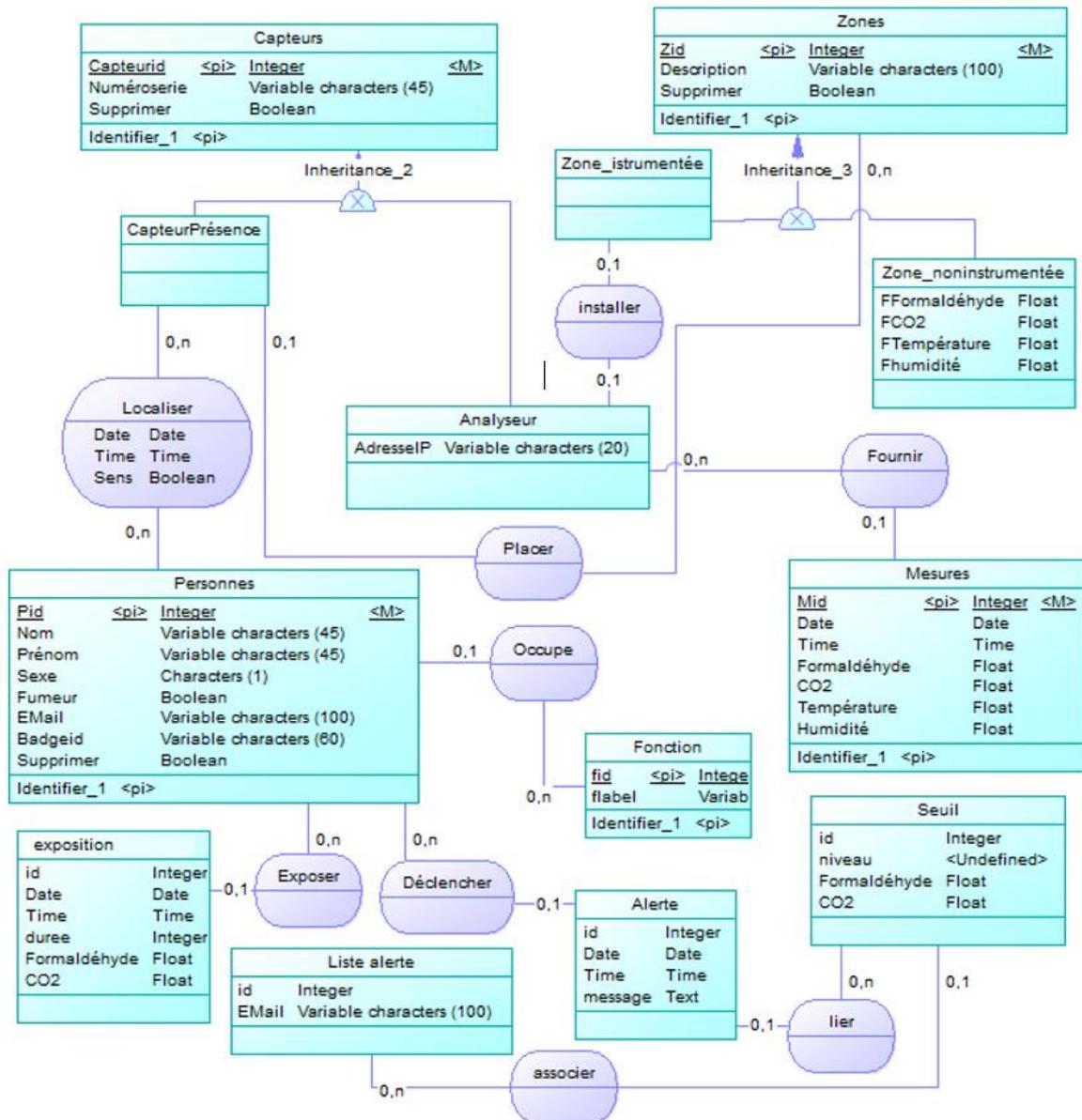


Figure 4.16 : Modèle conceptuel de la base de données

Les données reçues sont stockées dans la base de données MySQL sous la forme suivante : « *Node_id, T, H, C_{CO2}, C_{HCHO}, Date, Time* » et « *Tag_id, Location_id, Date, Time* » envoyé respectivement par les nœuds multi capteurs placés dans les différents microenvironnements et les badges portés par les employés. Chaque *Node_id* est équivalent à une *Location_id*. Ceci permet de combiner les informations sur les concentrations de polluants atmosphériques dans les microenvironnements avec les emplacements des employés et estimer par la suite l'exposition personnelle moyenne en temps réel. Pour la synchronisation des données, le service de stockage rajoute la date et l'heure « *jj/mm/aaaa, hh:mm* » indiqué par le serveur au moment de la réception de ces informations.

3.6 Implémentation du service de configuration

Deux niveaux de configuration sont possibles dans notre système de surveillance de l'exposition personnelle aux polluants : les configurations liées à notre application implantée dans le serveur et les consignes envoyées aux différents éléments du système. Le superviseur est capable d'ajouter, de modifier ou de supprimer des informations concernant les employés, les nœuds multi capteurs, les microenvironnements, etc.... et de spécifier la liste des responsables à alerter en cas de dépassement des limites d'exposition. D'autre part, le superviseur peut donner des consignes à chaque nœud multi capteurs, par exemple il peut changer la période β , et à chaque badge, par exemple il peut modifier la période de mise à jour de l'emplacement γ . La Figure 17 illustre les interactions du service de configuration.

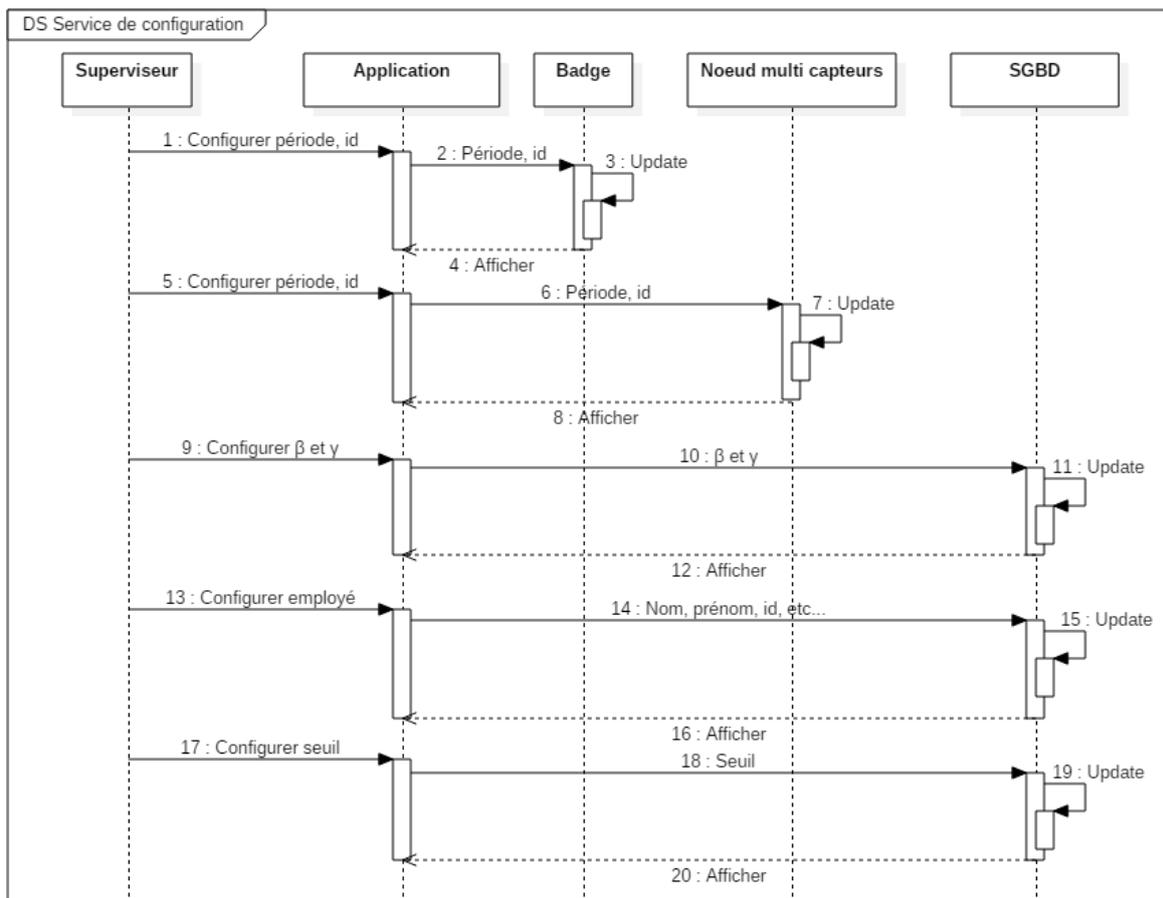


Figure 4.17 : Diagramme de séquence du service de configuration

4. Analyse et validation des données de la plateforme

Pour valider le système prototype, cette partie présente les résultats préliminaires de notre système de surveillance. Il s'agit d'une partie des locaux du Centre de Recherche en Automatique (CRAN) qui se compose de plusieurs bureaux de chercheurs de l'équipe

« Systèmes de Communication Contrainte (CO2) ». Le plan de ce milieu professionnel est présenté dans la figure 4.18. Chaque pièce instrumentée est équipée par un nœud multi capteurs et une balise A750. D'autres pièces moins importantes en termes de niveau de pollution atmosphérique ou de présence des employés doivent être équipées uniquement par une balise A750. Ceci permet de diminuer le coût global de notre solution Ces zones non instrumentées ont une valeur moyenne de concentration fixe pour chaque polluant prédéterminée à l'avance. Dans ce qui suit, nous présentons les résultats expérimentaux.

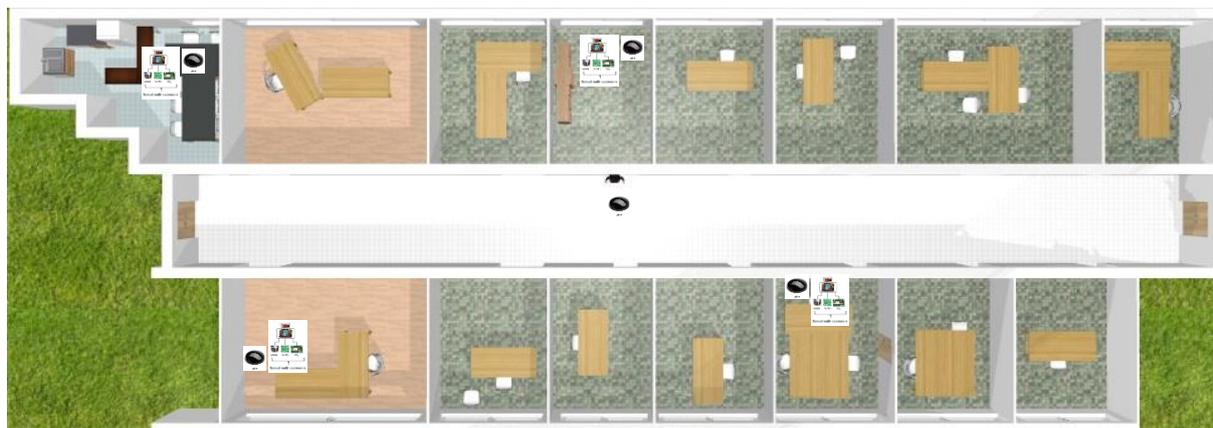


Figure 4.18 : Plan de site

Nous avons choisi d'équiper quatre microenvironnements par des nœuds multi-capteurs et des balises A750. Le reste du bâtiment est considéré comme un seul microenvironnement non instrumenté avec des concentrations de polluants fixes. Le tableau 5 montre la répartition des équipements.

Tableau 4.3: La répartition des équipements pour le scénario de test de la solution technique

| Microenvironnement | Surface | Commentaires |
|-------------------------|---------|------------------------|
| Espace ouvert / couloir | 40 | Bonne aération |
| Bureau 527 | 12 | Mauvaise aération |
| Salle photocopieuse | 6 | Très mauvaise aération |
| Salle de réunion | 25 | Aération moyenne |

Nous avons lancé l'expérience pour la surveillance de l'exposition d'un employé pendant deux jours successifs. Dans ce cas, nous avons choisi de nous limiter à trois durées d'exposition λ à savoir 30 minutes, 2 heures et 8 heures. Les nœuds multi-capteurs intègrent chacun un capteur de formaldéhyde, un capteur de CO2 et un capteur de température et d'humidité. Le tableau 6 résume la configuration du système.

Tableau 4.4: Configuration du système de surveillance pour le scénario de test de la solution technique

| Polluant | λ | E_{TWAi} Limite | β | γ |
|-----------------|------------|--------------------------|------------|----------|
| Formaldéhyde | 30 minutes | 100 $\mu\text{g.m}^{-3}$ | 10 minutes | 1 minute |
| | 2 heures | 50 $\mu\text{g.m}^{-3}$ | 10 minutes | 1 minute |
| | 8 heures | 33 $\mu\text{g.m}^{-3}$ | 10 minutes | 1 minute |
| CO ₂ | 30 minutes | 1000 ppm | 10 minutes | 1 minute |
| | 2 heures | 1100 ppm | 10 minutes | 1 minute |
| | 8 heures | 1300 ppm | 10 minutes | 1 minute |

Nous avons choisi de fixer la concentration de Formaldéhyde à 150 $\mu\text{g.m}^{-3}$ et celle de CO₂ à 1800 ppm dans les zones non instrumentées. Ces valeurs ne correspondent pas aux valeurs moyennes réelles mais nous avons choisi des valeurs élevées pour valider le service d'alerte en provoquant une augmentation rapide de l'exposition personnelle. Les figures 19 et 20 représentent respectivement le niveau de formaldéhyde et de CO₂ dans ces microenvironnements en fonction du temps. Comme nous pouvons le constater, le niveau de formaldéhyde varie entre 6 $\mu\text{g.m}^{-3}$ et 70 $\mu\text{g.m}^{-3}$ et les concentrations de CO₂ varient entre 324 ppm et 1260 ppm dans les microenvironnements équipés par un nœud multi-capteurs. La salle photocopieuse est le microenvironnement le plus pollué à cause de sa petite surface et sa mauvaise aération durant la journée.

L'objectif de cette expérience est de valider les différents services que nous avons implantés dans cette solution technique basée sur une approche centralisée.

- Service de localisation : Pour valider le service de localisation, nous avons fixé un scénario de déplacement d'une personne sur les deux jours. Les données de localisation fournies par le sous-système de localisation sont comparées aux emplacements prédéfinis.
- Service d'estimation de l'exposition personnelle : L'exposition personnelle moyenne pondérée dans le temps pour chaque durée λ E_{TWAi} est calculée « off-line » en se basant sur les mêmes données de mesure de concentrations de polluants. Ces valeurs nous permettent de valider ce service.
- Service d'alerte : Les alertes envoyées par le système vers le superviseur sont comparés avec les alertes reçues sur l'interface de l'application de surveillance pour chaque λ .

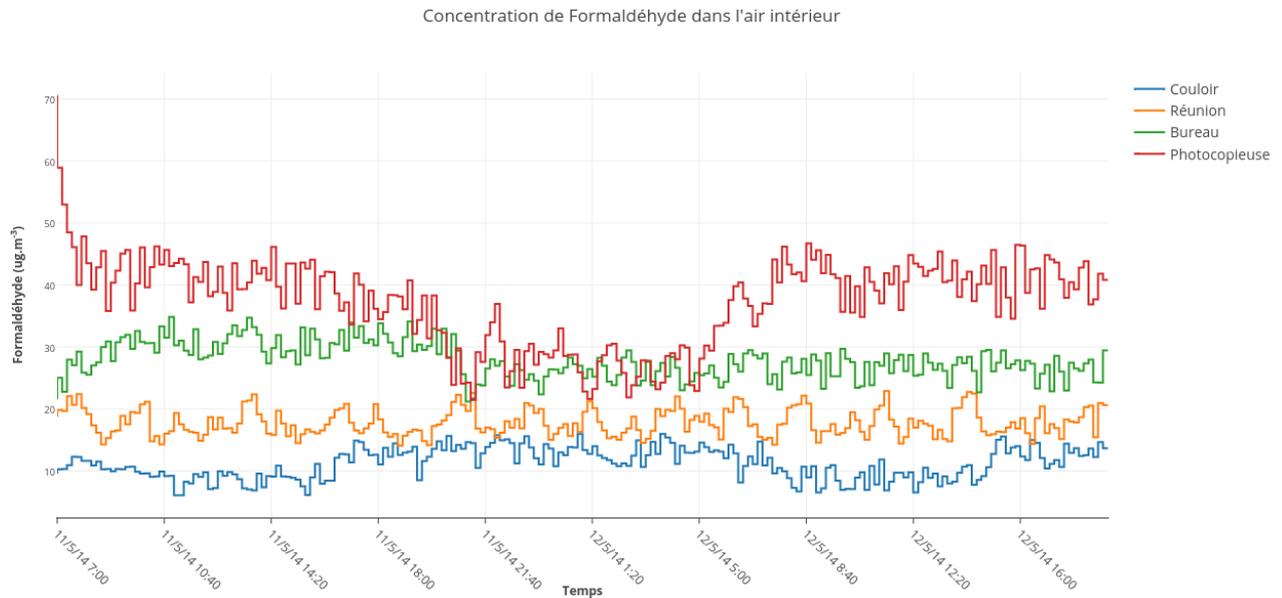


Figure 4.19 : Concentration de Formaldéhyde par microenvironnement

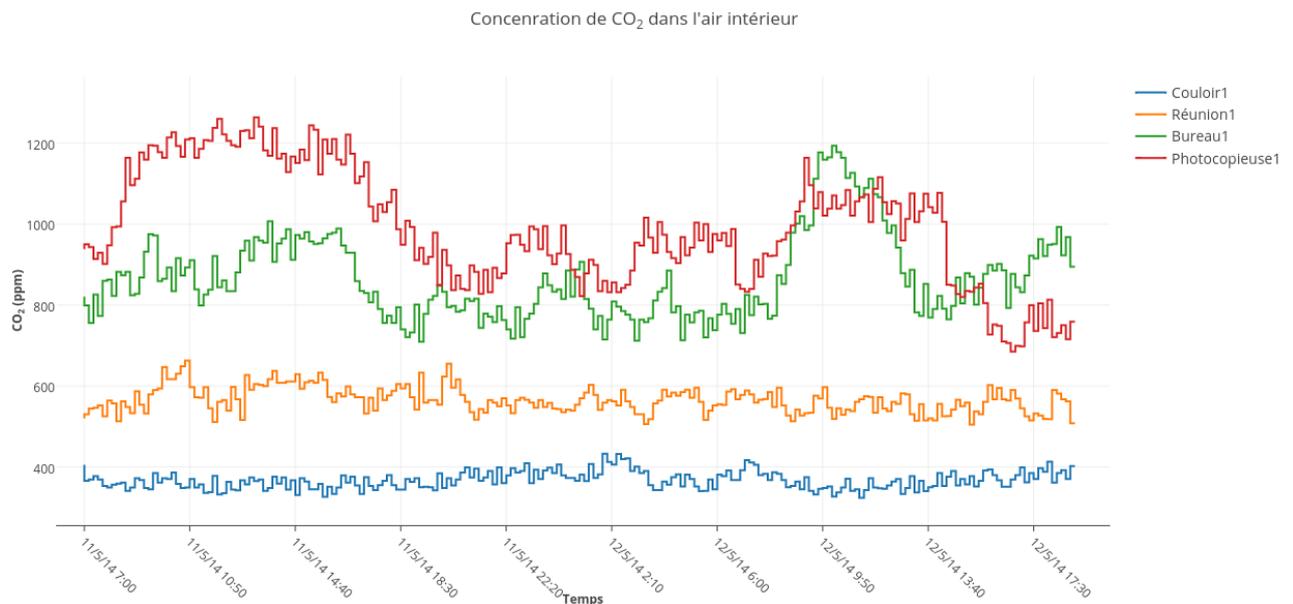


Figure 4.20 : Concentration de CO₂ dans l'air intérieur par microenvironnement

Les figures 4.21 et 4.22 présentent respectivement l'exposition personnelle (concentrations de polluants liées à la personne) au Formaldéhyde « Ep_Formaldéhyde » et au CO₂ « Ep_CO₂ » durant les deux jours. A la fin de la première journée, la personne laisse son badge dans le microenvironnement « Bureau 527 ». Grâce à ces deux courbes et en se basant sur les concentrations de Formaldéhyde et de CO₂ dans les différents microenvironnements (figures 4.19 et 4.20), nous avons validé le service de localisation. Les emplacements détectés durant les deux jours correspondent bien au scénario d'emplacement prédéfinis.

