

# Fondements et défis des systèmes Cyber-Physiques

PROJET :  
« Système de génération de  
tournées de collecte optimisées »



*Projet Réalisé par :*

Bouhamed Saif  
Florence Noé  
Takroun Momen

*Projet encadré par :*

M. Gérald Rocher  
M. Nicolas Ferry

## Table des matières

1. Description du système .....	4
1.1 Business .....	4
1.1.1 Objectif principal.....	4
1.1.2 Hypothèses de travail .....	4
1.2 DDD .....	5
1.2.1 Ubiquitous Language .....	5
1.2.2 Bounded Contexts.....	5
1.2.3 Context Map .....	6
1.2.4 Core Domain .....	7
1.2.5 Supportive Domain.....	7
1.2.6 Generic Domain .....	7
1.2.7 Domain Events .....	7
2 Acteurs et user stories/scénarios .....	8
2.1 Identification des acteurs .....	8
2.2 Scénarios .....	8
2.2.1 Particuliers .....	8
2.2.2 Éboueurs (agents) .....	9
2.2.3 Équipes de maintenance des poubelles connectées .....	10
3 Analyse des risques .....	11
3.1 Identification des risques mettre à jour :.....	11
3.2 Analyse :.....	11
3.3 Matrice des risques : .....	12
3.4 Schémas Bowtie:.....	13
4 Impacts architecturaux .....	14
4.1 Mauvaise détection des capteurs .....	14
4.2 Panne de communication ou panne Fog / Cloud .....	14
4.3 Panne de batterie ou d'alimentation .....	14
4.5 Sécurité.....	14
5 Architecture .....	16
5.1 Architecture haute abstraction .....	16
5.2 Architecture basse abstraction.....	17
5.3 Domain events (chemin pris par les events lors de leur déclenchement) dans notre architecture : .....	18

## Architecture du système CPS

5.4	Service du Things.....	19
5.5	Service/module du Fog.....	19
5.6	Service/module du Cloud .....	19
6.	Perspectives d'améliorations .....	20

# 1. Description du système

## 1.1 Business

Notre projet consiste à mettre en place un système de poubelles connectées capable de mesurer le taux de remplissage de chaque poubelle individuelle, afin de réduire le temps de trajet lors de la collecte des déchets par les éboueurs. Chaque poubelle est équipée des capteurs qui transmettent à un certain intervalle de temps des données, des informations. Ces informations permettent de calculer automatiquement les tournées optimales des éboueurs (en prenant en compte les contraintes horaires et de zones) et d'informer les utilisateurs lorsque leurs poubelles sont pleines (donc de pouvoir la mettre à disposition des éboueurs).

### 1.1.1 Objectif principal

- **Faire des économies (d'argent) en réduisant le nombre de trajets inutiles lors des tournées** en ne collectant que les poubelles pleines. En effet, il existe une quantité assez conséquente de poubelles individuelles, impliquant des trajets inutiles car certaines poubelles ne sont pas sorties au moment du passage du camion, tandis que d'autres sont collectées alors qu'elles ne sont que partiellement remplies. De plus, les tournées actuelles ne tirent pas pleinement parti du volume disponible dans les camions.

### 1.1.2 Hypothèses de travail

On fait l'hypothèse que :

- Les signalements de poubelles anormales par l'agent ou le particulier sont toujours vrais (pas de faux signalement).
- En cas de panne d'un camion, la société envoie un camion de remplacement reprenant le même itinéraire.
- On ne travaille que sur les poubelles individuelles (tout type de déchets).
- Un technicien vient installer la poubelle chez un particulier (nous les livrons nous-mêmes).
- Les particuliers possèdent une connexion internet chez eux (qui va nous permettre de faire communiquer la poubelle avec l'extérieur).
- Les particuliers rechargent la poubelle eux-mêmes (étant donné que les composants sont alimentés par batterie).
- On se concentre sur le taux de remplissage en termes de volume (pas l'odeur forte émanant de la poubelle par exemple)

## 1.2 DDD

### 1.2.1 Ubiquitous Language

Language	Description
Poubelle	Conteneur physique équipé de capteurs mesurant le taux de remplissage. Peut être utilisé pour tous les types de déchets.
Taux de remplissage	Pourcentage de remplissage du conteneur (0 à 100 %).
Seuil de remplissage	Niveau prédéfini (ex. 80 %) pour lequel on considère que la poubelle est pleine.
Statut	État d'une poubelle ("Normal", "Anormale").
Particulier	Personne associée à une ou plusieurs poubelles connectées.
Agent de collecte	Les éboueurs qui effectuent les tournées
Equipe de maintenance	Supervise et assure la maintenance de poubelles connectées.
Collecte	Action de vidage de la poubelle par les éboueurs.
Tournée	Ensemble des collectes planifiées dans une zone donnée.
Zone de collecte	Secteur géographique regroupant plusieurs poubelles.
Utilisateur	Particulier, agent ou un membre de l'équipe de maintenance
Anomalie	Poubelle qui rencontre un problème ou ayant un comportement non conforme (détecté par notre système)
Signalement	Poubelle rencontrant un problème ou ayant un comportement non conforme (détecté par un agent ou un particulier)

### 1.2.2 Bounded Contexts

Bounded Context	Description
Trajet Optimisé	Génère les trajets de collecte optimisés en fonction du remplissage des poubelles
Particuliers	Gère les interactions entre les particuliers (notify les prochaines collectes, report des anomalies, affichage des données de la poubelle du particulier)
Agents	Gère les interactions entre les agents de collecte (affichage du trajet sur la map, report des anomalies)
Maintenance	Suivi, détection et gestion des anomalies techniques
Gestion des utilisateurs	Gestion des comptes utilisateurs (création, suppression, authentification).