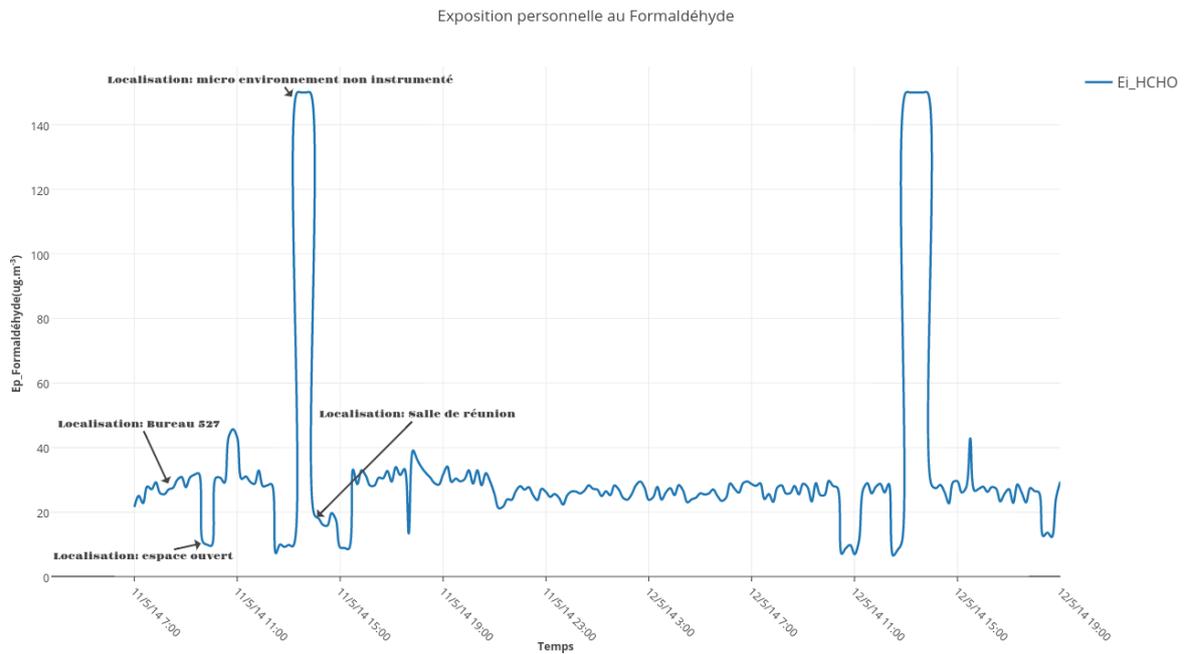


Figure 4.21: Exposition personnelle au Formaldéhyde

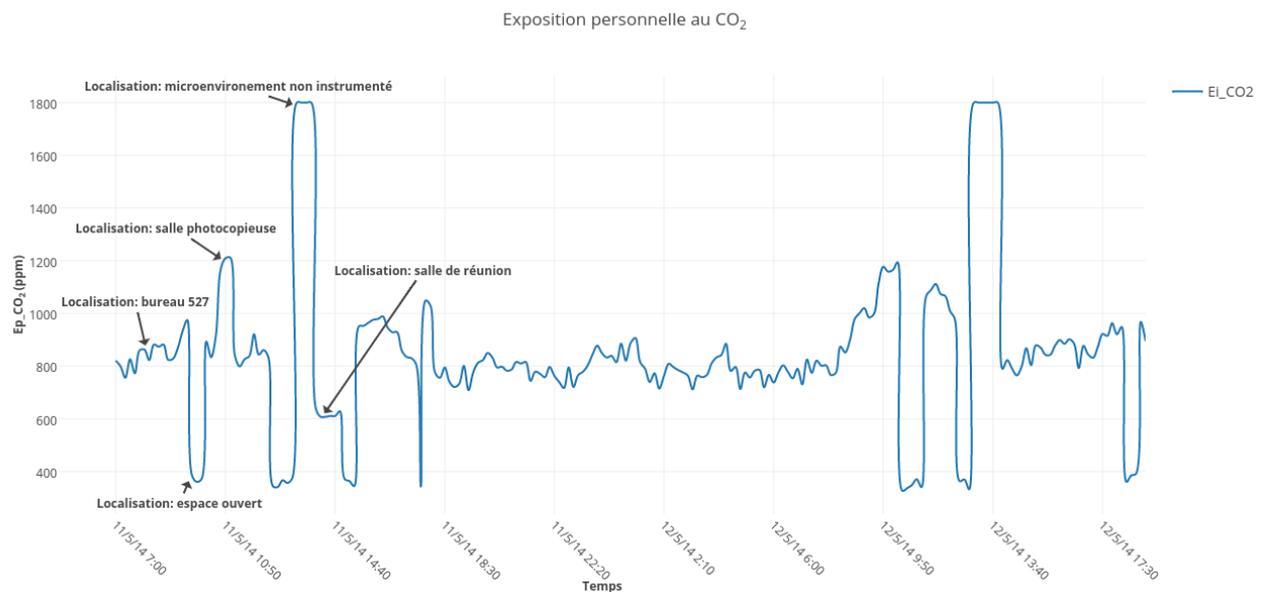


Figure 4.22: Exposition personnelle au CO₂

Les figures 4.23, 4.24 et 4.25 représentent l' E_{TWAi} au Formaldéhyde respectivement pour $\lambda=30$ minutes, $\lambda=2$ heures et $\lambda=8$ heures. Les figures 4.26, 4.27 et 4.28 représentent l' E_{TWAi} au CO₂ respectivement pour $\lambda=30$ minutes, $\lambda=2$ heures et $\lambda=8$ heures. Ces estimations ont été validées en comparant ces valeurs à celles calculées « off-line ». Le service d'alerte est validé car un message d'alerte a bien été généré après chaque dépassement de seuil.

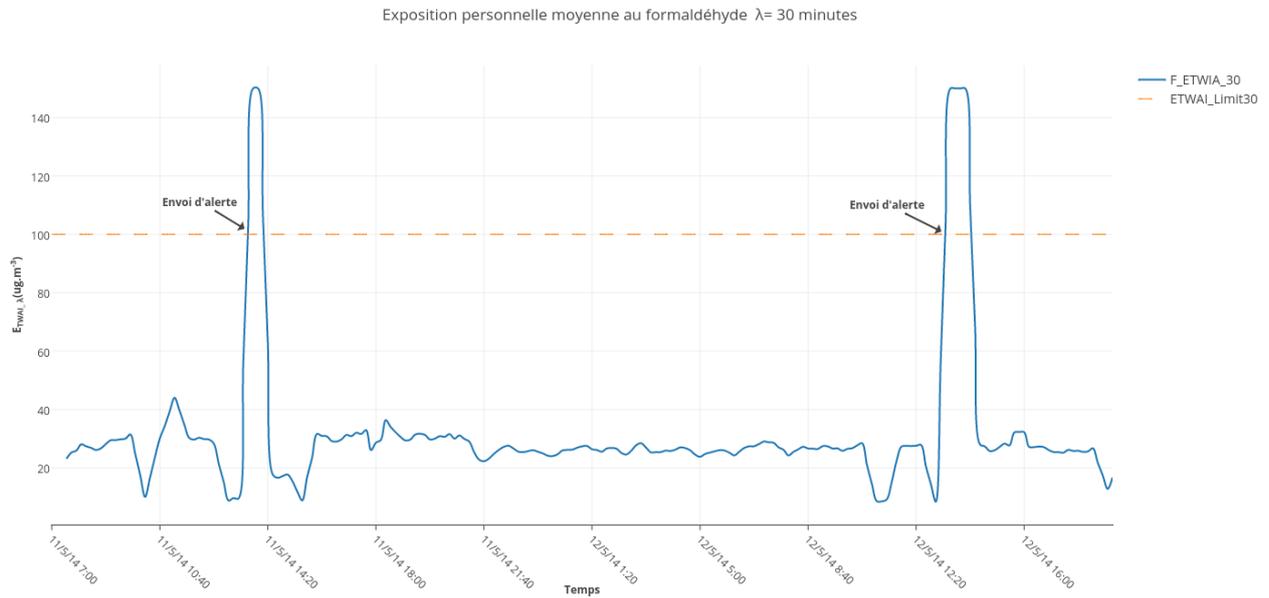


Figure 4.23 : E_{TWAi} au Formaldéhyde pour $\lambda = 30$ minutes

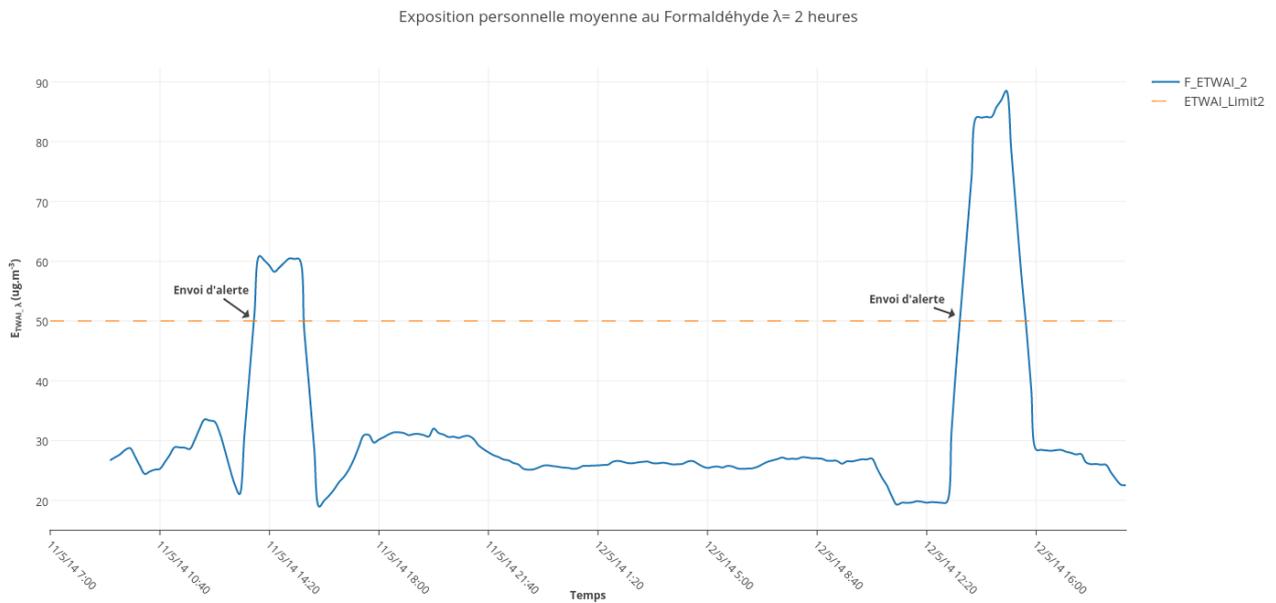


Figure 4.24 : E_{TWAi} au Formaldéhyde pour $\lambda = 2$ heures

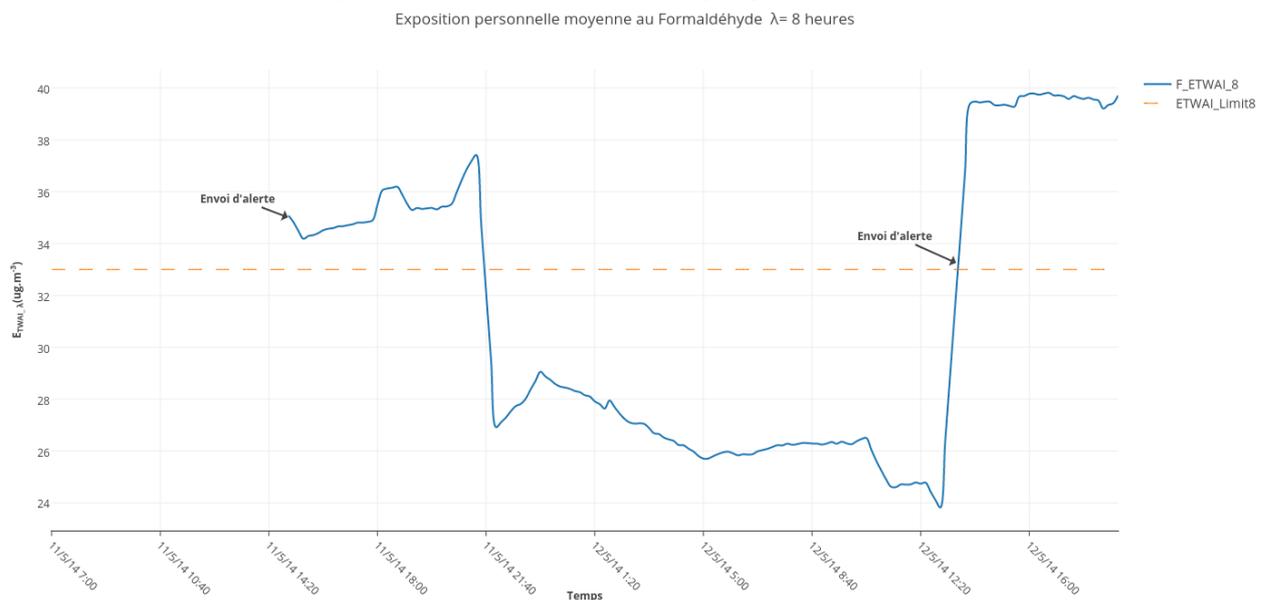


Figure 4.25 : E_{TWAi} au Formaldéhyde pour $\lambda = 8$ heures

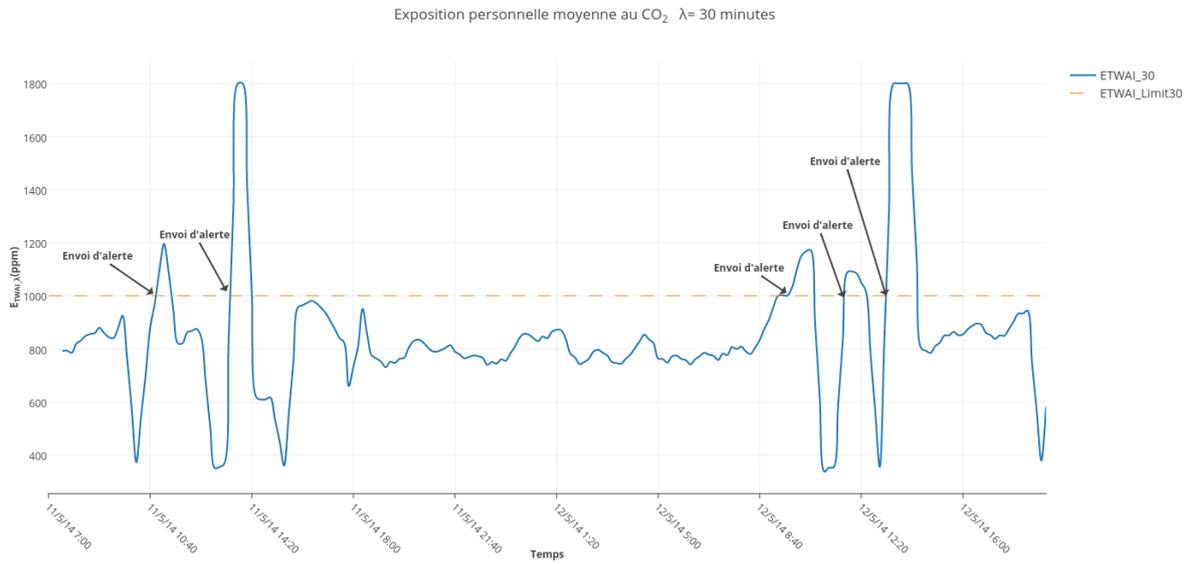


Figure 4.26 : E_{TWΔi} au CO₂ pour λ = 30 minutes

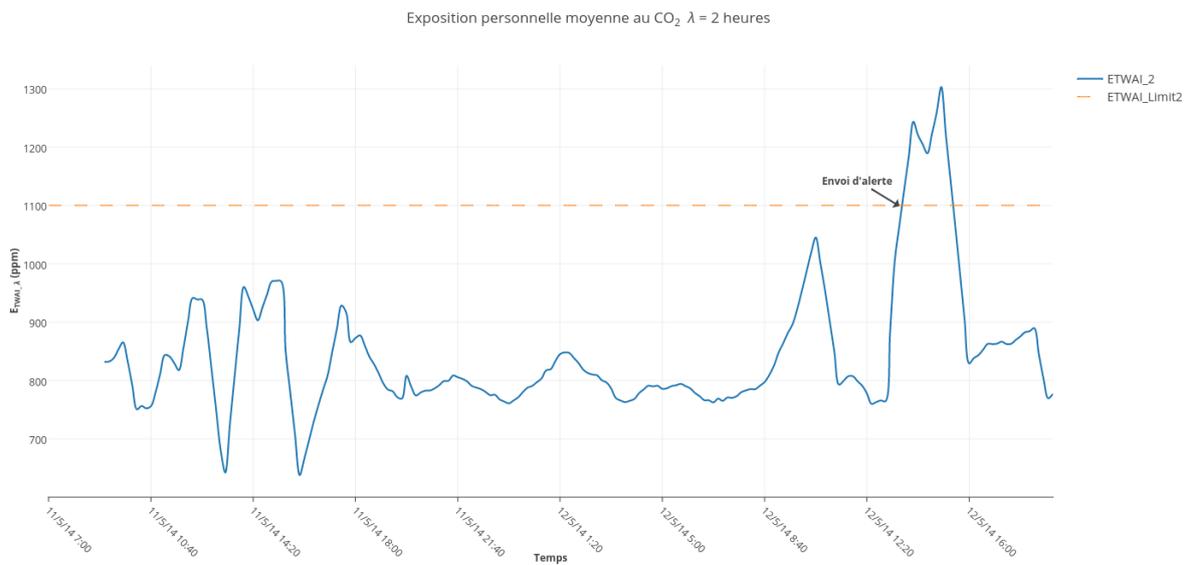


Figure 4.27 : E_{TWΔi} au CO₂ pour λ = 2 heures

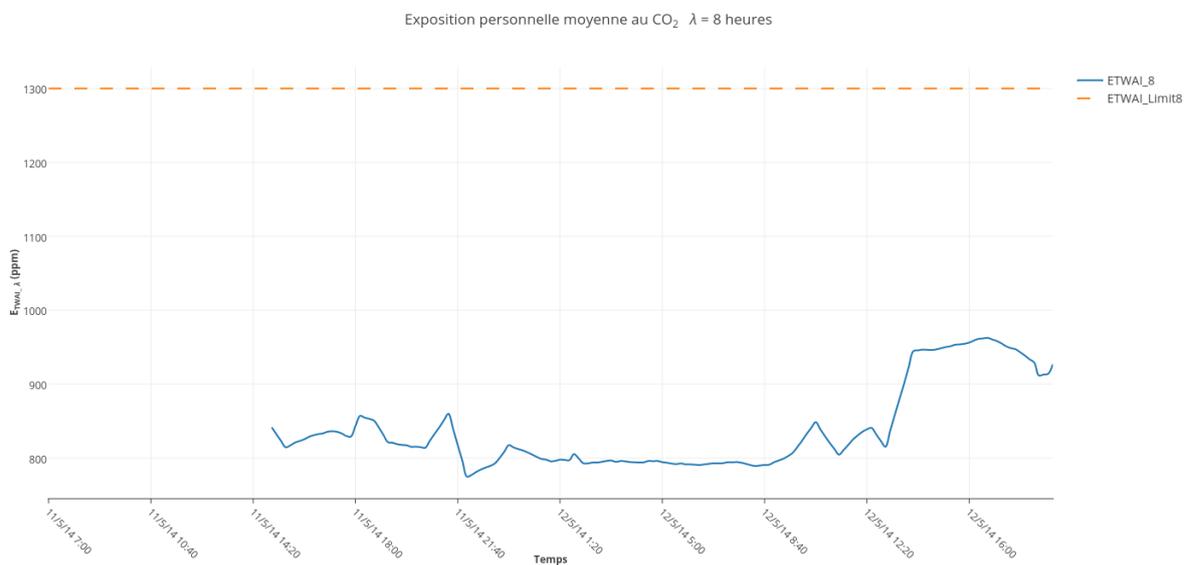


Figure 4.28: E_{TWΔi} au CO₂ pour λ = 8 heures

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une solution technique basée sur une approche centralisée. Tous les nœuds multi-capteurs et les badges de localisation envoient leurs données vers un serveur central qui traite ces données pour estimer l'exposition de toutes les personnes en même temps. Un prototype a été mis en place en se basant sur des solutions matérielles déjà développées. Nous avons réalisé une interface de communication externe qui permet au capteur de Formaldéhyde de l'ICPEES de coopérer avec son environnement. Finalement, nous avons validé les services présentés dans la solution logique à l'aide d'une expérimentation réelle.

Les résultats présentés dans la section 4 montrent l'efficacité de notre solution technique et de notre approche d'estimation en temps réel de l'exposition personnelle dans un milieu intérieur.

Cependant, dans cette solution nous avons utilisé l'infrastructure réseau WIFI de l'entreprise pour envoyer les données au serveur via Internet. Cela n'est pas toujours possible à cause de certaines règles de sécurité définies par l'entreprise. L'autre inconvénient de cette solution est le coût du sous-système de localisation (coût de localisation par personne) qui peut être élevé si on surveille l'exposition d'un nombre restreint de personnes (milieu professionnel avec un faible nombre d'employés). Comme le traitement est centralisé, le coût de matériel ne dépend pas directement du nombre de personnes à surveiller.

Nous proposons dans le prochain chapitre une autre solution de surveillance en temps réel de l'exposition personnelle aux polluants de l'air intérieur. Elle est basée sur une approche distribuée où le traitement se fait en local sur un badge intelligent porté par chaque employé.

Bibliographie

- [1] ITU-T Y.2060 <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2060-201206-I/fr> [En ligne Mars 2015]
- [2] Pierre-Jean Benghozi, Sylvain Bureau, Françoise Massit-Folléa « L'Internet des Objets » <http://books.openedition.org/editionsmsh/84> [En ligne Février 2015]
- [3] General Electric <http://www.ge-mcs.com/download/co2-flow/920-448G-LR.pdf> [En ligne Mars 2015]
- [4] Mikroë <http://www.mikroe.com/click/sht1x/> [En ligne Mars 2015]
- [5] Olimex <https://www.olimex.com/Products/Modules/Ethernet/MOD-WIFI/> [En ligne Mars 2015]
- [6] Olimex <https://www.olimex.com/Products/PIC/Development/PIC32-MAXI-WEB/> [En ligne Mars 2015]
- [7] World Health Organization Development of WHO Guidelines for Indoor Air Quality. *WHO Regional Office for Europe Copenhagen 2006*
- [8] OEHHA. Determination of acute reference exposure levels for airborne toxicants; *Office of Environmental Health Hazard Assessment: California, U.S., 1999.*

Chapitre 5 : Surveillance de l'exposition personnelle par badge intelligent

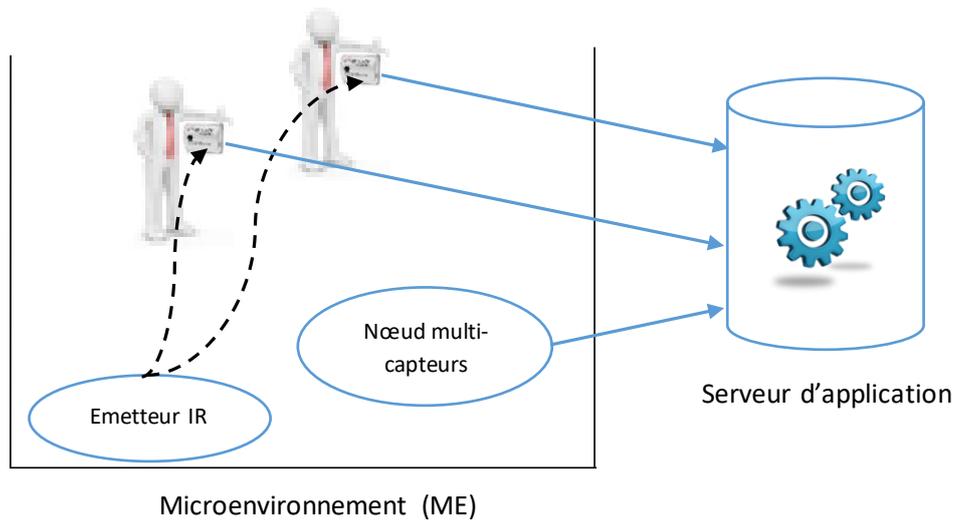
| | |
|--|-----|
| 1. Introduction..... | 106 |
| 2. Principe de fonctionnement du badge intelligent..... | 107 |
| 2.1 Architecture du badge | 107 |
| 2.2 Mise en réseau et mode de communication | 109 |
| 3. Prototype développé..... | 111 |
| 3.1 Architecture matérielle du badge | 111 |
| 3.2 Algorithme de surveillance de l'exposition personnelle..... | 112 |
| 3.3 Protocole de communication | 114 |
| 3.3.1 Description du protocole de configuration..... | 115 |
| 3.3.2 Protocole de lecture du niveau d'exposition personnelle..... | 116 |
| 3.3.3 Protocole de lecture des concentrations de polluants | 116 |
| 3.4 Expérimentation et évaluation | 117 |
| 3.4.1 Conditions expérimentales | 117 |
| 3.4.2 Interprétation des résultats | 117 |
| 4. Contraintes relatives à l'approche par badge intelligent..... | 119 |
| 4.1 Etude sur la consommation d'énergie | 120 |
| 4.1.1 Unité d'alimentation : la batterie | 120 |
| 4.1.2 Unité de traitement : le microcontrôleur | 120 |
| 4.1.3 Unité de communication : le module Wi-Fi..... | 121 |
| 4.1.4 Unité de stockage : la mémoire flash | 121 |
| 4.2 Conclusion | 122 |
| 5. Optimisation de ressources du badge | 123 |
| 5.1. Mécanisme de conservation de l'énergie | 123 |
| 5.2. Mécanisme d'optimisation mémoire | 127 |
| 6. Expérimentation et évaluation..... | 129 |
| 6.1. Conditions expérimentales..... | 129 |
| 6.2 Résultats en termes de précision de l'estimation | 130 |
| 6.3 Résultats en termes de coût d'énergie et de la mémoire..... | 133 |
| 7. Conclusion..... | 136 |

1. Introduction

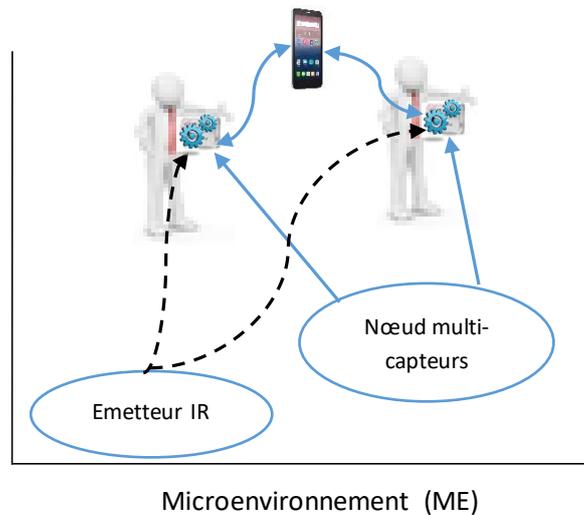
Le système présenté dans le chapitre précédent a montré qu'une approche centralisée basée sur l'internet des objets peut être utilisée pour la surveillance de l'exposition personnelle aux polluants de l'air intérieur. Mais le passage par l'infrastructure de l'entreprise et le surdimensionnement du sous-système de localisation pour suivre un nombre limité de personnes représentent les limites de cette approche centralisée.

Dans ce chapitre, nous considérons donc une approche de surveillance distribuée, qui se base sur le traitement des données directement sur des badges intelligents. Contrairement à l'approche centralisée où tous les données des personnes sont collectées et traitées sur la même machine (serveur d'application), chaque badge intelligent porté par une personne permet de surveiller individuellement son exposition aux polluants de l'air intérieur (traitement et sauvegarde des données sur son propre badge). La figure 5.1 montre ce qui distingue ces deux approches en termes d'échanges d'information.

Ce chapitre est décomposé de quatre parties. Nous décrivons en section 2 le principe de fonctionnement de notre approche distribuée basée sur un badge intelligent pour la surveillance en temps réel de l'exposition des personnes à des polluants de l'air. Nous présentons en section 3 le prototype que nous avons développé dans le cadre du projet ANR CAPFEIN et les résultats d'une campagne d'expérimentation qui a été menée afin d'évaluer cette nouvelle approche. Finalement, nous présentons dans la section 4 les solutions que nous proposons pour le problème de la limitation des ressources du badge, à savoir la consommation d'énergie, la quantité de mémoire et le temps de calcul. La première solution consiste à utiliser des modes de fonctionnements (On, Off, etc...) pour réduire la consommation d'énergie dans le badge. La deuxième solution est basée sur les filtres EWMA (Exponential Weighted Moving Average) qui permet de réduire à la fois la consommation d'énergie, l'espace mémoire et le temps de calcul. Une deuxième campagne d'expérimentation a été menée pour évaluer l'efficacité en termes d'énergie et de mémoire de ces deux solutions.



(b) approche centralisée



(a) approche distribuée

Figure 5.1 : Schémas de principe de l'approche centralisée et distribuée

2. Principe de fonctionnement du badge intelligent

Dans cette partie, nous présentons l'architecture et le principe de fonctionnement de notre solution de surveillance en temps réel de l'exposition personnelle à la pollution de l'air en milieu professionnel qui repose sur la conception et le développement d'un badge intelligent.

2.1 Architecture du badge

Comme tout objet communicant, le badge est équipé d'une unité de traitement, d'une unité de stockage de données, d'une unité de communication et d'une unité d'énergie (une batterie

avec un module de recharge). En plus, le badge intelligent intègre un système de localisation qui est nécessaire pour suivre les personnes en temps réel dans l'entreprise. La figure 1 présente l'architecture interne du badge intelligent modélisé par un diagramme de blocs internes.

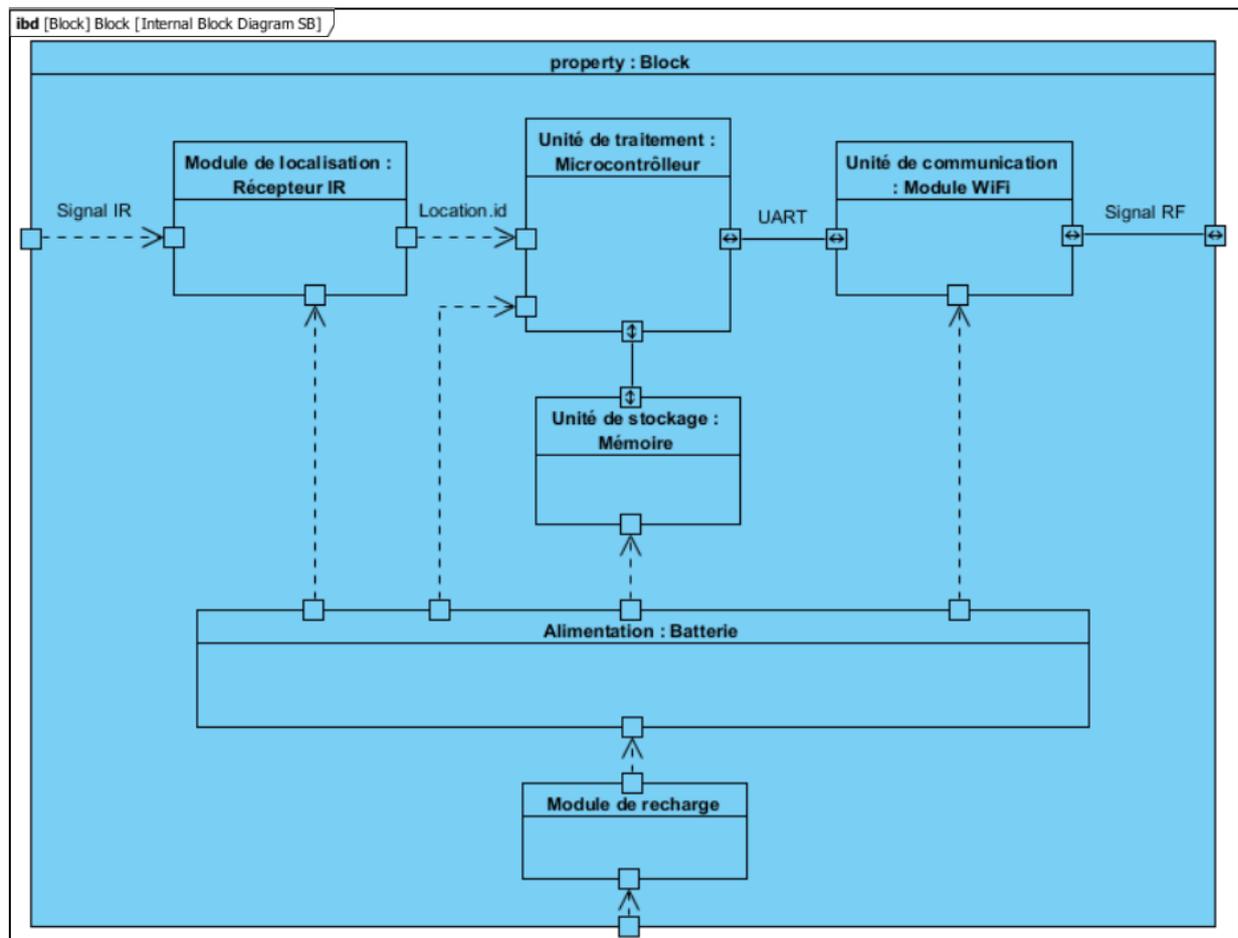


Figure 5.2 : Diagramme de blocs internes : Architecture interne du badge intelligent

L'unité de traitement est matérialisé par un microcontrôleur, il effectue des traitements sur ces données et prend des décisions. Le choix du microcontrôleur s'est fait relativement à des critères de coûts, de consommation d'énergie et de modularité (c'est-à-dire facilement interconnectable avec d'autres modules). L'unité de communication est responsable de toutes les émissions et réceptions des données vers et depuis notre badge intelligent. Elle utilise le protocole sans fil 802.11 comme support de communication grâce à un module Wi-Fi à faible consommation d'énergie. La technologie Wi-Fi a été choisie pour que le badge puisse communiquer d'une part avec les nœuds multi-capteurs, et d'autre part avec des smartphones et des tablettes pour s'interfacer avec ses utilisateurs. L'unité d'énergie est une batterie rechargeable « in situ » qui permet d'alimenter tous les composants électroniques intégrés dans le badge. Le système de localisation est composé d'un récepteur infrarouge qui permet de

recevoir des informations sur l'emplacement de la personne porteur du badge. L'architecture générale du système et son principe de fonctionnement sont détaillés dans les prochaines sections.

2.2 Mise en réseau et mode de communication

Comme dans la solution centralisée du chapitre 2, la solution distribuée utilise l'approche par microenvironnement qui est une méthode indirecte d'estimation de l'exposition personnelle à des polluants atmosphériques. Le milieu professionnel est décomposé en microenvironnements et chaque microenvironnement est équipé d'un nœud multi-capteurs permettant de mesurer le niveau des polluants dans l'air et d'un émetteur IR (balise) pour localiser les employés. Chaque employé doit porter un badge qui possède un identifiant unique. Ce badge est dit intelligent car il intègre des fonctions de calcul de taux d'exposition. Un superviseur, gestionnaire du système global, peut aussi interagir avec ce badge pour effectuer des opérations de configuration, de récupération des taux d'exposition, etc... et cela en utilisant un équipement mobile tel que son smartphone. Les interactions entre le badge, le nœud multi-capteurs, l'émetteur IR et le smartphone sont présentées dans la figure 5.3.

Il existe plusieurs type d'architectures réseau pour faire communiquer des messages entre ces différents équipements (badge, nœud multi-capteurs et smartphone). La première architecture possible est un réseau de type ad hoc. Les réseaux ad hoc sont des réseaux sans fil capables de s'organiser sans infrastructure prédéfinie. C'est une architecture simple dans son fonctionnement et sa mise en place. L'inconvénient majeur de cette architecture réside dans le fait que la plus part des smartphones ne communiquent pas en mode ad hoc. Donc le réseau ad hoc n'est pas envisageable dans notre approche. La deuxième architecture possible est de type infrastructure où les différents nœuds du réseau communiquent en passant par des points d'accès, c'est-à-dire en utilisant l'infrastructure du réseau de l'entreprise et en créant un VLAN (Virtual Local Area Network) dédié pour l'application de surveillance en temps réel de l'exposition personnelle. Nous ne retenons pas cette solution car nous cherchons une solution « plug and play » indépendante du réseau de l'entreprise ou sans avoir à installer un réseau Wi-Fi en parallèle de celui de l'entreprise. Donc, nous avons opté pour une architecture réseau basée sur des communications directes entre les différents équipements. En fonctionnement normal, les nœuds multi-capteurs sont configurés en mode AP et les badges en mode client. A la demande du superviseur, le badge peut se mettre en mode AP pour communiquer avec son smartphone.

En fonctionnement normal, le badge reçoit périodiquement un message « Location.id » envoyé par la balise. Ce message permet au badge d'identifier son microenvironnement et par conséquent d'identifier l'emplacement de la personne. En se basant sur cette information, le badge se connecte au nœud multi-capteurs placé dans le même microenvironnement via l'interface Wi-Fi pour récupérer les niveaux de pollution en utilisant la requête « Concentrations.req ». A la réception de cette requête, le nœud multi-capteurs traite la demande et envoie une réponse « Concentrations.resp » au badge donnant les valeurs de mesures des polluants. Finalement, le badge sauvegarde la mesure dans sa mémoire interne et il calcule l'exposition personnelle moyenne pondérée dans le temps $E_{TWAi}(t_n)$ à l'instant t_n pour chaque durée d'exposition λ .