### 1.2.3 Context Map

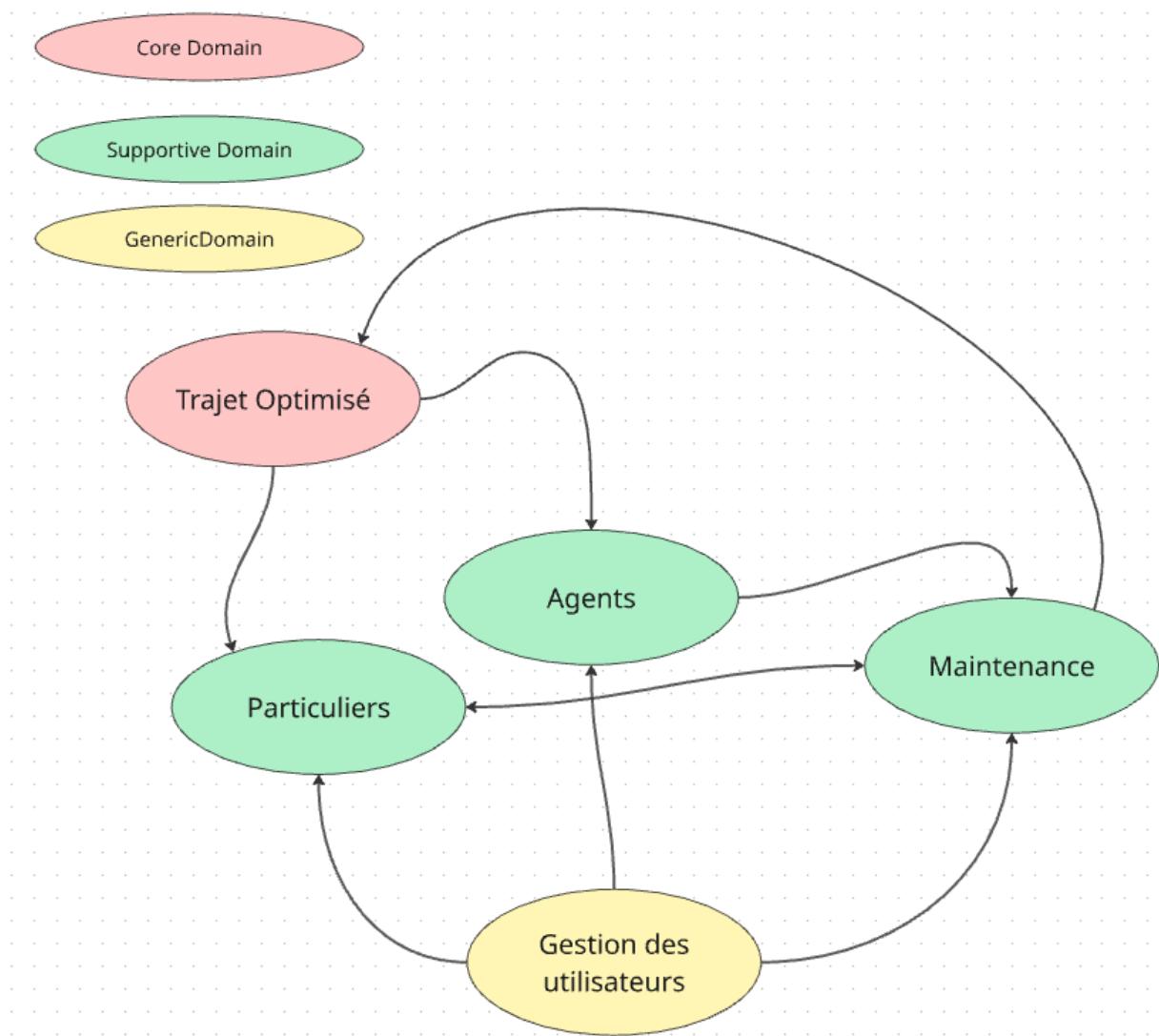


Figure 1 : ContexteMap

Le contexte “Trajet Optimisé” est impacté par le contexte “Maintenance” vu que les données capteurs, si elles sont anormales, impactent le planning. “Trajet Optimisé” impacte le contexte “Particuliers” en envoyant une notification lors de la planification d’une tournée pour qu’un utilisateur sorte la poubelle. Il impacte aussi le contexte “Agents” car il envoie un trajet sur une carte à suivre pour les agents. Ensuite “Agents” impacte aussi “Maintenance”, car lors de la collecte, il va signaler en cas d’anomalie (poubelle censée être pleine mais vide) pareil pour les particuliers qui remarquent que ce que leur montre l’application n’est pas en accord avec la réalité. “Maintenance”, est en lien avec les particuliers car il va aller réparer les poubelles des particuliers en cas d’anomalie et enfin “Gestion des utilisateurs” est lié à tout le monde (sauf Trajet Optimisé) notamment pour l’authentification et, pour les particuliers, afin de récupérer les informations des poubelles connectées associés à eux.

#### 1.2.4 Core Domain

- Calcul des tournées optimisées :
  - Prise en compte des différentes contraintes (planning, camions, ...)
  - Prise en compte des poubelles pleines
  - Génération d'un itinéraire en prenant en compte les points cités précédemment.  
(Consiste à résoudre le Vehicle Routing Problem)

#### 1.2.5 Supportive Domain

- Affichage des poubelles et trajets sur une carte sur l'application
- Gestion des véhicules de collecte (service listant les véhicules, leurs capacités et plannings)
- Signalement en cas d'anomalie par les éboueurs et/ou les particuliers via leurs applications
- Détection d'anomalies par notre système

#### 1.2.6 Generic Domain

- Authentification / gestion des utilisateurs
- Système de notification
- Stockage des données

#### 1.2.7 Domain Events

##### Domain Events :

Ce sont les faits importants qui se produisent dans le système et qui peuvent déclencher des actions :