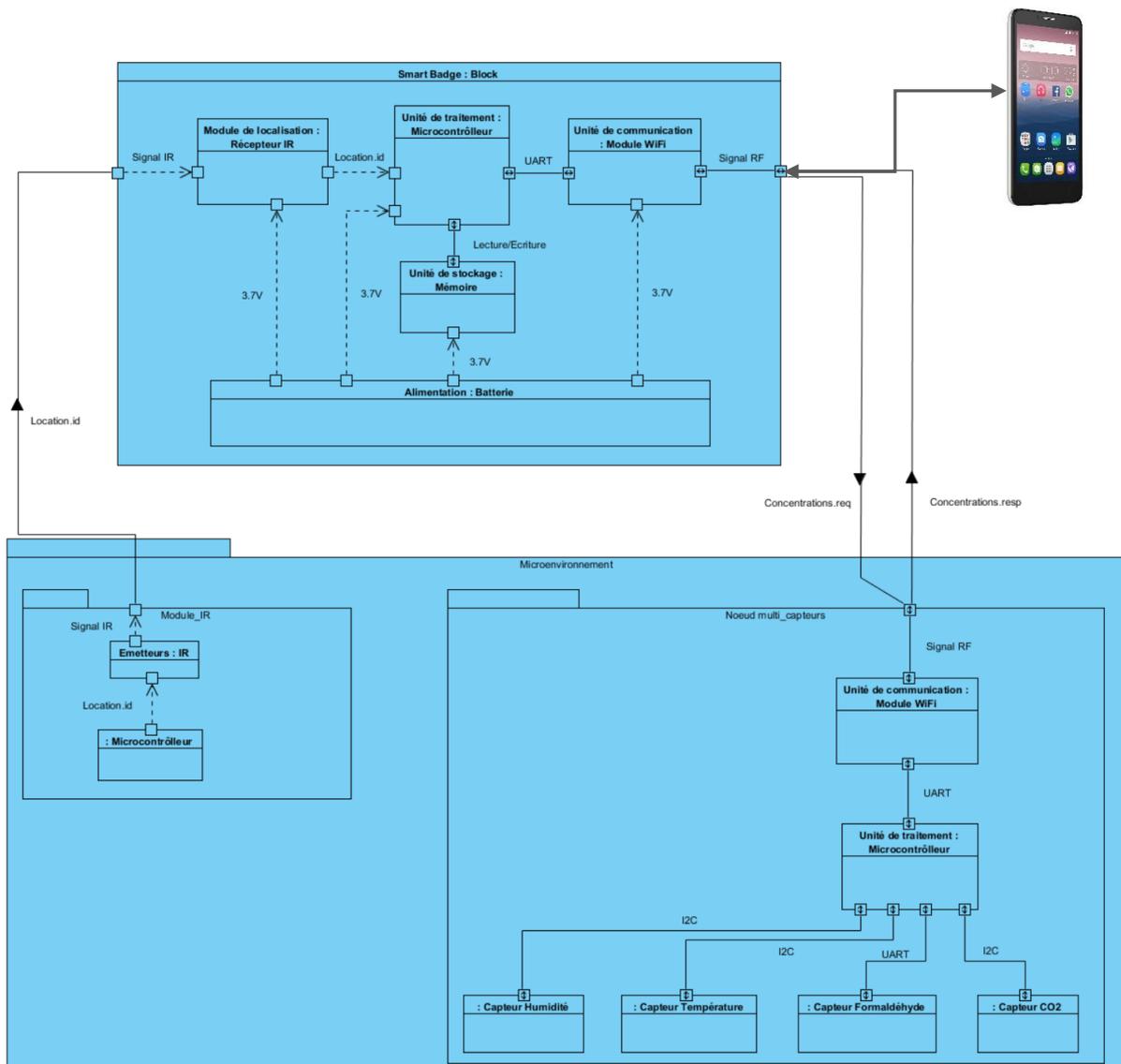


Figure 5.3 : Interactions entre le badge et les équipements d'un microenvironnement

3. Prototype développé

Cette partie présente un premier prototype de badge développé pour surveiller en temps réel l'exposition personnelle à des polluants. Nous allons tout d'abord décrire l'architecture matérielle du badge. Puis nous présentons l'algorithme et les protocoles de communication. Pour terminer, une validation expérimentale est présentée.

3.1 Architecture matérielle du badge

Concernant l'architecture matérielle du système avec badges intelligents, nous avons décidé de développer un système basé sur des composants à faible consommation d'énergie et alimentés par une batterie rechargeable via une interface USB. Nous avons choisi une batterie de type Lithium qui se caractérise par sa légèreté et sa bonne autonomie. Un module de communication est intégré dans le badge qui permet d'une part de récupérer les données de concentrations des polluants, et d'autre part de communiquer avec le superviseur via son smartphone. La technologie Wi-Fi a été choisie pour faciliter la communication avec des équipements mobiles et les nœuds multi-capteurs. Après une étude des modules Wi-Fi disponibles sur le marché, nous avons choisi d'utiliser le module « low power » RN171 adapté aux applications mobiles grâce à sa faible consommation d'énergie et à son fonctionnement multi modes (on, idle, off). Nous avons choisi également d'utiliser un microcontrôleur 8 bits XLP « Xtra Low Power » de la famille Microship qui peut aussi fonctionner sous plusieurs modes. La figure 5.5 représente la schématique du prototype pour le badge intelligent. Nous avons utilisé l'outil de conception assisté par ordinateur « Altium designer » car il intègre une large variété de bibliothèques de composants électroniques. Ce badge prototype que nous avons développé est de petite taille (87.8 mm x 57.3 mm x 7 mm) et il est très léger (30g) avec un coût de 41 euros pour le prototype. La figure 5.4 montre les deux faces du badge intelligent.

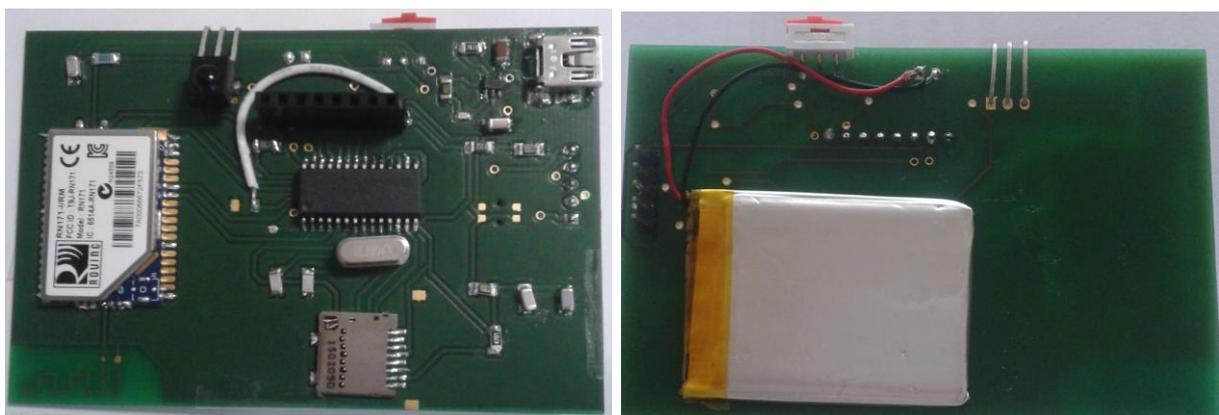


Figure 5.4 : Vue de dessous et de dessus du badge intelligent

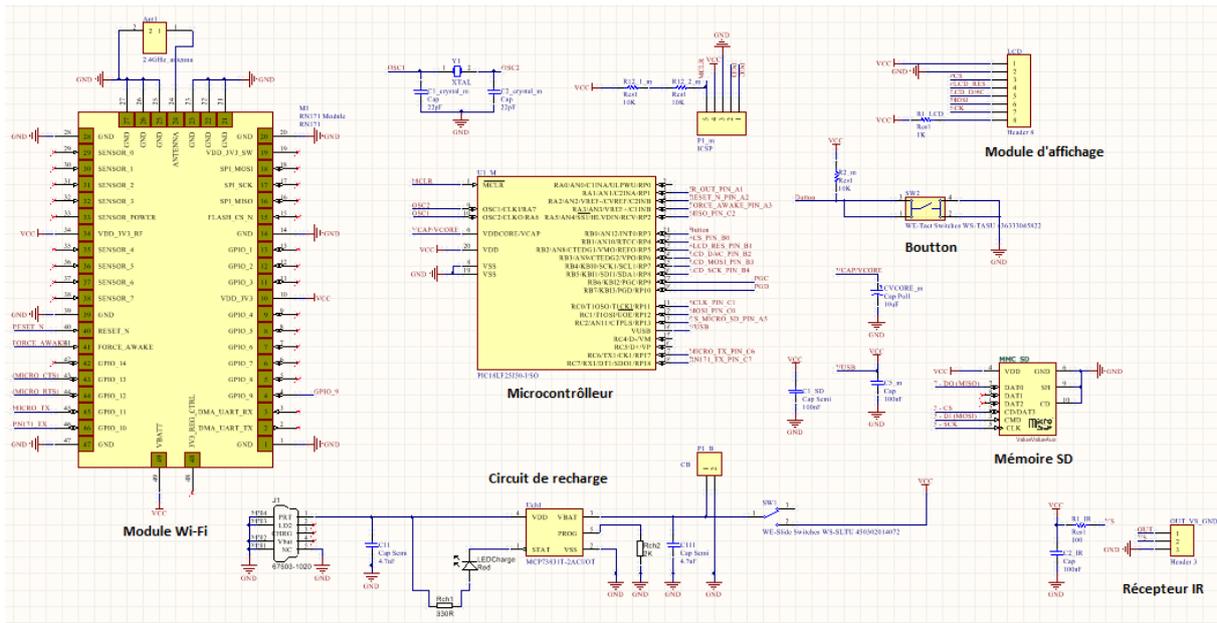


Figure 5.5 : Architecture matérielle du badge intelligent

Dans la partie suivante nous présentons l'algorithme de surveillance de l'exposition personnelle et les protocoles de communication mis en œuvre dans le badge intelligent.

3.2 Algorithme de surveillance de l'exposition personnelle

Cette partie présente l'algorithme du programme intégré dans le badge qui permet de surveiller en temps réel l'exposition personnelle aux polluants atmosphériques. La figure 5.6 donne l'organigramme de l'algorithme développé. Cet algorithme intègre tous les services que nous avons décrits dans la solution logique proposée dans le chapitre 2.

Configuration : Il s'agit de l'étape d'initialisation et de configuration des différents paramètres. Elle consiste à définir les informations sur l'employé qui porte le badge (Nom, prénom, fonction, etc...), l'identifiant, l'adresse IP, la période d'estimation de l'exposition et la période de localisation (β et γ). Durant cette étape, le badge est en mode « point d'accès » ce qui permet de faire son configuration sans fil en utilisant un smartphone ou une tablette ou bien encore de pouvoir configurer le badge à distance via un poste de travail.

Localisation : Cette tâche permet de localiser périodiquement la personne qui porte le badge. La période de localisation γ est définie dans l'étape de configuration.

Lecture des concentrations des polluants : Le programme déclenche la demande de mesures des concentrations des polluants « Concentrations.req » de deux manières :

- Périodique : suite à une interruption interne de l'unité de traitement après un dépassement de temps d'attente β . Cette interruption permet de suivre en temps réel l'exposition personnelle. Ce temps d'attente correspond à la période de mesure prédéfinie dans l'étape de configuration.
- Évènementielle : suite au déplacement de la personne dans un autre microenvironnement. Le changement d'emplacement est détecté à la fin de la tâche de localisation par une comparaison entre « Location.id (t_{n-1}) » et « Location.id (t_n) ».

Estimation de l' E_{TWAi} et détection de dépassement à un seuil d'exposition : A chaque interruption, le programme traite les informations de mesures collectées. En premier lieu, il met à jour l'exposition personnelle moyenne pondérée dans le temps à l'instant t_n pour chaque durée d'exposition $E_{TWAi_\lambda}(t_n, \text{durée d'exposition } \lambda)$. Ces durées d'exposition correspondent aux durées associées aux valeurs guides données par la réglementation et les organismes de surveillance de la qualité d'air. La moyenne glissante, aussi appelé moyenne mobile, a été utilisée pour le calcul de l' $E_{TWAi_\lambda}(t_n)$. C'est un type de moyenne statistique utilisée pour analyser des séries ordonnées de données. Cette moyenne est dite glissante parce qu'elle est recalculée de façon permanente dès la réception d'une nouvelle mesure en venant remplacer la plus ancienne. Ce type de moyenne va nous permettre de suivre en temps réel l'exposition personnelle aux polluants.

Ensuite, le programme compare chaque $E_{TWAi_\lambda}(t_n)$ avec la valeur guide aussi appelée seuil qui correspond à la durée $E_{TWAi_limite_\lambda}$. En cas de dépassement du seuil, le programme envoie un message d'alerte sur l'unité d'affichage.

Historique : A la réception des données (localisation et mesures de concentrations), le programme rajoute au début de chaque donnée la date et l'heure et les sauvegarde dans un fichier dans la mémoire flash du badge. Les $E_{TWAi_\lambda}(t_n)$ sont aussi horodatées, la même date et heure sont ajoutées aux mesures, et stockées dans un second fichier de la mémoire. Cette tâche permet d'avoir un historique sur l'exposition de la personne qui porte le badge. Les messages d'alertes sont également sauvegardés dans la mémoire. Tous ces historiques permettent des analyses ultérieures pour identifier par exemple les postes de travail qui posent des problèmes

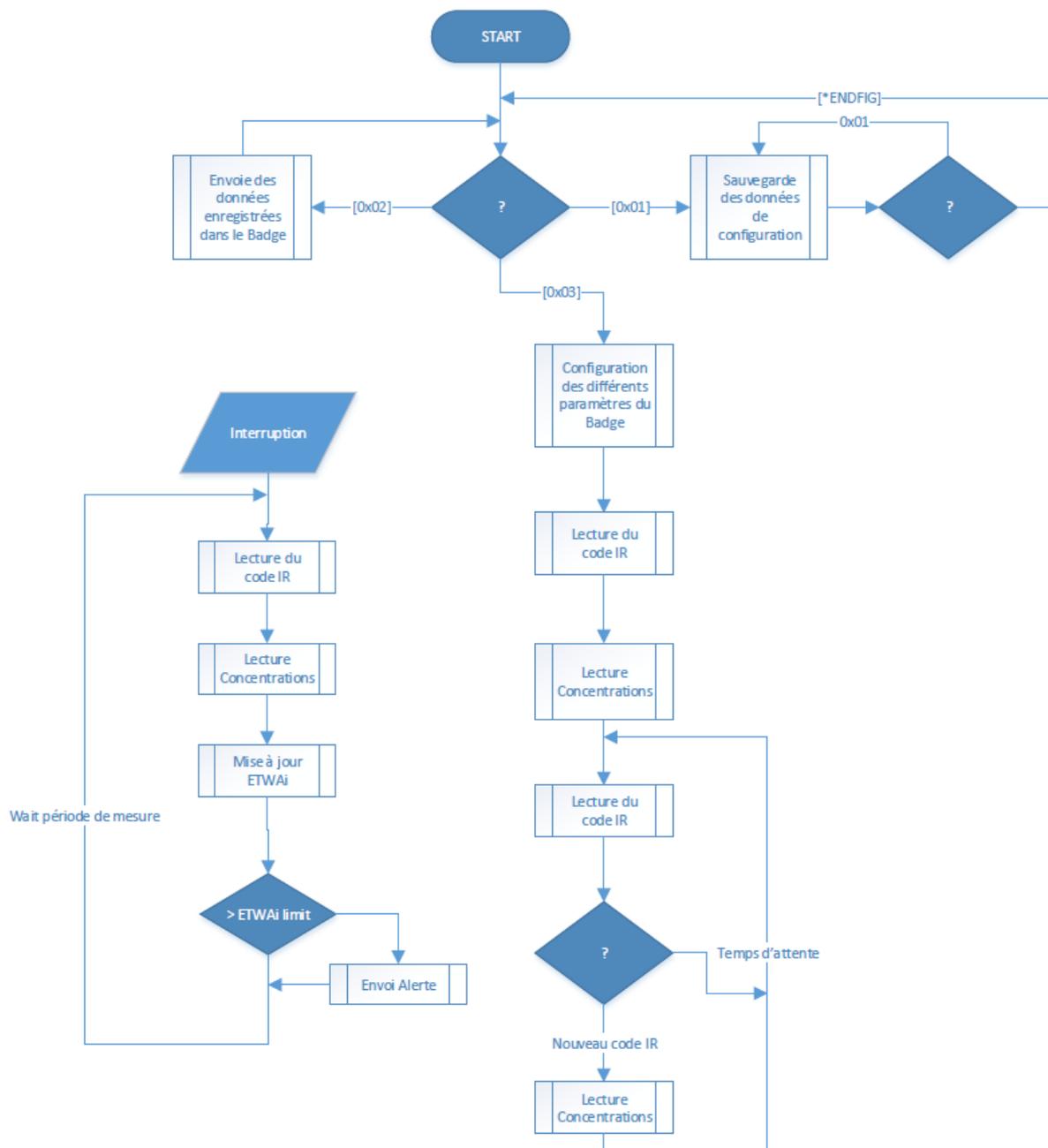


Figure 5.6 : Organigramme de fonctionnement du badge

3.3 Protocole de communication

Nous présentons dans cette partie les différents protocoles de communication permettant au badge d'interagir avec les différents objets du système de surveillance. La communication entre le badge et l'extérieur est basé sur le mode client/serveur, le badge étant le serveur lorsqu'il est en mode AP, le client sinon. Les échanges sont donc de la forme requête-réponse. Les figures 5.7 et figure 5.8 indiquent respectivement les formats des requêtes et des réponses.

| | | | |
|----------|--------------------------------|------|-----|
| Commande | Identificateur de transmetteur | Data | End |
|----------|--------------------------------|------|-----|

Figure 5.7 : Format du message d'une requête

| | | | | |
|--------------------------------|--|-----------------------------|------|-----|
| Identificateur de transmetteur | | Identificateur de récepteur | Data | End |
|--------------------------------|--|-----------------------------|------|-----|

Figure 5.8 : Format du message d'une réponse

Le champ commande dans la requête permet au récepteur de message d'identifier la nature de la demande. Dans notre système, nous avons défini quatre types de commande. Le tableau 5.1 énumère la liste des commandes.

Tableau 5.1: Types de commande dans une requête de demande

| Commande | Opération | Interaction |
|----------|--|------------------------------|
| 0x01 | Message de configuration du badge | Smartphone et badge |
| 0x02 | Lecture du niveau d'exposition personnelle | Smartphone et badge |
| 0x03 | Retour au fonctionnement normal | Smartphone et badge |
| 0x10 | Demande de concentrations des polluants | Badge et nœud multi capteurs |

Ces messages, transmis par l'interface Wi-Fi, permettent de configurer et d'initialiser le badge à partir d'un smartphone et de collecter les données de mesures des nœuds multi-capteurs.

3.3.1 Description du protocole de configuration

Ce protocole permet au superviseur de configurer les différents paramètres (β , γ , λ , nom, prénom, id, etc...) sur le badge en utilisant un terminal sans fil comme un smartphone, une tablette ou un ordinateur équipé d'une interface Wi-Fi. Dans ce cas, le badge doit être en mode point d'accès (mode AP). Dans un premier temps, l'équipement de configuration se connecte au badge. Lorsque la connexion est établie, l'équipement ouvre une connexion TCP. Si un temps d'attente « Time out » est dépassé sans avoir un retour du badge, l'équipement attend un temps aléatoire avant de demander une nouvelle connexion TCP. L'équipement envoie une requête de configuration « Configuration.req ». La réponse envoyée par le badge valide la configuration. Finalement, l'équipement ferme sa connexion TCP. La figure 5.9 donne le format du message de configuration.

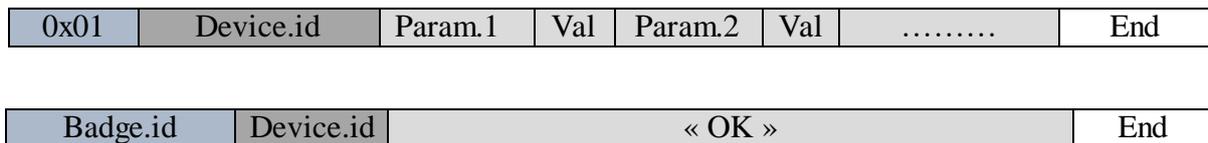


Figure 5.9 : Format de messages "Configuration.req" et "Configuration.resp"

3.3.2 Protocole de lecture du niveau d'exposition personnelle

Ce protocole permet au superviseur de lire le niveau d'exposition personnelle aux polluants atmosphériques. Le principe de fonctionnement est le même que le protocole de configuration. La seule différence est le format des messages « Lecture.req » et « Lecture.resp » qui sont présentés dans la figure 5.10.

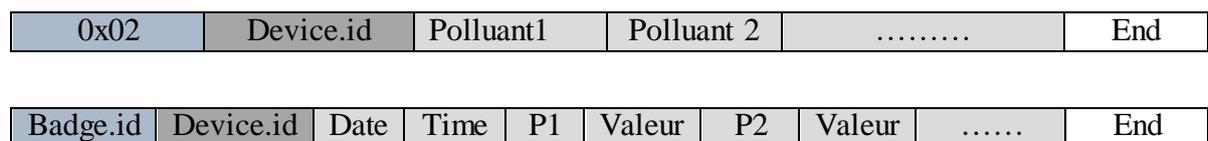


Figure 5.10 : Format des messages "Lecture.req" et "Lecture.resp"

3.3.3 Protocole de lecture des concentrations de polluants

C'est le protocole utilisé par le badge pour récupérer périodiquement (à intervalle β) les concentrations de polluants de l'air intérieur. Ces concentrations sont mesurées par le nœud multi-capteurs placé dans le microenvironnement où se trouve la personne porteuse du badge. Tout d'abord, le badge reçoit un message « location.id » envoyé en permanence par un émetteur IR (balise). Ce qui lui permet d'identifier le SSID du nœud multi-capteurs (dans ce cas les smart badges sont en mode client et les nœuds multi-capteurs sont toujours en mode AP). Ensuite, le badge se connecte au nœud multi-capteurs et envoie la requête par UDP. Contrairement à TCP, UDP est un protocole orienté "non connexion", il est donc moins gourmand en énergie. A la réception d'un message « Concentrations.req », le nœud multi-capteurs renvoie les dernières mesures dans son message de réponse « Concentrations.resp ». Si le badge ne reçoit pas la requête « Concentrations.resp » après un délai d'attente « Time out », il renvoie une requête de demande jusqu'à la réception d'une réponse. La figure 5.11 indique le format des messages « Concentrations.req » et « Concentrations.resp ».

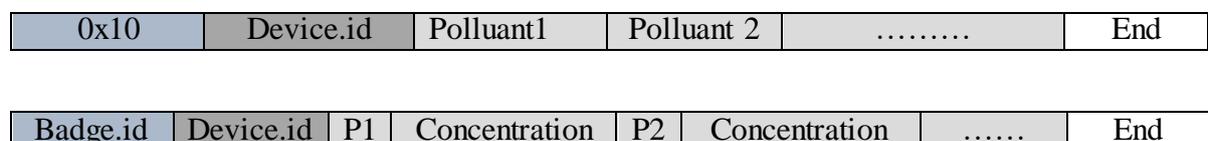


Figure 5.11 : Format de messages "Concentrations.req" et "Concentrations.resp"

Après avoir présenté l'architecture du badge et le principe de fonctionnement de notre prototype, Nous présentons dans la partie suivante la campagne d'expérimentation qui a été menée afin d'évaluer cette solution.

3.4 Expérimentation et évaluation

3.4.1 Conditions expérimentales

Nous avons déployé notre système dans quatre microenvironnements différents. Chaque microenvironnement est équipé d'un nœud multi-capteurs pour mesurer les concentrations de formaldéhyde et de CO₂ dans l'air intérieur. Le tableau 5.2 montre la répartition des équipements. Nous avons surveillé l'exposition personnelle moyenne d'un employé entre le 9 mars 2015 et le 10 mars 2015. Le tableau 5.3 résume la configuration de notre système de surveillance.

Tableau 5.2 : La répartition des équipements

| Microenvironnement | Surface m ² | Commentaires |
|-------------------------|------------------------|------------------------|
| Espace ouvert / couloir | 40 | Bonne aération |
| Bureau 527 | 12 | Mauvaise aération |
| Salle photocopieuse | 6 | Très mauvaise aération |
| Salle de réunion | 25 | Aération moyenne |

Tableau 5.3 : Configuration du système de suivi

| Polluant | λ | E _{TWAi} Limite | β en minute | γ en minute |
|-----------------|------------|--------------------------|-------------------|--------------------|
| Formaldéhyde | 30 minutes | 100 $\mu\text{g.m}^{-3}$ | 10 | 1 |
| Formaldéhyde | 2 heures | 50 $\mu\text{g.m}^{-3}$ | 10 | 1 |
| Formaldéhyde | 8 heures | 33 $\mu\text{g.m}^{-3}$ | 10 | 1 |
| CO ₂ | 30 minutes | 1000 ppm | 10 | 1 |
| CO ₂ | 2 heures | 1100 ppm | 10 | 1 |
| CO ₂ | 8 heures | 1300 ppm | 10 | 1 |

3.4.2 Interprétation des résultats

Lors de cette expérience, les concentrations de formaldéhyde et de CO₂ dans les quatre microenvironnements ont été mesurées toutes les 10 minutes durant 2 jours d'une manière continue. Les figures 5.12 et 5.13 représentent respectivement le niveau de formaldéhyde et de CO₂ dans ces microenvironnements. Le niveau de formaldéhyde varie entre 0.7 et 39.4 $\mu\text{g.m}^{-3}$

et celui de CO₂ varie entre 424 et 1242 ppm. La salle de photocopieuse est toujours le microenvironnement le plus pollué. A noter que la section 4 du chapitre 4 utilise la même procédure de validation.

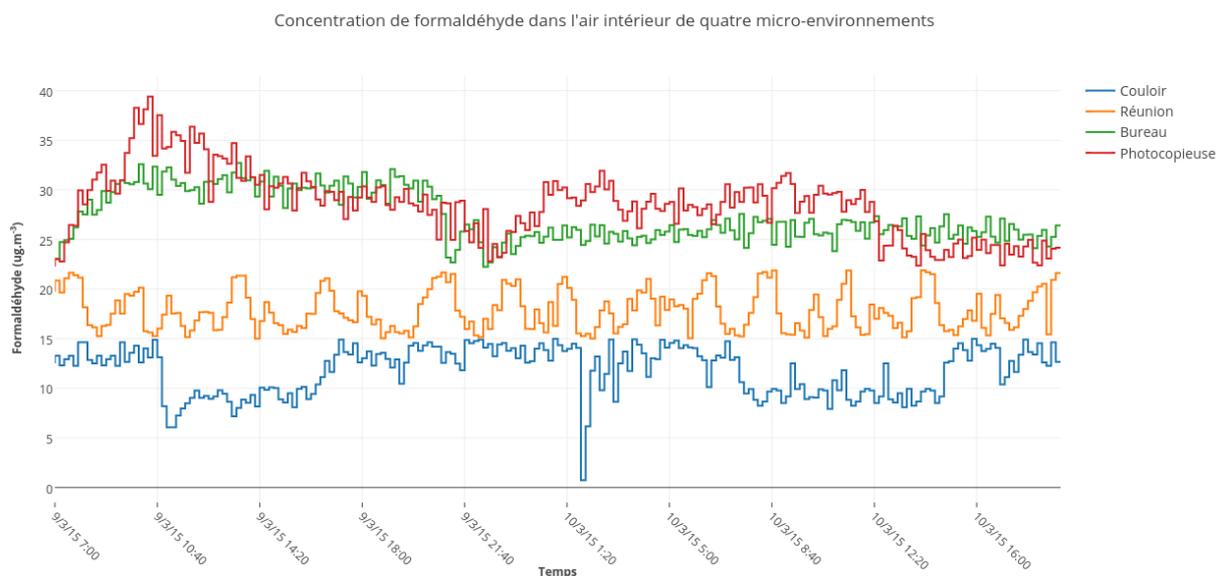


Figure 5.12 : Concentrations de formaldéhyde dans l'air intérieur de quatre microenvironnements

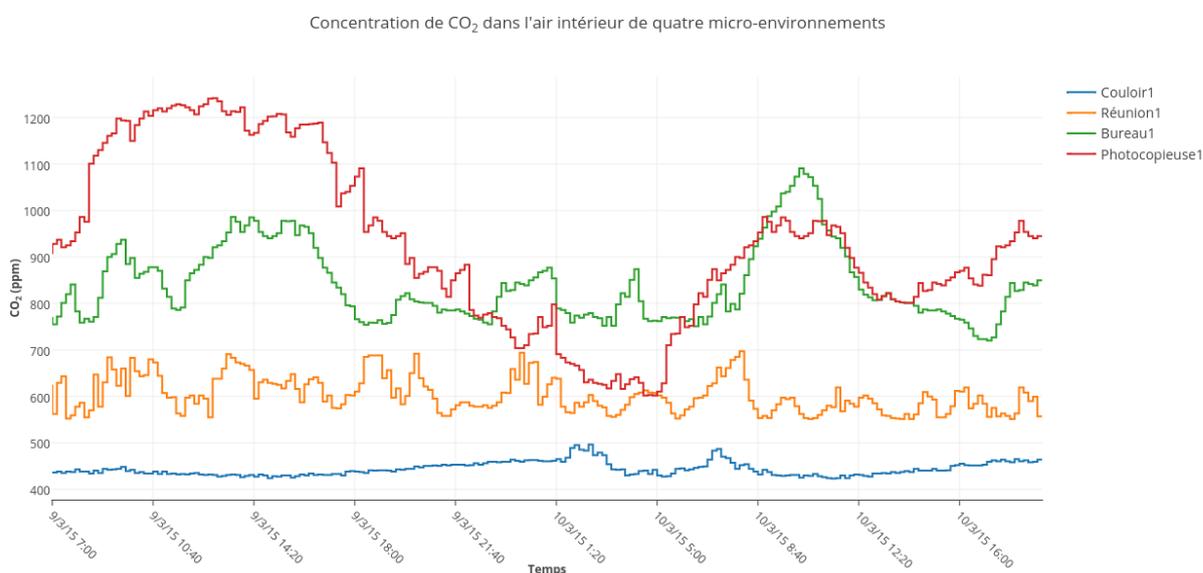


Figure 5.13 : Concentrations de CO₂ dans l'air intérieur de quatre microenvironnements

L'exposition personnelle au formaldéhyde et au CO₂ ont été sauvegardées dans la mémoire flash du badge. Les figures 5.14 et 5.15 présentent respectivement l'exposition personnelle au formaldéhyde et au CO₂. Comme ces figures le montrent, à chaque fois que la personne rentre dans la salle de photocopieuse son niveau d'exposition augmente. Par contre, le niveau d'exposition baisse durant les pauses café et les pauses déjeuner grâce à la bonne aération de l'espace ouvert et du couloir.

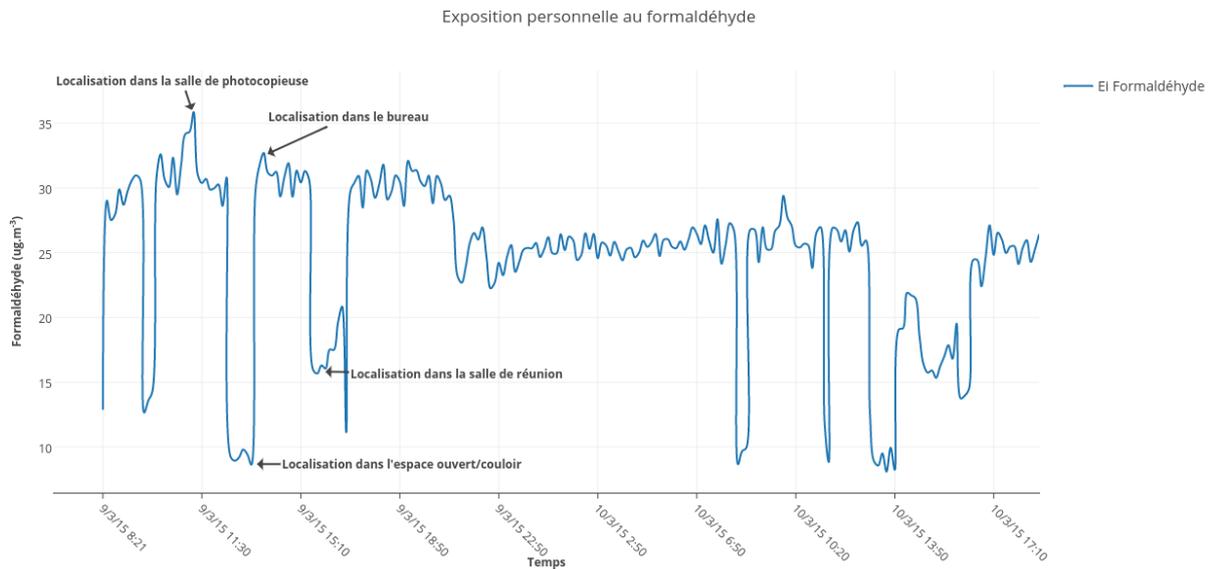


Figure 5.14 : Exposition personnelle au formaldéhyde

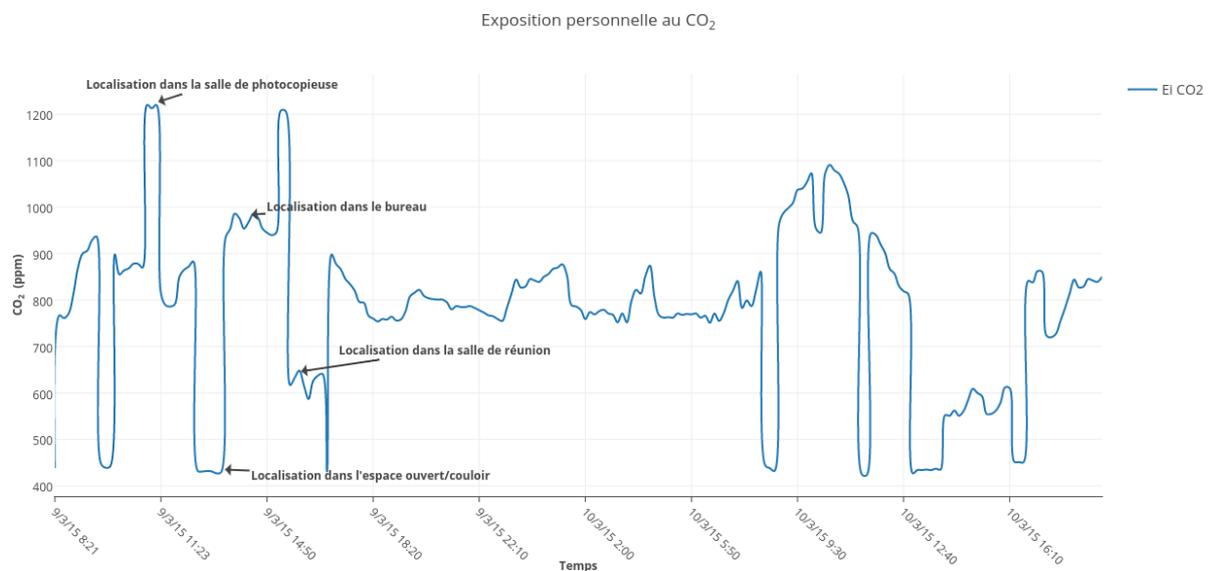


Figure 5.15 : Exposition personnelle au CO₂

4. Contraintes relatives à l'approche par badge intelligent

Comme tout système embarqué, le badge est doté de ressources très limitées en raison de contraintes de miniaturisation et de poids. Cependant l'application requiert des capacités de calcul, de stockage et de transmission de données, donc des composants électroniques qui consomment de l'énergie, c'est-à-dire qui vont avoir un impact sur l'autonomie de la batterie.

La plus importante contrainte à laquelle sont soumis les systèmes communicants sans fil et les systèmes portables concerne l'énergie. Nous allons donc analyser les facteurs qui vont impacter sur la consommation d'énergie.

4.1 Etude sur la consommation d'énergie

4.1.1 Unité d'alimentation : la batterie

Les badges sont alimentés par des batteries. Cette source d'énergie doit présenter une grande capacité avec un poids faible et une taille réduite. Son autodécharge doit être la plus lente possible pour prolonger la durée de vie de notre système. Un modèle de durée de vie d'une batterie a été proposé par [1] :

$$T_{vide} = \frac{E}{P + P_{fuite}} \text{ (heures)}$$

Avec P présente la puissance moyenne consommée.

E correspond à l'énergie totale de la batterie en Wh.

T_{vide} est la durée de vie de la batterie en année.

$$P_{fuite} = \frac{\text{autodécharge} * E}{(24 * 365)}$$

L'autodécharge de la batterie Lithium Ion que nous avons choisi est de l'ordre de 8% par mois. Ce qui donne une durée de vie de deux jours et demi. Ce qui est acceptable par rapport à notre cadre d'utilisation.

A noter que des travaux de recherche ont proposé des systèmes de récupération d'énergie en complément pour recharger et prolonger la durée de vie de la batterie. Ils sont généralement basés sur des sources solaires, vibration, variation de température etc... [2, 3, 4]. Ces solutions pourraient être envisagées dans notre badge.

4.1.2 Unité de traitement : le microcontrôleur

Comme tout circuit numérique, la puissance moyenne dissipée par un microcontrôleur est :

$$P_{moy} \cong P_{dyn} + P_{stat}$$

Avec P_{moy} est la puissance moyenne dissipée par le circuit.

P_{stat} est la puissance statique.

P_{dyn} est la puissance dynamique dissipée. C'est la puissance qui est consommée lorsqu'un traitement est en cours.

$$P_{dyn} = a * C * V_{dd}^2 * f$$

Avec **a** représente le facteur d'activité (passage de 0 à 1).

C est la capacité physique du circuit.

V_{dd} est la tension d'alimentation.

f est la fréquence de fonctionnement.

Généralement, les microcontrôleurs possèdent plusieurs modes de fonctionnement : actif, « idle » et sommeil pour optimiser la consommation de l'énergie. La consommation d'énergie varie d'un mode à un autre. Par exemple pour notre badge, nous avons choisi un microcontrôleur de type PIC18LF avec la technologie XLP (eXtra LowPower). Selon les données du fabricant, il consomme 11.5 mW en mode actif, 3.3 mW en mode « idle » et 0.0066 μ W en mode sommeil [5]. Par conséquent, les niveaux de consommation d'énergie dans chaque mode, le coût de transition entre les différents modes, le temps passé par le microcontrôleur dans chaque mode ont une incidence importante sur la consommation totale d'énergie dans le badge.

4.1.3 Unité de communication : le module Wi-Fi

Il s'agit du module de communication sans fil qui permet au badge de communiquer avec les nœuds multi-capteurs et les smartphones. Il opère dans quatre modes de fonctionnement : émission, réception, actif et sommeil. En général, la consommation en mode actif est presque égale à la consommation en mode réception. Ainsi, il est plus astucieux de mettre le module en mode sommeil que de passer en mode actif pendant des trous de communication. Un autre facteur à prendre en compte est que le passage d'un mode à un autre engendre une dissipation d'énergie plus importante que de laisser le module radio en mode actif surtout quand le module passe du mode sommeil au mode émission. Ceci est dû à la puissance nécessaire pour la mise sous tension [6].

Nous avons choisi le module WIFI RN171 comme unité de communication dans le badge. Il est considéré comme un module « low power » adapté aux systèmes à contraintes énergétiques. Il possède les quatre modes de fonctionnement et il consomme 396 mW en transmission, 132 mW en réception et en mode actif et 13.2 μ W en mode sommeil [7].

Des mesures expérimentales ont montrées que le module de communication sans fil est le composant le plus gourmand en énergie et donc la plupart de l'énergie consommée est relative à la transmission et la réception des données.