- **Anomalie Capteur Détectée** : Déclenché si notre système détecte que les données d'une poubelle sont incohérentes. Le contexte Maintenance crée un ticket pour l'équipe de maintenance.
- **PoubelleCollectée**: Déclenché lorsqu'un camion vide une poubelle. Le contexte Trajet Optimisé reçoit l'information et considère comme la collecte comme complète.
- **FauxPositifSignaléParAgent** : Déclenché lorsque l'éboueur voulant vider la poubelle censée être pleine mais la trouve vide, un signalement est fait pour l'équipe de maintenance.
- **PoubelleDefectueuseSignaléeParParticulier** : Déclenché lorsque le particulier remarque sa poubelle censée être vide/pleine (selon l'application) ne l'est pas, un signalement est fait pour l'équipe de maintenance.
- **BatterieFaibleDéTECTÉE** : Niveau de batterie faible détecté sur un des composants. Une notification est envoyée sur l'application du particulier.
- **InterventionMaintenanceEffectuée** : Déclenché lorsque qu'un technicien résout le problème un ticket.
- **CollecteConfirméeParAgent** : Lorsque l'éboueur collecte une poubelle.
- **InstallationPoubelle** : Lorsqu'un technicien installe une poubelle. Et l'associe à un utilisateur dans le système.

- **RemontéeDonnéesCapteurs** : à différentes heures de la journée, cet événement déclenche la récupération des données capteurs pour les remonter au cloud.

## 2 Acteurs et user stories/scénarios

### 2.1 Identification des acteurs

- Particuliers
- Éboueurs
- Équipes maintenance

### 2.2 Scénarios

#### 2.2.1 Particuliers

**Identité** : Claire Dubois, 42 ans, mariée, deux enfants. Vit avec sa famille dans une maison en périphérie de la ville.

**Son objectif** : Ne plus oublier de sortir la poubelle, le jour de la collecte

**Ses frustrations** :

- La charge mentale de devoir se souvenir du jour de collecte.
- Le bruit des camions qui ne passent pour rien quand les poubelles sont vides.

#### 2.1.1.1 Scénarios d'Usage pour le particulier (Claire)

##### Scenario 1 : Usage Normal

**Storytelling** : La semaine a été chargée et Claire n'a pas du tout pensé à sa poubelle. Vers 19h, alors qu'elle prépare le dîner, son téléphone vibre. C'est une notification de l'application "Votre poubelle est pleine. Un camion de collecte passera dans votre rue demain entre 8h et 12h. Pensez à la sortir", elle sort ainsi sa poubelle avant de se coucher et le lendemain en revenant du travail elle voit que sa poubelle a bien été collectée.

##### Scenario 2 : Poubelle non sortie

**Storytelling** : Claire est en réunion toute la journée et a mis son téléphone en mode "Ne pas déranger". Elle manque la notification de l'application. De ce fait, elle oublie de sortir la poubelle, ce qui fait que le camion n'a pas pu la collecter. Elle reçoit une notification "Collecte manquée", mais sa poubelle sera prise en compte lors de la prochaine tournée, donc elle n'est pas pénalisée.

##### Scenario 3 : Poubelle défectueuse

**Storytelling** : Claire remarque que sa poubelle déborde, mais elle n'a reçu aucune notification de collecte depuis plusieurs jours. Elle ouvre l'application et voit que le niveau de remplissage est bloqué à "50%". Elle voit qu'il y a un problème et via l'application, elle fait un signalement pour sa poubelle. Plus tard, elle reçoit une confirmation : "Votre signalement a été pris en compte. Une

équipe technique interviendra. En attendant, votre poubelle sera ajoutée manuellement à la prochaine collecte."

#### **Scénario 4 : Batterie de la poubelle presque vide**

**Storytelling :** Un matin, Claire reçoit une notification sur son application : "Attention : la batterie de votre poubelle est faible. Veuillez la recharger." Elle prend rapidement le chargeur fourni avec la poubelle et recharge. Quelques heures plus tard, la batterie est pleine. Claire peut donc continuer à utiliser sa poubelle sans problème.

### **2.2.2 Éboueurs (agents)**

**Identité :** Marc Fournier, 53 ans, agent de collecte.

**Son objectif :** Éviter les trajets inutiles ou routes bloquées pour économiser du temps.

**Ses frustrations :**

- Collecter des poubelles à moitié vides, voire totalement vides.
- Être bloqué par un imprévu lors de la tournée.

#### **2.1.1.2 Scénarios d'Usage pour l'agent d'entretien (Marc)**

##### **Scénario 1 : Usage Normal**

**Storytelling :** Marc commence sa journée à 7h. Il allume la tablette fixée dans son camion. L'application affiche la carte de son secteur avec un itinéraire optimisé pour la journée. Le trajet ne passe que dans les rues où des poubelles ont signalé être pleines. À chaque poubelle vidée, il appuie sur un bouton sur sa tablette pour confirmer la collecte. La tournée étant plus courte, il finit sa journée plus rapidement.

##### **Scénario 2 : Une poubelle signalée est absente**

**Storytelling :** La tablette de Marc le guide vers une adresse. Pourtant, en arrivant, Marc ne voit aucune poubelle sur le trottoir. Claire a dû oublier. Au lieu de s'interroger, Marc appuie sur le bouton "Poubelle absente". Il ne perd pas de temps et continue sa tournée, le système s'occupe de la suite.

##### **Scénario 3 : Faux positif**

**Storytelling :** La tablette de Marc le guide vers une adresse. En arrivant, il est surpris de voir qu'elle est presque vide. C'est clairement un "faux positif", il décide donc de signaler sur sa tablette en cliquant sur le bouton "faux positif", un ticket est automatiquement créé pour l'équipe de maintenance.