4.1.4 Unité de stockage : la mémoire flash

Une mémoire est nécessaire pour stocker les données de localisation, les mesures de concentration de polluants dans l'air afin de calculer en temps réel l'exposition moyenne aux polluants de l'air de la personne qui porte le badge. Cette mémoire doit être capable de

conserver ces données même si le badge est hors-tension. Nous avons choisi d'utiliser une mémoire flash de type microSD qui fournit une capacité de stockage suffisante pour pouvoir conserver l'historique sur plusieurs mois (capacité maximale supportée par le microcontrôleur étant de 1Go, il n'y a donc pas de problème d'intégration de mémoire pour toute capacité inférieure). Une mémoire flash de type microSD permet de faciliter la récupération des données par la suite en utilisant un ordinateur équipé d'un lecteur de carte SD. Malgré leur grand intérêt, les mémoires flash sont des sources de consommation d'énergie assez importante à cause de leur temps d'accès en lecture et en écriture. La consommation moyenne d'une mémoire microSD est de 3.3 mW.

4.2 Conclusion

Au-delà du choix des composants électroniques, l'optimisation de la durée de vie des batteries fait l'objet de nombreux travaux de recherche [8, 9, 10, 11]. Une illustration des contraintes énergétiques et de leur solution, dans les systèmes sans fil est proposée par Anastasie et al. [12] :

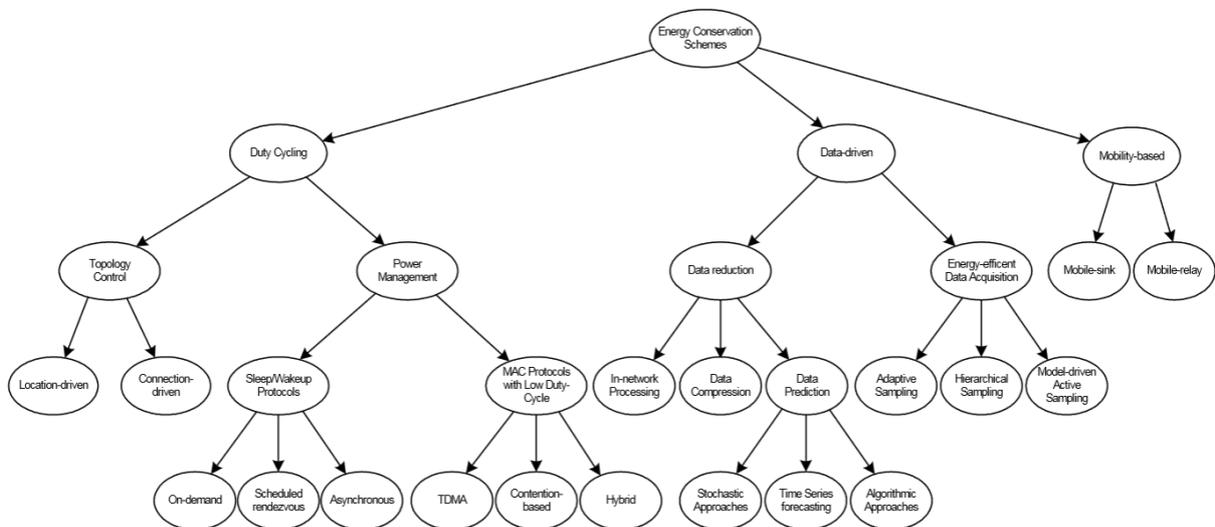


Figure 5.16: Taxinomie des approches de gestion d'énergie dans les systèmes sans fil

Pour optimiser la consommation énergétique, les chercheurs sont intervenus dans tous les niveaux : création de protocoles réseaux spécifiques, routage, protocoles de niveau MAC, organisation de réseau, etc. En général, les techniques d'économie d'énergie peuvent être classées en 3 grandes catégories : les techniques du « Duty-cycling », les techniques orientées donnée et les techniques de mobilité.

Au niveau applicatif dans lequel cette thèse s'inscrit, nous nous orienterons vers une solution basée sur la gestion des modes de fonctionnement du module de communication et de l'unité de traitement (microcontrôleur) afin de réduire les coûts énergétiques du système.

La taille de la mémoire de stockage est généralement limitée dans les systèmes portables. C'est une contrainte de conception aussi importante que la contrainte énergétique. Cependant, la problématique mémoire n'était pas traitée par les chercheurs dans le domaine du réseau de capteur sans fil car en général les nœuds n'ont pas besoin de stocker un très grand nombre de données en permanence. Dans le cadre de cette thèse, nous nous orienterons vers une solution basée sur la méthode EWMA (exponentiel weighted moving average) appelée aussi filtre pour optimiser l'espace de stockage de données et donc par conséquent pour réduire les coûts énergétiques du système. Nous allons étudier dans la section suivante les deux solutions proposées pour réduire la consommation d'énergie du badge en optimisant la mémoire de stockage des données.

5. Optimisation de ressources du badge

5.1. Mécanisme de conservation de l'énergie

Comme nous l'avons indiqué dans la section précédente, le module de communication et l'unité de traitement sont les composants du système qui consomment le plus d'énergie. Ces deux composants intègrent deux modes de fonctionnement. Chaque mode présente une consommation d'énergie plus ou moins importante. Il est donc préférable de mettre ces deux composants en mode « low-power » le plus longtemps possible pour réduire leur consommation tout en répondant aux exigences et contraintes fonctionnelles du système. L'objectif est alors d'avoir des périodes d'endormissement T_{sommeil} très grandes par rapport à la durée d'activité T_{actif} . La première étape de notre étude consiste donc à étudier le système de suivi de l'exposition personnel et précisément les besoins du badge en termes de communication et traitement de données.

En mode de fonctionnement normal, le badge a besoin de communiquer avec le module Wi-Fi dans les cas suivants :

- Périodiquement (β) pour récupérer les nouvelles mesures de concentration des polluants
- Suite à la détection d'un changement de micro environnement, les badges récupèrent les dernières mesures de concentration.

Hormis ces deux cas, le badge n'a pas besoin de communiquer avec l'extérieur via le module Wi-Fi et il peut alors être mis en mode sommeil « low-power ».

L'unité de traitement (microcontrôleur) est le composant principal du badge. Il commande l'ensemble des différents composants sur la carte à savoir le module Wi-Fi, la mémoire, le récepteur IR, etc.... Ainsi, il doit rester en mode actif la plupart du temps pour assurer la coordination de l'ensemble des fonctions. Néanmoins, en analysant la séquence de traitement du microcontrôleur, nous pouvons identifier des périodes de sommeil. En effet, après la réception de nouvelles mesures, le microcontrôleur met à jour les $E_{TWAi,\lambda}$ pour chaque durée d'exposition, les compare avec les valeurs seuils, affiche les alertes en cas de dépassement et enregistre à la fin ces mesures dans la mémoire flash. Après cette phase de traitement, le badge doit surveiller périodiquement (γ) son emplacement afin de détecter si la personne a changé de microenvironnement. Entre ces périodes (γ), le smart badge n'a pas besoin de traitement spécifique et l'unité de traitement peut passer en mode sommeil.

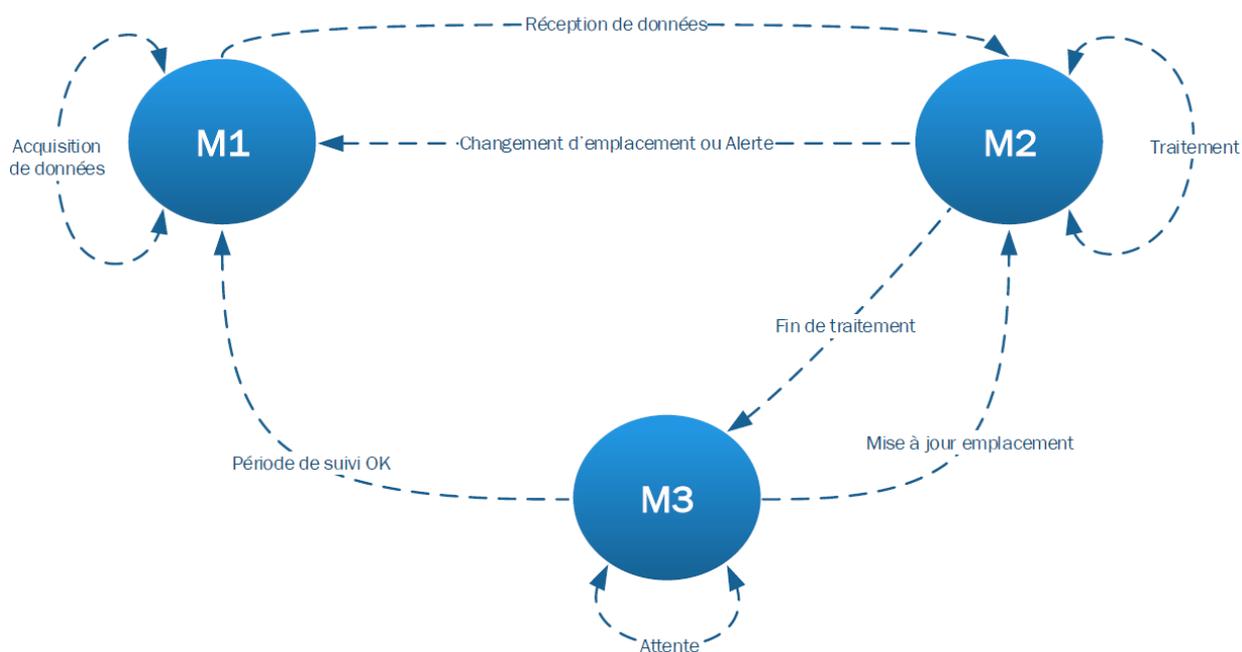


Figure 5.17 : Machine d'états des modes de fonctionnement du badge

Après une analyse fonctionnelle nous avons tiré 3 modes de fonctionnement ; illustrés dans la figure 5.17 et les tableaux 5.4 et 5.5 :

- Le mode tout actif (M1) : dans ce mode le module RN171 et le microcontrôleur sont en état actif pour la demande des mesures de concentration de polluants.
- Le mode sommeil actif (M2) : dès la réception des données, le microcontrôleur met le module RN171 en mode sommeil et continue les traitements nécessaires.

- Le mode tout sommeil (M3) : à la fin de traitement le microcontrôleur entre à son tour en mode sommeil jusqu'à la prochaine mise à jour de l'emplacement.

Tableau 5.4 : Les modes de fonctionnement du badge

| Mode de fonctionnement | Module RN171 | Le microcontrôleur |
|------------------------|--------------|--------------------|
| M1 | ACTIF | ACTIF |
| M2 | SOMMEIL | ACTIF |
| M3 | SOMMEIL | SOMMEIL |

Tableau 5.5 : Les transitions entre les modes de fonctionnement du badge

| Transition | Commentaire |
|------------|--|
| M1 → M2 | Suite à la réception des concentrations de polluants |
| M2 → M3 | Après le traitement des données reçues ou après une mise à jour des microenvironnements |
| M3 → M2 | Après une durée d'attente (γ) le badge demande une mise à jour des microenvironnements |
| M2 → M1 | Demande de mise à jour des concentrations après une détection de changement de microenvironnement. |
| M3 → M1 | A la fin du temps d'attente qui correspond à la période d'estimation (β) |

En cas de changement d'emplacement, les badges passent en mode M1 pour demander les dernières mesures de concentrations des polluants. Périodiquement, le badge passe du mode M3 au mode M1 pour mettre à jour l'exposition moyenne des personnes. La figure 5.18 montre l'insertion du mode sommeil dans l'organigramme de fonctionnement du badge.

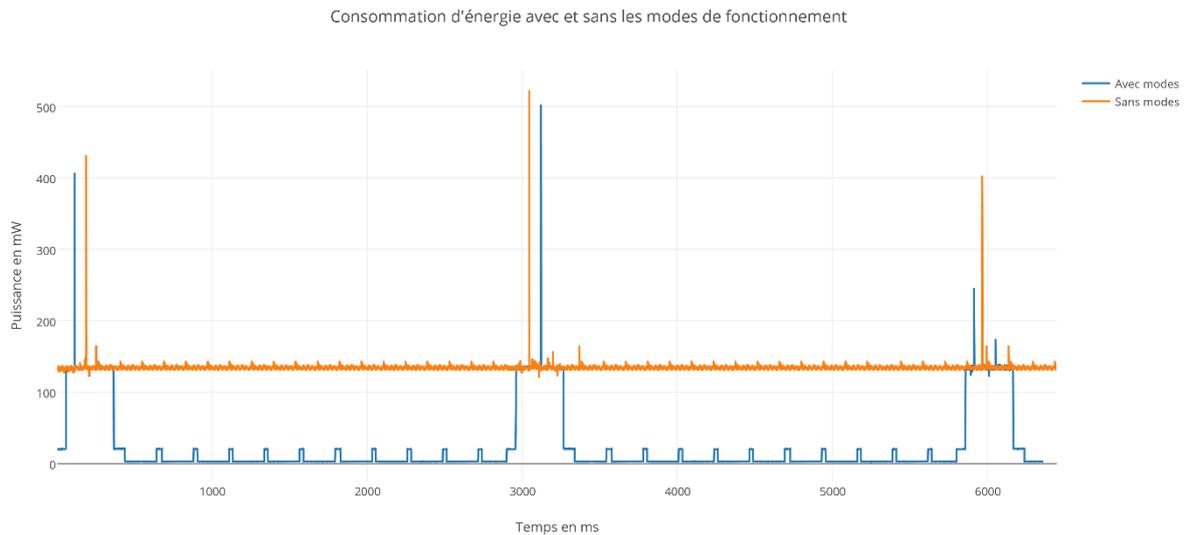


Figure 5.19 : Consommation d'énergie en intégrant ou non le mode sommeil

Le tableau 5.6 montre l'efficacité énergétique de cette approche en estimant la durée de vie de la batterie selon sa puissance (2000 mAh, 6000 mAh et 8000 mAh).

Tableau 5.6 : Estimation de la durée de vie de batterie

| Energie Batterie (mAh) | 2000 | 6000 | 8000 |
|--|-------------|------------|-------------|
| $P_{\text{moy}} \text{ sans modes (mW)}$ | 134.22 | 134.22 | 134.22 |
| $P_{\text{moy}} \text{ avec modes (mW)}$ | 26.13 | 26.13 | 26.13 |
| Durée de vie sans ajout des modes | 2.25 jours | 6.56 jours | 8.61 jours |
| Durée de vie en intégrant les modes | 10.87 jours | 28.2 jours | 35.22 jours |

5.2. Mécanisme d'optimisation mémoire

La plus importante tâche implantée dans les badges est le calcul de l'exposition $E_{TW_{Ai}_\lambda}$ pour chaque polluant. La méthode de moyenne mobile arithmétique est généralement utilisée dans le calcul de $E_{TW_{Ai}}$. D'une façon générale $E_{TW_{Ai}}$ s'écrit :

$$E_{TW_{Ai}}(t) = \frac{\sum_{n=1}^k C_i(t_n) * T_i}{\lambda}$$

Avec k qui est le nombre de C_i (concentration individuelle) à prendre en compte dans le calcul de $E_{TW_{Ai}_\lambda}$. Ce nombre dépend des déplacements de la personne entre les microenvironnements sur une durée λ .

Pour simplifier cette expression, nous supposons que les périodes de mise à jour des emplacements et E_{TWAi} sont confondues ($\gamma = \beta$) et par conséquent nous avons $k = N$. Dans ce cas l'expression de E_{TWAi} s'écrit :

$$E_{TWAi}(t) = \frac{C_t + C_{t-1} + \dots + C_{t-N+1}}{N} = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} C_{t-j}$$

$$E_{TWAi}(t) = E_{TWAi}(t-1) + \frac{C_t - C_{t-N}}{N}$$

Avec N qui est le nombre de mesures de concentrations à prendre en compte

$$N = \frac{\lambda}{\beta}$$

L'utilisation de ce type de moyenne statistique demande de stocker tout l'historique des mesures de concentrations de polluants obligeant d'intégrer une mémoire de grande taille pour sauvegarder toutes les mesures... La moyenne mobile arithmétique pour calculer E_{TWAi} est donc une méthode peu efficace en termes de mémoire et de traitements et donc en terme de consommation d'énergie. Nous proposons d'utiliser la méthode de moyenne mobile à pondération exponentielle (EWMA) pour réduire les besoins d'utilisation de la mémoire.

La moyenne mobile à pondération exponentielle est une méthode d'estimation de la moyenne mobile basée sur une formule de récurrence généralement utilisée pour estimer des risques dans le secteur financier [14] ou encore pour estimer la qualité des services (QoS) dans les réseaux [15]. Cette méthode permet de mettre à jour, très simplement, E_{TWAi} à chaque nouvelle acquisition d'une mesure de concentration de polluant.

$$E_{TWAi}(t) = (1 - \alpha_\lambda) * E_{TWAi}(t-1) + \alpha_\lambda * C_t$$

Ainsi, connaissant E_{TWAi} à l'instant $t-1$, on peut calculer E_{TWAi} dès qu'une nouvelle mesure de concentration C_t est reçue sans avoir besoin de connaître toute l'historique des mesures. La simplicité du calcul par récurrence et l'efficacité mémoire sont les avantages d'EWMA sur la méthode de moyenne mobile arithmétique.

Cependant, l'application de la méthode EWMA n'est pas sans problème. En effet, le réglage de la valeur de la constante de lissage α_λ doit être étudié en fonction de notre application et des résultats que nous souhaitons obtenir. Si α_λ tend vers 0 les anciennes mesures seront favorisées et la moyenne sera plus stable. En revanche, si α_λ tend vers 1 la nouvelle mesure sera favorisée

et la moyenne sera plus agile, c'est-à-dire qu'elle détectera rapidement des changements brutaux.

Dans les conditions normales, la variation de concentration du polluant n'est pas rapide si la période de mesure est petite (de l'ordre d'une dizaine de minutes). Dans ce cas, l'historique doit représenter entre 70% et 90% de la moyenne mobile. En se basant sur les recommandations données dans la littérature [16], l'historique des mesures doit représenter 86% de la moyenne mobile et nous obtenons :

$$E_{TWAI}(t) = (1 - \alpha_\lambda) * E_{TWAI}(t - 1) + \alpha_\lambda * C_t$$

$$E_{TWAI}(t) = (1 - \alpha_\lambda)^2 * E_{TWAI}(t - 2) + \alpha_\lambda * (1 - \alpha_\lambda) * C_{t-1} + \alpha_\lambda * C_t$$

$$E_{TWAI}(t) = (1 - \alpha_\lambda)^N * C_{t-N} + \alpha_\lambda * [C_t + (1 - \alpha_\lambda) * C_{t-1} + \dots + (1 - \alpha_\lambda)^{N-1} * C_{t-N+1}]$$

$$\text{Donc } (1 - \alpha_\lambda)^N = (1 - 0.86)$$

$$\alpha_\lambda = 1 - (1 - 0.86)^{\frac{1}{N}}$$

6. Expérimentation et évaluation

6.1. Conditions expérimentales

L'objectif de cette expérimentation est de suivre en continu et en temps réel l'exposition personnelle au formaldéhyde et CO₂ dans l'air intérieur tout en étudiant l'efficacité énergétique et de la taille mémoire. Deux approches sont considérées :

-Approche A : Utilisation d'une mémoire intégrée dans le badge pour sauvegarder les données de localisation et l'historique des concentrations de formaldéhyde et de CO₂ nécessaires pour l'estimation d' E_{TWAI} .

-Approche B : Utilisation de la méthode EWMA pour estimer l' E_{TWAI} sans avoir besoin de sauvegarder l'historique des concentrations de formaldéhyde et de CO₂.

Pour cela, nous avons déployé notre système dans les locaux du département ISET (Ingénierie des Systèmes Eco-Techniques complexes) au 5^{ème} étage et nous avons surveillé l'exposition personnelle entre le 11 mai 2015 et le 16 mai 2015.

Tableau 5.7 : Configuration du système et conditions expérimentales

| Polluant | Λ | E_{TWAi} Limite | β en minutes | N | α_λ |
|-----------------|------------|--------------------------|--------------------|----|------------------|
| Formaldéhyde | 30 minutes | 100 $\mu\text{g.m}^{-3}$ | 10 | 3 | 0.48075059 |
| Formaldéhyde | 2 heures | 50 $\mu\text{g.m}^{-3}$ | 10 | 12 | 0.15112449 |
| Formaldéhyde | 8 heures | 33 $\mu\text{g.m}^{-3}$ | 10 | 48 | 0.04013313 |
| CO ₂ | 30 minutes | 1000 ppm | 5 | 6 | 0.27941037 |
| CO ₂ | 2 heures | 1100 ppm | 5 | 24 | 0.07865559 |
| CO ₂ | 8 heures | 1300 ppm | 5 | 96 | 0.02027204 |

6.2 Résultats en termes de précision de l'estimation

Lors de cette expérience, les mesures des concentrations de formaldéhyde et de CO₂ dans l'air intérieur sont relevées toutes les 10 minutes pour le formaldéhyde et toutes les 5 minutes pour le CO₂. Les figures 5.20-5.25 présentent les comparaisons entre les deux méthodes d'estimation d' E_{TWAi} respectivement pour le formaldéhyde et pour le CO₂ avec λ à 30 minutes, 2 heures et 8 heures. Les courbes en trait continu représentent les calculs d' E_{TWAi} par la méthode de moyenne mobile arithmétique MMA et les courbes en trait interrompu représentent les calculs utilisant la méthode EWMA.

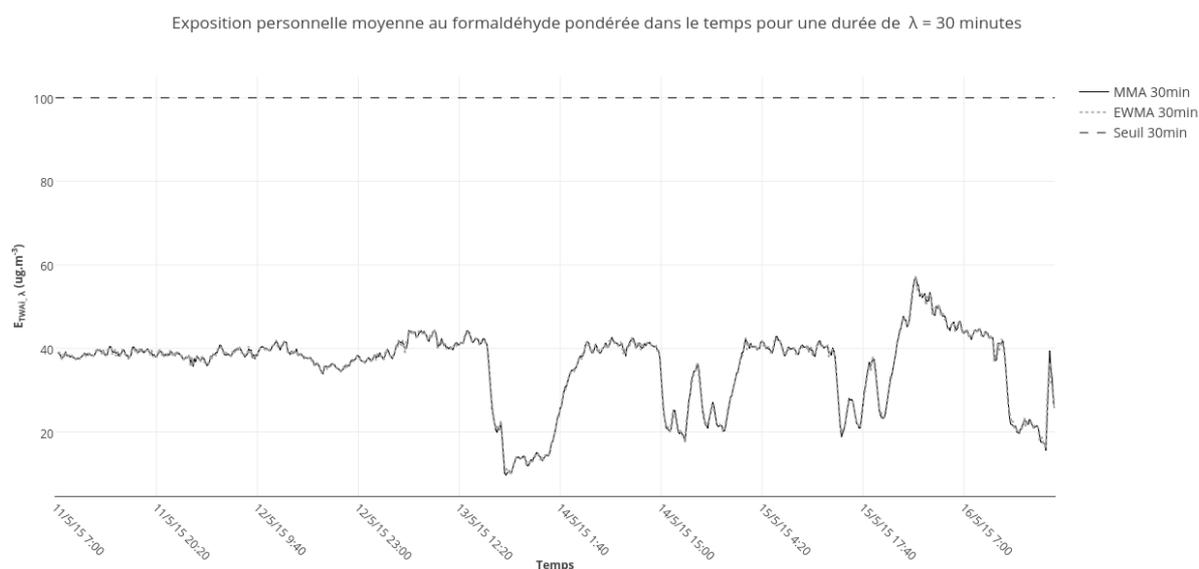


Figure 5.20 : Comparaison entre les méthodes MMA et EWMA pour le calcul de E_{TWAi} sur le formaldéhyde avec $\lambda = 30$ minutes

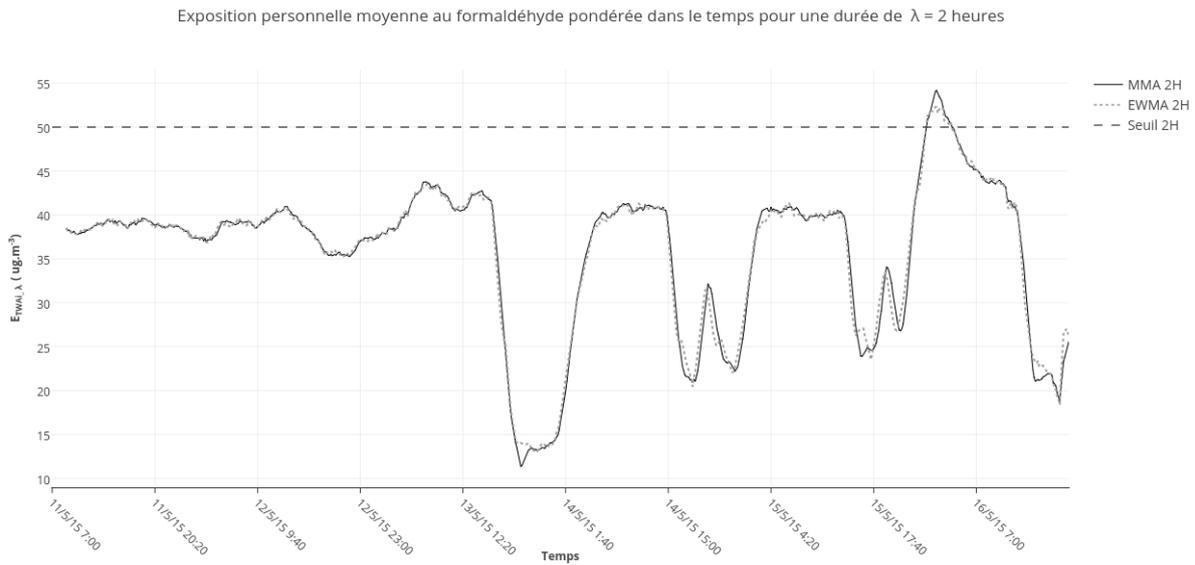


Figure 5.21 : Comparaison entre les méthodes MMA et EWMA pour le calcul de E_{TWAi} sur le formaldéhyde avec $\lambda = 2$ heures

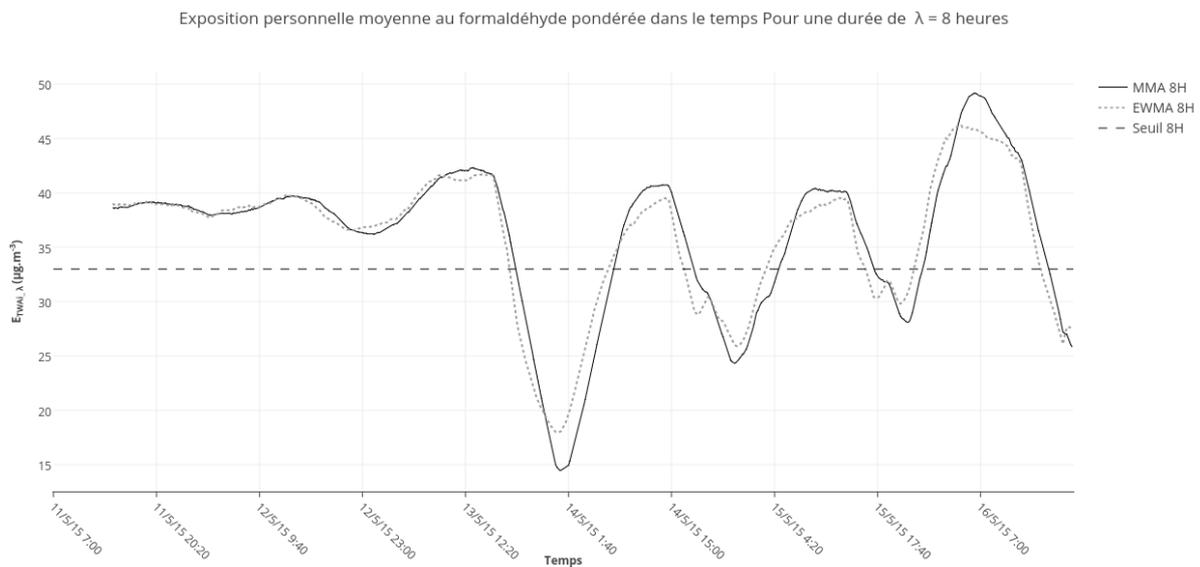


Figure 5.22 : Comparaison entre les méthodes MMA et EWMA pour le calcul de E_{TWAi} sur le formaldéhyde avec $\lambda = 8$ heures

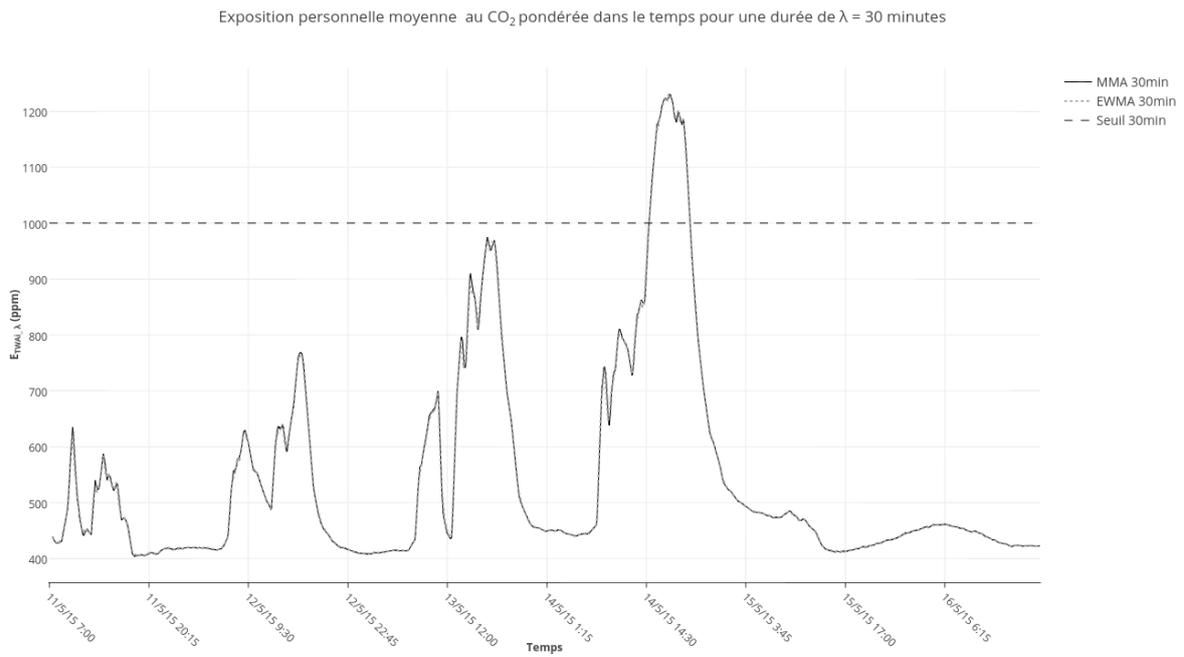


Figure 5.23 : Comparaison entre les méthodes MMA et EWMA pour le calcul de E_{TWAi} sur le CO₂ avec $\lambda = 30$ minutes

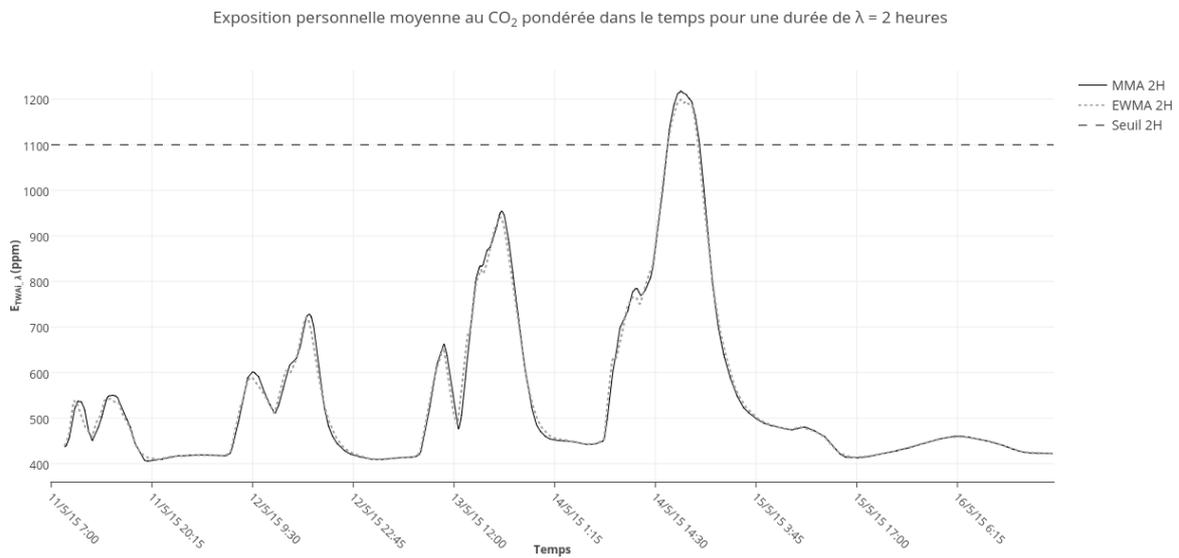


Figure 5.24 : Comparaison entre les méthodes MMA et EWMA pour le calcul de E_{TWAi} sur le CO₂ avec $\lambda = 2$ heures

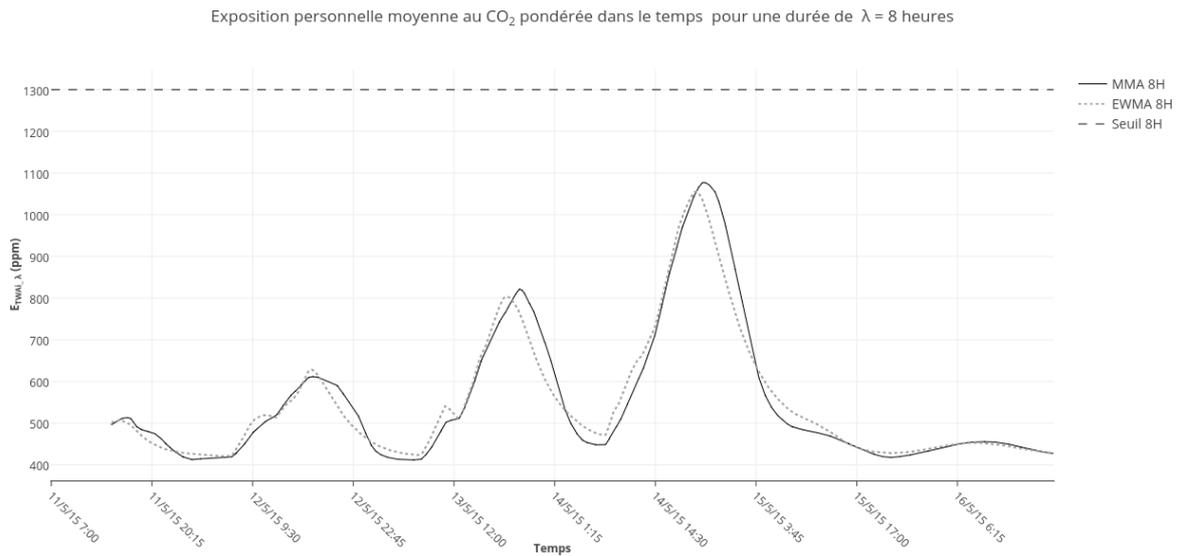


Figure 5.25 : Comparaison entre les méthodes MMA et EWMA pour pour le calcul de E_{TWAi} sur le CO₂ avec $\lambda = 8$ heures

Comme ces figures le montrent, les deux méthodes permettent de détecter les dépassements de seuil dans tous les cas. En contrepartie, nous pouvons observer une légère différence entre les E_{TWAi} des deux méthodes dans les pics et les creux pour les λ de 2 heures et 8 heures. Cet écart est dû au choix du paramètre α_λ qui privilégie la stabilité dans la méthode EWMA. Néanmoins, cette différence de quelques $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ou de quelques ppm reste acceptable puisque tous les dépassements de seuils sont détectés.

6.3 Résultats en termes de coût d'énergie et de la mémoire

L'objectif de cette étude est de comparer la consommation d'énergie et le besoin en mémoire des deux approches. Nous avons implanté dans les deux cas le même organigramme de fonctionnement décrit dans la section 5.1 en se basant sur la solution des modes de fonctionnement pour conserver la consommation d'énergie. Les figures 5.26, 5.27 présentent respectivement la consommation d'énergie pour trois estimations successives des E_{TWAi} pour 30 minutes, 2 heures et 8 heures et cela pour les deux approches avec et sans filtre EWMA.

La figure 5.28 est une comparaison de la consommation d'énergie pour deux calculs consécutifs d' E_{TWAi} . Cette comparaison montre que l'approche avec filtre en utilisant la méthode EWMA pour l'estimation d' E_{TWAi} est la plus économe en énergie. Dans l'approche A, le badge passe plus de temps dans le calcul d' E_{TWAi} à cause des accès multiples à la mémoire externe.