## 2.2.3 Équipes de maintenance des poubelles connectées

**Identité :** Julien, 35 ans, technicien en maintenance IoT.

**Objectif :** Assurer le bon fonctionnement des poubelles connectées et intervenir rapidement en cas d'anomalie.

**Sa frustration :**

- Déetecter trop tard un dysfonctionnement pouvant impacter la collecte.

### Scénarios d'usage pour l'équipe technique (Julien)

#### Scénario 1 : Anomalie détectée automatiquement

**Storytelling :** Julien consulte le tableau de bord de supervision. Un ticket a été généré : "Poubelle 4521 – Données incohérentes." Le système a généré automatiquement ce ticket après vérification. Julien consulte l'historique et regarde si l'alerte est cohérente et **n'est pas** simplement une erreur de notre système. Il planifie un rendez-vous avec le particulier pour réparer et une fois cela fait, il appuie sur le bouton "Ticket résolu".

#### Scénario 2 : Signalement par un éboueur

**Storytelling :** Un ticket a été créé par le signalement d'un éboueur pour indiquer un faux positif. Il planifie un rendez-vous avec le particulier concerné pour réparer et une fois cela fait, il appuie sur le bouton "Ticket résolu".

#### Scénario 3 : Signalement par un utilisateur

**Storytelling :** Un particulier signale que sa poubelle est défectueuse. Julien reçoit le ticket sur son tableau de bord et constate que la poubelle censée être à 50% est en réalité pleine. Il planifie un rendez-vous avec le particulier concerné pour réparer et une fois cela fait, il appuie sur le bouton "Ticket résolu".

#### Scénario : mode dégradé le cloud ne fonctionne plus du point de vue du particulier

**Storytelling :** Son application n'a pas pu se connecter directement au cloud et s'est connecté à la place au service dégradé du Fog. Elle a reçu une notification lui indiquant qu'un camion de collecte passera quand même dans sa rue demain. Elle sort ainsi sa poubelle avant de se coucher et le lendemain en revenant du travail elle voit que sa poubelle a bien été collectée. Rien ne change pour elle, elle ne peut juste plus changer son mot de passe, email ou effectuer un signalement.

#### Scénario : mode dégradé le cloud ne fonctionne plus du point de vue de l'agent

**Storytelling :** Marc allume la tablette fixée dans son camion. L'application n'a pas pu se connecter directement au cloud et s'est connecté à la place au service dégradé du Fog . Elle affiche la carte de son secteur avec un itinéraire optimisé pour le secteur. Le trajet ne passe que dans les rues où des poubelles ont signalé être pleines. Rien ne change pour lui, il ne peut juste pas effectuer de signalement.

## 3 Analyse des risques

### 3.1 Identification des risques mettre à jour :

L'analyse des risques repose sur l'identification des menaces qui peuvent compromettre le fonctionnement du système. Pour notre projet de poubelles connectées, les principaux risques sont :

### 3.2 Analyse :

Risque	Causes Possibles	Probabilité	Sévérité
<b>Risque Technique</b>	La défaillance d'un composant matériel de la poubelle (capteur, microcontrôleur, batterie) qui empêche la collecte ou la transmission des données.	A. Presque certain	4. Majeur
<b>Risque Opérationnel</b>	Une erreur humaine ou un processus défaillant dans la maintenance ou l'exploitation du système (ex: personnel non formé, oubli de maintenance).	B. Fréquent	4. Majeur
<b>Risque de Sécurité Informatique</b>	Une attaque malveillante (piratage, vol de données, déni de service) qui compromet l'intégrité, la confidentialité ou la disponibilité du système.	C. Occasionnel	5. Catastrophique
<b>Risque de Communication</b>	L'incapacité de la poubelle à transmettre ses données à la plateforme, due à des problèmes de réseau (perte de signal, panne de gateway) ou à une saturation.	B. Fréquent	3. Modéré
<b>Risque Logistique</b>	Un problème lié à l'organisation physique de la collecte (ex : mauvaise planification du trajet, poubelle inaccessible, données GPS imprécises). Un problème lié à l'organisation physique de la collecte (ex : mauvaise planification du trajet, poubelle inaccessible, données GPS imprécises).	C. Occasionnel	3. Modéré

<b>Risque Financier</b>	Des coûts imprévus qui dépassent le budget alloué, mettant en péril la rentabilité ou la continuité du projet (ex: coût de maintenance, pannes matérielles).	C. Occasionnel	3. Modéré
<b>Risque Sanitaire</b>	Problèmes d'hygiène ou de santé publique dus à des poubelles qui débordent à la suite d'une collecte manquée ou une non-détection.	D. Rare	2. Mineur