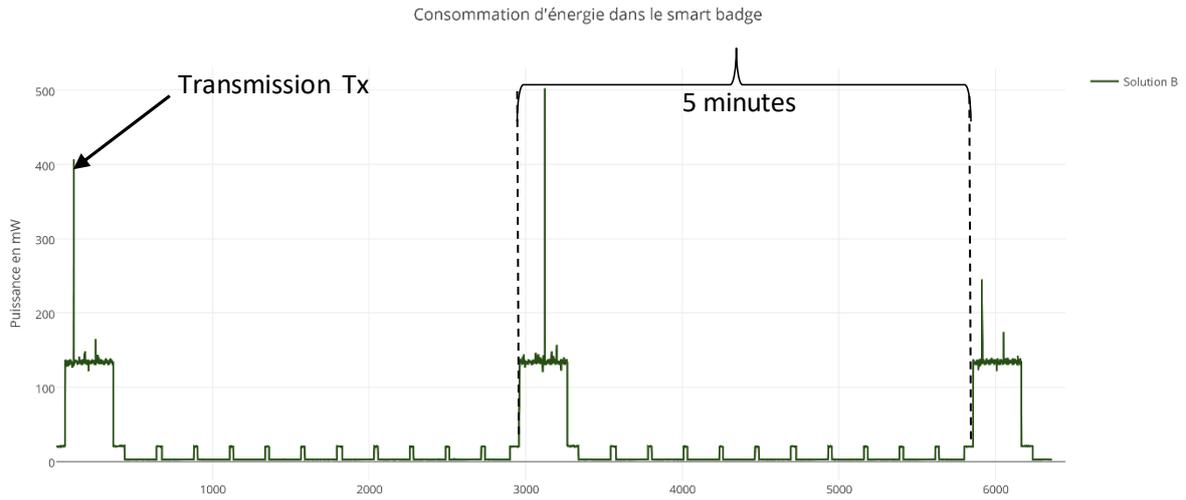


Figure 5.26 : Consommation d'énergie du badge : Approche A

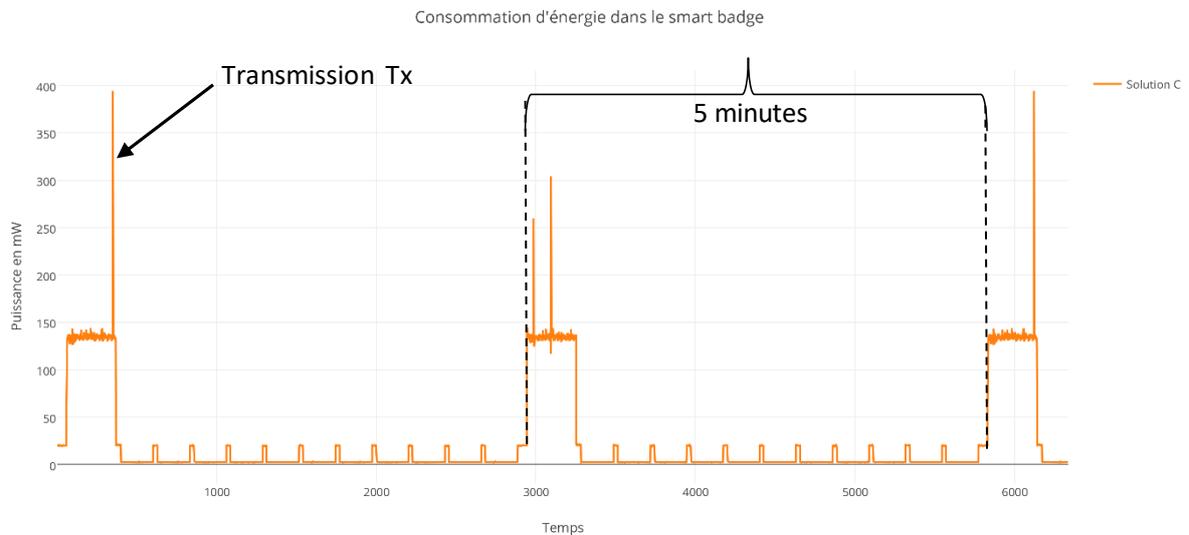


Figure 5.27 : Consommation d'énergie du badge : Approche B

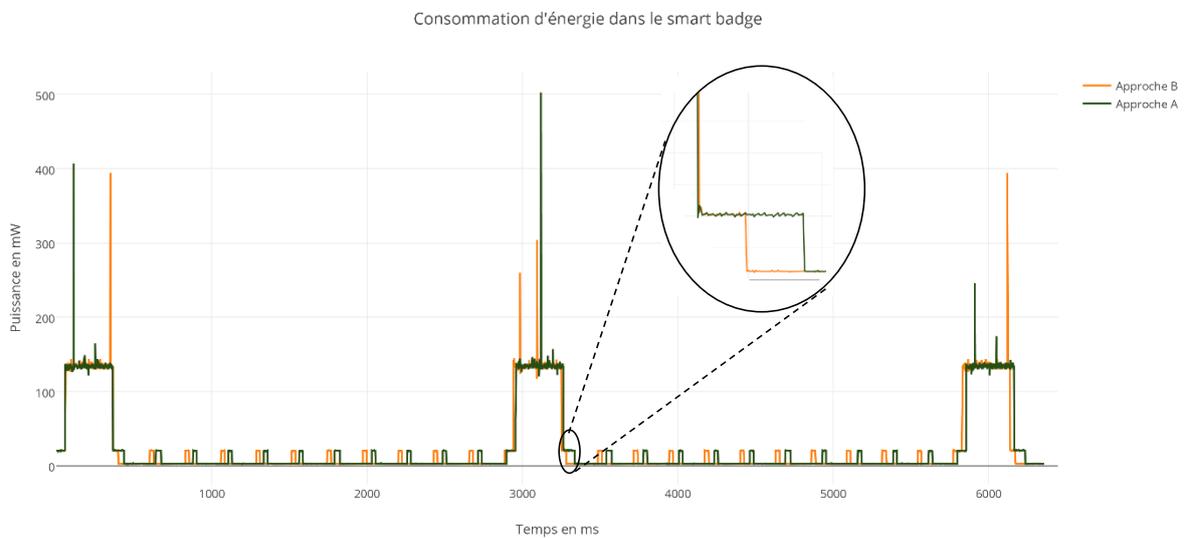


Figure 5.28 : Comparaison de la consommation d'énergie dans le badge

Dans la première approche, l'estimation de la taille mémoire externe nécessaire pour sauvegarder les concentrations des polluants et l'historique de localisation de la personne est donnée par la formule suivante :

$$Taille\ mémoire = 4 * \left(\sum_{i=1}^{nb_{polluants}} \frac{durée\ de\ surveillance}{\beta(i)} + \frac{durée\ de\ surveillance}{\min\{\beta\}} \right)$$

Le calcul d' E_{TWAi} avec la moyenne arithmétique mobile nécessite deux additions (Addition, soustraction) une division et une lecture et une écriture mémoire. Pour comparer le temps de calcul entre les deux méthodes d'estimation de l' E_{TWAi} , nous utilisons les données liées à notre microcontrôleur :

Addition = 1 Cycle, Division = 18 Cycles, Multiplication = 1 Cycle, Lecture mémoire = 5 Cycles, Ecriture mémoire = 37 Cycles.

$$Temp_{Calcul}(Cycles) = \sum_{i=1}^{nb_{polluants}} \left(\frac{durée\ de\ surveillance}{\beta(i)} \right) * 62 \quad \text{"approche A"}$$

$$Temp_{Calcul}(Cycles) = \sum_{i=1}^{nb_{polluants}} \left(\frac{durée\ de\ surveillance}{\beta(i)} \right) * 3 \quad \text{"approche B"}$$

Tableau 5.5 : Efficacité énergétique et mémoire des approches proposées

| Approches | Moyenne arithmétique mobile | Les filtres : EWMA |
|---------------------------------------|-----------------------------|--------------------|
| Puissance moyenne (mW) | 26.13 | 24.1 |
| Durée de vie batterie 2000mAh (Jours) | 10.87 | 11.71 |
| Durée de vie batterie 6000mAh (Jours) | 28.2 | 30.07 |
| Durée de vie batterie 8000mAh (Jours) | 35.22 | 37.48 |
| Taille mémoire (Ko) | 12.1 | 0 |
| Temps de calcul (Cycles) | 160 704 | 7 776 |

Comme le montre le tableau 5.8 l'approche EWMA est plus efficace en termes d'énergie, en mémoire et en temps de calcul. La méthode EWMA permet de gagner deux jours d'autonomie de plus que la moyenne arithmétique mobile. L'utilisation de la méthode EWMA permet de calculer E_{TWAi} sans avoir besoin de connaître l'historique des mesures de concentrations des polluants ni l'historique de la localisation. Par conséquent, il n'est plus nécessaire d'avoir une mémoire externe sur le badge ce qui permet d'avoir un composant en moins sur le badge impliquant ainsi des réductions de coûts, de place et de consommation

d'énergie. Mais cette solution ne répond pas à toutes les exigences du système. Comme les données de localisation ne sont pas sauvegardés sur le badge ni sur les nœuds multi capteurs, l'analyse approfondie en « off line » de l'exposition personnelle n'est pas possible. Nous proposons dans ce cas de rajouter une mémoire de petite taille (une dizaine de Mo) de type EEPROM (faible consommation d'énergie : 450 uA) intégrée dans le badge intelligent et qui permet de sauvegarder les données (localisation et mesure) pour les utiliser dans les analyses en « off line ». Le gain en énergie que nous avons constaté grâce à l'utilisation de la méthode EWMA reste toujours vrai comme il n y a pas besoin de faire des lectures ou écriture dans la mémoire pour estimer l'exposition personnelle.

7. Conclusion

Nous avons décrit dans ce chapitre notre deuxième solution technique, basée sur une approche distribuée en développant un t badge intelligent pour la surveillance en temps réel de l'exposition des personnes aux polluants de l'air intérieur dans un milieu professionnel. Comme tout système portable miniaturisé, le badge présente des contraintes de conception liées aux ressources limitées à savoir l'énergie, la mémoire et la capacité de calcul. Tout d'abord, nous avons étudié l'impact des unités électroniques composant le badge sur la consommation d'énergie et les solutions proposées dans la littérature pour optimiser l'énergie et la mémoire. Suite à cette étude et après une analyse de notre application, nous avons identifié des phases de sommeil qui permettent d'économiser de l'énergie. Ensuite, nous avons étudié deux solutions de calcul du taux d'exposition : l'un reposant sur une moyenne de tout l'historique et le second s'appuyant sur une moyenne mobile à pondération exponentielle. Cette dernière permet de supprimer l'implantation d'une mémoire dans le badge et réduit la complexité du calcul, ce qui entraîne une économie d'énergie. Cependant le calcul des E_{TWAi} par la méthode EWMA sont des estimations et non pas des valeurs exactes. Cet écart se manifeste sur les longues durées (2 heures et 8 heures) et dans les pics et les creux de la moyenne. L'écart entre E_{TWAi} exacte et celle estimée par la méthode EWMA reste toujours de quelques $\mu\text{g.m}^{-3}$ ou de quelques ppm, ce qui est acceptable dans le cadre de notre application. En effet, nous avons montré que le dépassement des seuils est toujours détecté.

Bibliographie

- [1] A. El-Hoiydi. Spatial TDMA and CSMA with Preamble Sampling for Low Power Ad hoc Wireless Sensor Networks. *In Proceedings of the 7th International Symposium on Computers and Communications, 2002*; ISCC, pages 685–692
- [2] Seah, W.K.G.; Zhi Ang Eu; Tan, H. Wireless sensor networks powered by ambient energy harvesting (WSN-HEAP) - Survey and challenges, *in Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology, 2009*. Wireless VITAE 2009. 1st International Conference on , vol., no., pp.1-5, 17-20
- [3] Brunelli, Davide; Passerone, Roberto; Rizzon, Luca; Rossi, Maurizio; Sartori, Davide. Self-Powered WSN for Distributed Data Center Monitoring. *Sensors 16*, 2016; no. 1: 57.
- [4] Faisal Karim Shaikh, Sherali Zeadally, Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016*, Volume 55, , Pages 1041-1054,
- [5] Microchip <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41412F.pdf> [En ligne Octobre 2015]
- [6] Raghunathan, V. Schurgers, C. Sung Park and Srivastava, M.B. Energy-aware wireless microsensor networks. *in Signal Processing Magazine, IEEE , 2002*; vol.19, no.2, pp.40-51
- [7] Microchip <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70005171A.pdf> [En ligne Octobre 2015]
- [8] Lin, E.-Y.A. Rabaey, J.M. Wolisz, A. Power-efficient rendez-vous schemes for dense wireless sensor networks. *IEEE International Conference in Communications, 2004* ; vol.7, no., pp.3769-3776 Vol.7
- [9] Qing Ling, Zhi Tian, Yuejun Yin, Yue Li. Localized Structural Health Monitoring Using Energy-Efficient Wireless Sensor Networks. *in Sensors Journal, IEEE , 2009*; vol.9, no.11, pp.1596-1604,
- [10] Tifenn Rault, Abdelmadjid Bouabdallah, Yacine Challal. Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks: a top-down survey. *Computer Networks, Elsevier, 2014*; 67 (4), pp.104-122.
- [11] Pei Zhou, Gongsheng Huang, Linfeng Zhang, Kim-Fung Tsang. Wireless sensor network based monitoring system for a large-scale indoor space: data process and supply air allocation optimization. *Energy and Buildings, 2015*; Volume 103,Pages 365-374
- [12] Giuseppe Anastasi, Marco Conti, Mario Di Francesco, Andrea Passarella. Energy conservation in wireless sensor networks: A survey. *Ad Hoc Networks, 2009*; Volume 7, Issue 3, Pages 537-568
- [13] Texas Instruments <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina219.pdf> [En ligne Octobre 2015]
- [14] Lucas, Andre and Zhang, Xin. Score Driven Exponentially Weighted Moving Averages and Value-at-Risk Forecasting. *Tinbergen Institute Discussion 2014* Paper No. 14-092/IV/DSF77
- [15] Abdelaziz Amamra. “Techniques d'estimation de la bande passante disponible de réseaux sans fil.” *Informatique mobile. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2008*.
- [16] Akgiray, Vedat, Conditional Heteroscedasticity in Time Series of Stock Returns: Evidence and Forecasts. *The Journal of Business, 1989*; 62, issue 1, p. 55-80

CONCLUSION GENERALE

La qualité de l'air intérieur est une préoccupation majeure de santé publique. Notamment, certains secteurs industriels dégagent et/ou utilisent des produits toxiques qui se répandent dans l'air et a pour conséquence de contaminer leurs employés. Il est donc nécessaire pour celles-ci de mettre en place des systèmes de mesure permettant d'évaluer l'exposition des personnes aux polluants de l'air. L'objectif est bien évidemment de préserver la santé des employés, mais aussi d'anticiper les réglementations naissantes sur le Formaldéhyde. Pour les entreprises, le coût additionnel de ces systèmes de mesure sera compensé par une meilleure productivité liée par exemple à des absences médicales plus rares du personnel, ou encore à des procédures judiciaires longues dans les cas les plus graves de contamination ternissant aussi l'image de l'entreprise. Cependant, la mise en place d'un système de contrôle a toujours quelque chose d'inquiétant et il faudra que le système soit le plus discret possible pour que d'une part l'employé oublie cette surveillance et que d'autre part elle ne l'entrave pas au quotidien dans son travail. L'installation du système de mesure d'exposition des personnes devra aussi être suivi d'un accompagnement par des personnes capables d'expliquer l'utilisation du système, les démarches à adopter en cas de dépassement de seuil, les risques encourus, l'utilisation et la diffusion des résultats. Cette phase d'assistance ne fait pas l'objet de ce travail de thèse mais elle est sûrement aussi importante que la réalisation technique du système de mesure pour améliorer son acceptation dans l'entreprise.

Les propositions faites dans ce mémoire dans le contexte du projet ANR CAPFEIN se sont orientées sur deux solutions techniques. La première centralise les calculs d'exposition des personnes dans une base de données et la seconde repose sur des badges intelligents capables d'alerter en temps-réel les personnes suite à des taux de contamination trop élevés. Dans les deux cas il a fallu instrumenter le capteur de Formaldéhyde pour qu'il puisse coopérer avec son environnement en utilisant des communications sans-fil Wi-Fi. Le calcul du taux d'exposition passe aussi par la connaissance de la position des personnes dans l'entreprise. Le concept de microenvironnement a été utilisé pour associer à chaque position de l'employé un niveau de pollution. La durée de la personne dans chaque microenvironnement permet ainsi de déterminer son taux d'exposition. Les difficultés rencontrées ont été d'abord sur le choix technologique à adopter pour la localisation. La technique par infra-rouge est celle qui a été retenue car elle permet de discrétiser chaque endroit limité par des cloisons et ne nécessite pas la mise en place

d'une structure complexe à déployer. Il suffit d'une borne à infra-rouge dans chaque microenvironnement et que les employés portent des badges les identifiant.

La principale différence entre les deux solutions proposées est relative au comportement du badge. Dans la première solution, le badge émet son identifiant à un système centralisé qui va calculer, stocker et rendre accessible le taux d'exposition des employés. L'intérêt de cette organisation est qu'elle permet de passer d'une offre de produits à une offre de services dans la mesure où le serveur peut être hébergé par la société installateur de cette solution. Par contre, cette architecture requiert de se raccorder à Internet soit en passant par le réseau de l'entreprise soit en utilisant un abonnement GSM (par exemple) indépendant de l'entreprise. Cette proposition pose aussi le problème de la diffusion et le stockage de données relatives à la santé en dehors de l'entreprise. Ce point pourrait être un frein à son implémentation. Dans la seconde solution, le badge collecte les données de localisation et les mesures de pollution de l'air. Le taux d'exposition est porté directement par l'employé et les alertes de dangerosité sont données par le badge lui-même. L'architecture ne nécessite pas une connexion avec l'extérieur et peut fonctionner en complète autonomie même si actuellement, on préfère que l'alerte soit délivrée par un tiers (un expert) que directement par le badge.

La contribution dans les deux solutions a été différente. Dans le système centralisé, il s'agissait d'une intégration principalement logicielle entre ses composants, alors que le système déporté a nécessité de concevoir entièrement le badge. La capacité réduite du badge a donc obligé à réfléchir sur les problèmes liés à l'encombrement, à la consommation d'énergie et aux algorithmes de calcul à implémenter. Aujourd'hui le badge ne permet pas de faire d'historiques sur les données de mesure ou de calcul, mais la solution va à l'essentiel, c'est-à-dire qu'elle est capable de donner le taux d'exposition de l'employé portant le badge. Cette solution peut fonctionner indépendamment du réseau de l'entreprise. Elle est aussi intéressante à utiliser dans le cas d'opération de mesures ponctuelles. Par exemple lorsqu'une entreprise recherche à faire un bilan annuel périodique en analysant uniquement une journée ou une semaine de travail.

Des expérimentations réelles sur le site du CRAN ont été faites durant cette thèse et ont permis de valider la faisabilité technique, l'acceptation du badge par les « testeurs » et les données mesurées. Actuellement, ces réalisations sont les seules au monde qui répondent au décret 2011-1728 du 2 Décembre 2011 pour la surveillance en temps réel du Formaldéhyde.

Les perspectives sur ce travail sont nombreuses. La première serait de combiner les deux solutions pour pouvoir bénéficier de statistiques nombreuses stockées dans les serveurs

centralisés tout en gardant un traitement local sur le badge. Ce couplage aurait aussi comme avantage d'améliorer la sûreté de fonctionnement global de l'architecture. Une indisponibilité du réseau permettrait de pouvoir continuer à collecter les données sur le badge. Ou encore si le badge tombe en panne, les informations sur le serveur permettraient de réinitialiser un nouveau badge pour une personne donnée. La seconde perspective serait de tester chez un client le système de façon à l'éprouver mais aussi à l'améliorer en proposant de nouveaux services, de nouvelles interfaces plus conviviales, ... La troisième perspective serait de coupler le système de surveillance avec des équipements de domotique classique. Le but serait que le bâtiment soit actif en fonction des concentrations des polluants et cela en gérant des automatismes contextualisés : ouverture de fenêtres, enclenchement d'une VMC, adaptation du niveau d'humidité et de la température, ... Cette intégration du système de surveillance dans la domotique en général correspond à une quatrième perspective. En particulier, la fonction de la localisation pourrait être très intéressante dans d'autres applications comme par exemple dans des structures médicalisées pour suivre des patients ou des personnes âgées chez eux. Ce système de localisation pourrait aussi être déployé dans des mines pour suivre les mineurs dans les galeries et ainsi pouvoir les repérer en cas de problème (effondrement d'une galerie). Enfin, pour la localisation, il faudrait analyser l'évolution des techniques sur le LIFI qui semble une piste prometteuse pour faire de la localisation dans les bâtiments.

Résumé

Le formaldéhyde est un polluant classé comme « hautement prioritaire » dans l'air intérieur. En raison de ses effets sur la santé, la réglementation française émergente (action 7 du PNSE2) impose de mesurer le formaldéhyde dans les lieux publics (écoles, crèches etc.) à partir de 2017. Or, aucun appareil sur le marché n'est capable de fournir des mesures précises, en temps réel et à faible coût. Cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet ANR CAPFEIN (réseau de CAPteurs de FormaldEhyde intelligents pour la surveillance de l'air Intérieur) dont l'objectif est de réaliser un « capteur intelligent » de Formaldéhyde. Le sujet de thèse était de concevoir un système de surveillance en temps réel de l'exposition des personnes au Formaldéhyde, et plus généralement à n'importe quel polluant de l'air intérieur. Les capteurs doivent donc être dotés d'une interface de communication pour pouvoir collecter automatiquement les mesures en différents points de l'environnement à surveiller. Deux systèmes de surveillance ont été développés. Le premier repose sur des composants sur étagère et sur une architecture centralisée en se basant sur le concept de l'Internet des objets (IoT). Le second a été entièrement conçu au CRAN et correspond au développement d'une solution basée sur une approche distribuée. Un badge intelligent a été développé. Il permet de surveiller les taux d'exposition de chaque porteur de badge. Les contraintes majeures de ce travail ont été de pouvoir localiser les personnes dans un milieu intérieur, d'optimiser les algorithmes en termes de place mémoire et de consommation d'énergie. Pour la partie optimisation, des méthodes de moyenne mobile à pondération exponentielle ont été implémentées et évaluées. Les deux prototypes ont été testés dans les bâtiments du CRAN et ont montré leur intérêt.