### 3.3 Matrice des risques :

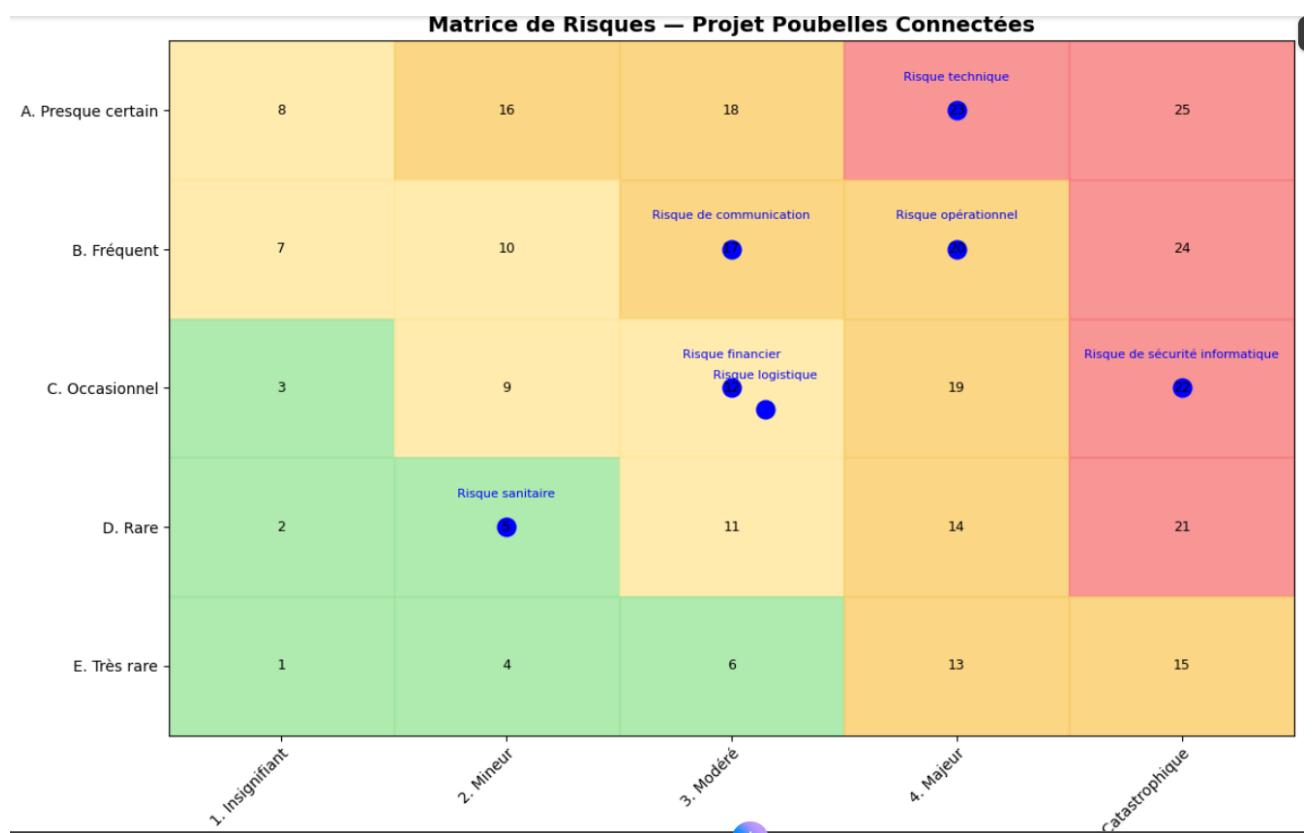


Figure 2: Matrice des Risques

### 3.4 Schémas Bowtie:

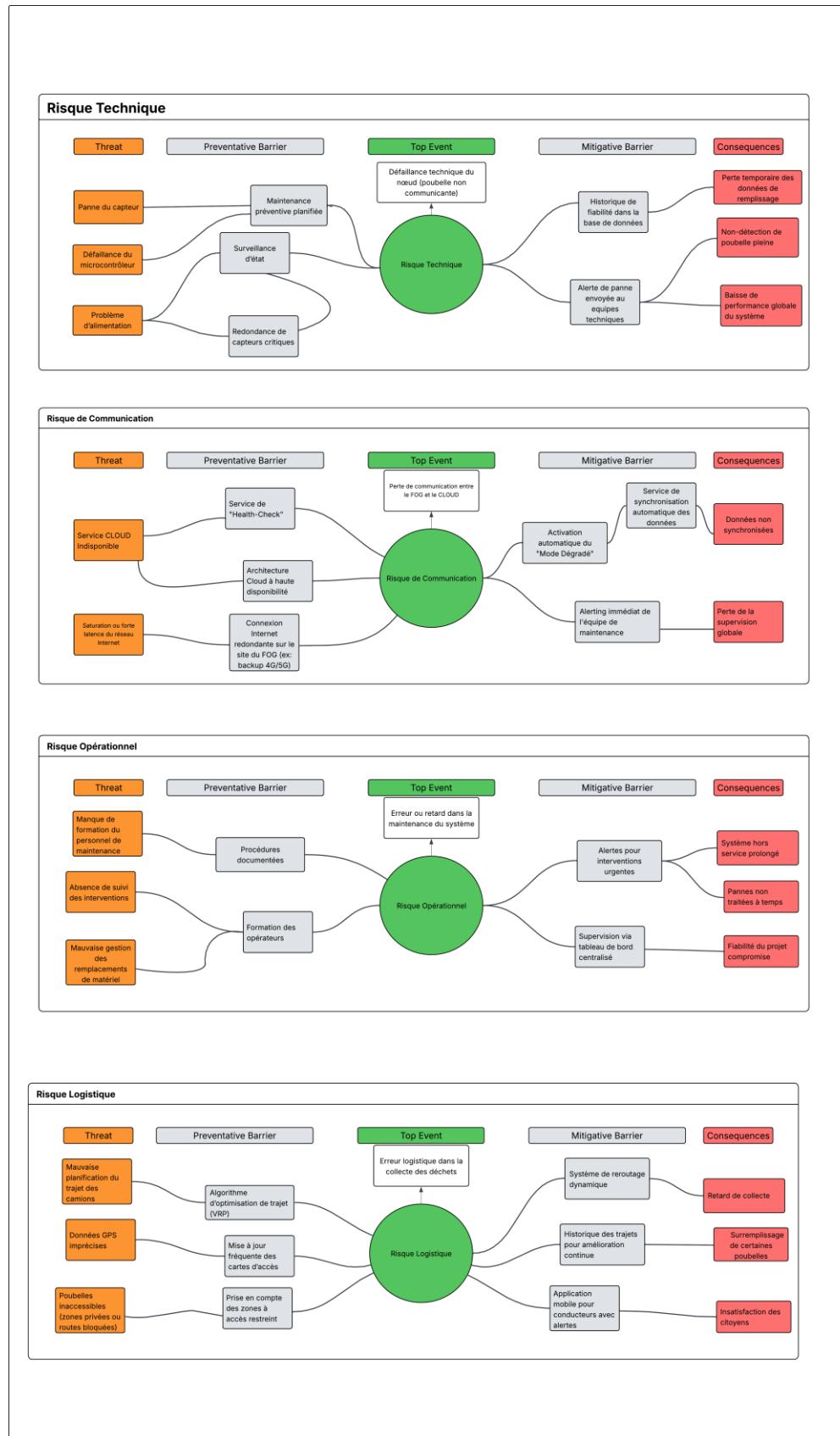


Figure 3 : Schémas Bowties

## 4 Impacts architecturaux

Pour chaque risque, les mesures impactant notre architecture ont été identifiées :

### 4.1 Mauvaise détection des capteurs

**Impact sur l'architecture :**

- Création d'un service de détection d'anomalie pour identifier rapidement les poubelles les capteurs défectueux et déclencher des alertes aux techniciens IoT.
- Ajout d'une IA de prédiction des niveaux de remplissage pour corriger les poubelles que l'on a identifié comme anormale.
- Mise en place d'une fusion des données des capteurs (IR + ultrason + poids) pour valider localement les mesures avant transmission.
- Les applications mobiles des éboueurs doivent inclure une fonctionnalité permettant de signaler les anomalies ou poubelles absentes.
- Les applications mobiles des usagers doivent inclure une fonctionnalité permettant de signaler que la poubelle est anormale.

### 4.2 Panne de communication ou panne Fog / Cloud

**Impact sur l'architecture :**

- Une queue locale dans la poubelle (microcontrôleur) pour stocker les données lorsque la communication avec l'extérieur est rompue
- Mise en place de serveurs au niveau des villes (en plus du serveur), afin de pouvoir implémenter un mode dégradé :
  - Ce mode s'active lorsque le serveur principal générant les trajets ne marche plus.
  - Le fait d'avoir des serveurs au niveau de la ville permet d'assurer que l'on puisse générer un trajet optimisé pour une ville afin d'assurer le core domain.
  - On ne pourra pas générer des trajets inter-villes.

### 4.3 Panne de batterie ou d'alimentation

**Impact sur l'architecture :**

- Ajout d'un service de surveillance de batterie dans le microcontrôleur de la poubelle.
- Intégration d'un service de notification pour alerter l'utilisateur avant que le capteur ne tombe complètement en panne.

### 4.5 Sécurité

**Impact sur l'architecture :**

## Architecture du système CPS

- Ajout d'un système d'authentification pour accéder aux fonctionnalités des applications (éboueur ou usager ou équipe technique)
- Chiffrement des communications de bout-en-bout : Pour garantir la confidentialité et l'intégrité des données face au risque de piratage, l'architecture impose l'utilisation de HTTPS pour tous les flux de service entre les composants qui exposent des ports à l'extérieur.

## 5 Architecture

### 5.1 Architecture haute abstraction

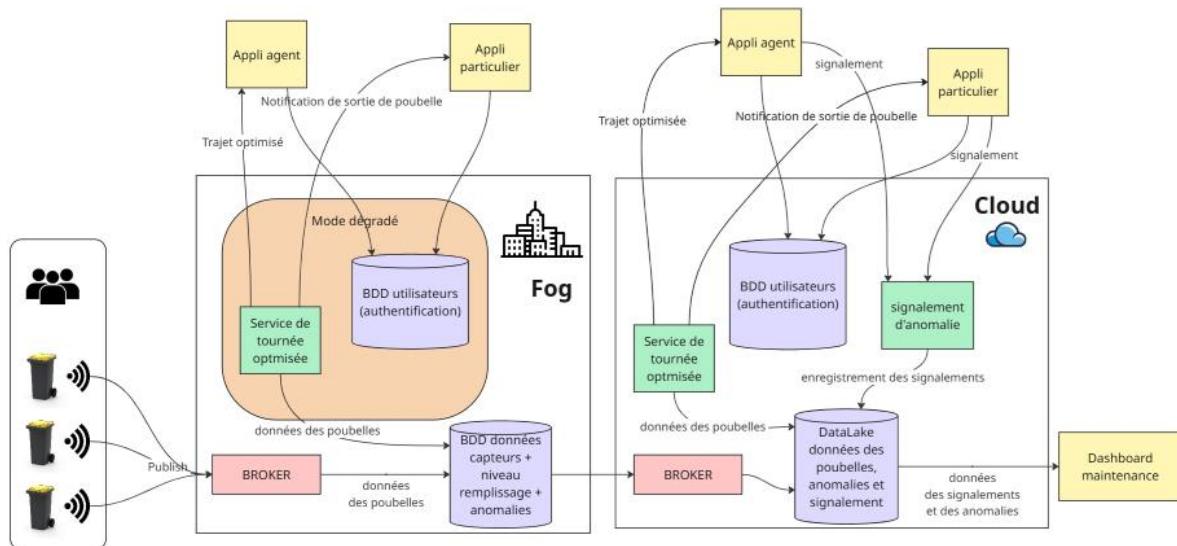


Figure 4 : Schéma Architecture Haute Abstraction

## 5.2 Architecture basse abstraction

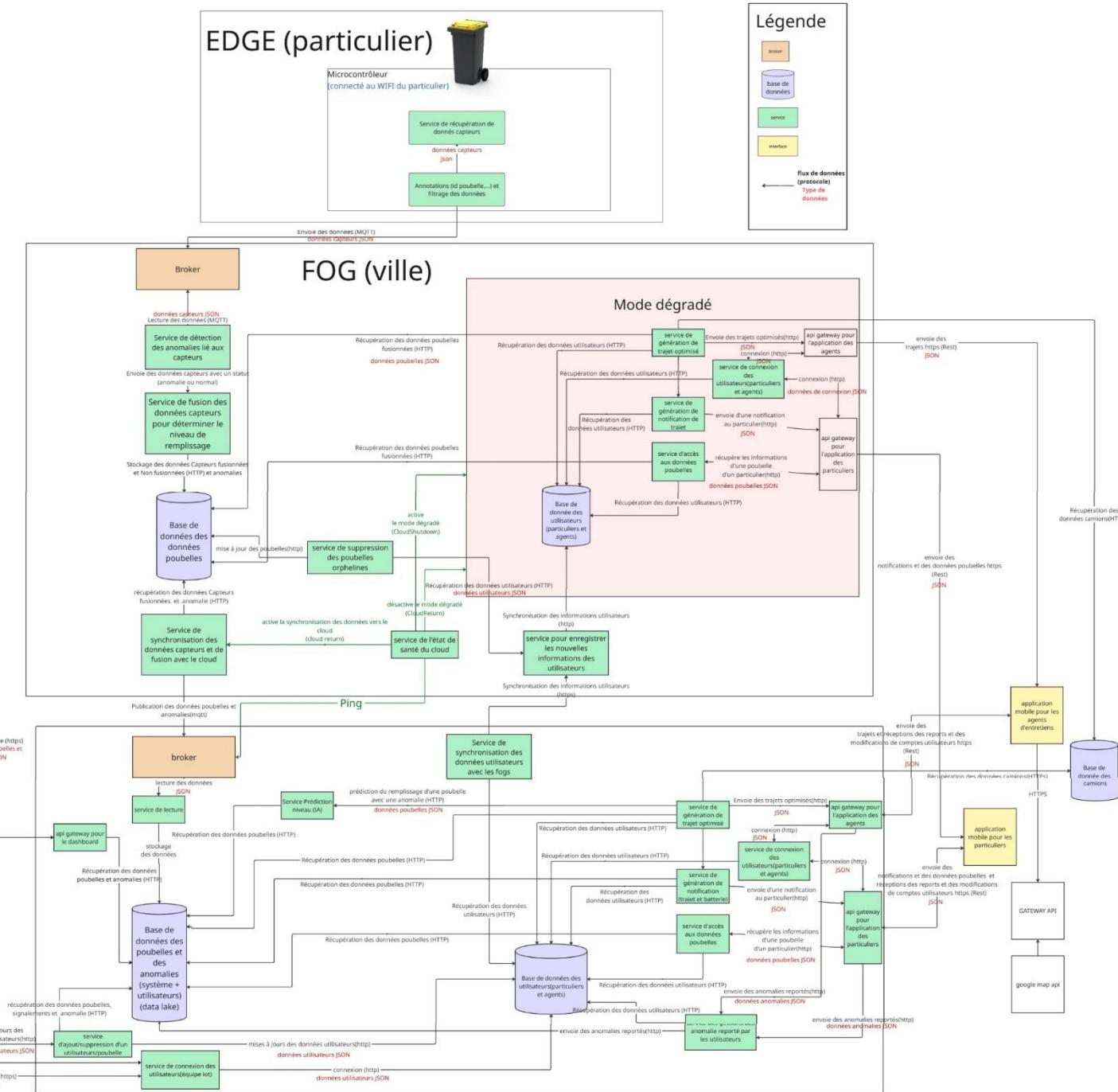


Figure 5 : Schéma Architecture Détailé

### 5.3 Domain events (chemin pris par les events lors de leur déclenchement) dans notre architecture :

- **Anomalie Capteur DéTECTée** : Service de détection des anomalies liées aux capteurs (FOG) -> Service de fusion des données capteurs pour déterminer le niveau de remplissage (FOG) -> Base de données des données poubelles -> Service de synchronisation des données capteurs et de fusion avec le cloud -> BDD poubelles + anomalies (Cloud) -> API Gateway pour le dashboard (Cloud) -> Dashboard maintenance.
- **PoubelleCollectée** : Événement qui permet d'afficher, dans l'application de l'éboueur, les poubelles déjà collectées lors du trajet.
- **FauxPositifSignaléParAgent** : application mobile pour les agents d'entretien (Cloud) -> API Gateway pour l'application des agents (Cloud) -> service de gestion des anomalies reportées par les utilisateurs (Cloud) -> BDD poubelles + anomalies (Cloud) -> API Gateway pour le dashboard (Cloud) -> Dashboard maintenance.
- **PoubelleDefectueuseSignaléeParParticulier** : application mobile pour les particuliers (Cloud) -> api gateway pour l'application des particuliers (Cloud) -> service de gestion des anomalies signalées par les utilisateurs -> (Cloud) BDD poubelles + anomalies (Cloud) -> API Gateway pour le dashboard (Cloud) -> Dashboard maintenance.
- **BatterieFaibleDéTECTée** : Service de notification (trajet + batterie) (Cloud) consulte la bdd du cloud, voit qu'une poubelle a une batterie bientôt vide et passe par la gateway de l'application des particuliers pour envoyer une notification à un particulier.
- **InterventionMaintenanceEffectuée** : Dashboard maintenance -> API gateway pour dashboard (Cloud) -> BDD (Cloud) (ticket marqué comme résolu)
- **InstallationPoubelle** : application d'administration -> service d'ajout/suppression d'un utilisateur/poubelle -> Base de données des utilisateurs (particuliers et agents)
- **RemontéeDonnéesCapteurs** : Service de récupération de données capteurs -> Annotations (ID poubelle,...) et filtrage des données -> Broker (Fog) -> Service de détection des anomalies liées aux capteurs -> Service de fusion des données capteurs pour déterminer le niveau de remplissage -> Base de données des données poubelles -> Service de synchronisation des données capteurs et de fusion avec le Cloud -> broker (cloud) -> service de lecture -> Base de données des poubelles et des anomalies (système + utilisateurs) (Data Lake)

## 5.4 Service du Things

Nom du service	Fonction
Service de filtre et d'annotation	Effectue un 1 <sup>er</sup> filtrage pour le bruit des données et annote les données.

## 5.5 Service/module du Fog

Nom du service	Fonctions
<b>Service de détection des anomalies liées aux capteurs</b>	Analyse les données des capteurs pour détecter des comportements anormaux (ex : valeurs absurdes ou incohérentes) et lève des alertes. Assure une première boucle de vérifications des données dans le Fog et répond au "risque techniques" sans attendre l'analyse du Cloud.
<b>Service de fusion</b>	Utilise un algorithme de fusion sur les valeurs des différents capteurs pour déterminer un niveau de remplissage
<b>Mode dégradé</b>	Calcule un trajet optimisé uniquement pour son secteur en cas de panne du cloud pour le fonctionnement en mode dégradé. Solution à une panne du Cloud (risque de communication). Il permet d'assurer la continuité du service en "mode dégradé", garantissant que les collectes urgentes sont effectuées. Les fonctionnalités de report d'anomalie par les agents et les particuliers et les changements des informations des utilisateurs (ex : changement de mot de passe) ne sont pas assurés en mode dégradé.
<b>Service de synchronisation</b>	Synchronise les données locale et les données du cloud et en cas de panne du cloud, resynchronise les données avec ce dernier au moment où il est de nouveau opérationnel. Permet de garantir l'intégrité des données entre le cloud et les Fogs.

## 5.6 Service/module du Cloud

Nom du service	Fonctions
<b>Service de prédiction de niveau (IA)</b>	Modèle IA pour prédire le niveau d'une poubelle en fonction de son historique si cette dernière a une anomalie. Il répond au risque de perte de communication en prédisant le niveau de remplissage d'une poubelle déconnectée du réseau.

<b>Service de lecture</b>	Lit les données des topics et les enregistre dans le datalake
---------------------------	---

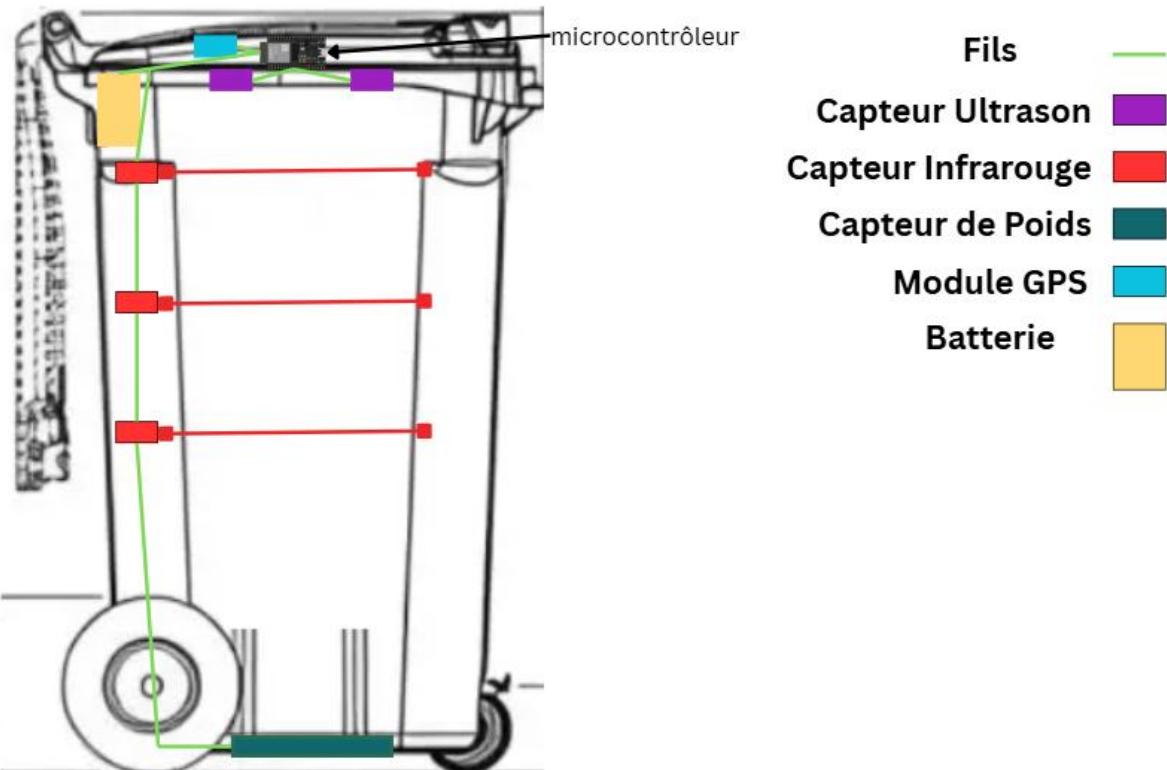


Figure 6 : Schéma de la poubelle

Les capteurs sont connectés en filaire au microcontrôleur et une batterie alimente l'ensemble des composants de la poubelle. Le choix de la batterie s'explique par le fait qu'une poubelle, lors de son cycle de vie, n'est pas fixe ("par exemple lorsque le particulier la ramène chez lui ou simplement lors du vidage de la poubelle.).

## 6. Perspectives d'améliorations

Notre architecture actuelle est conçue pour être robuste et répondre aux besoins fondamentaux du projet. Cependant, elle constitue une fondation solide pour de futures améliorations significatives :

1. **Maintenance Prédictive Avancée** : Notre "Service de prédiction de niveau (IA)" se concentre sur le remplissage. La prochaine étape serait de l'étendre pour créer un véritable service de **maintenance prédictive**. En analysant l'historique des données capteurs (dérive, incohérences) et des pannes (via les tickets de maintenance), le modèle IA pourrait prédire la défaillance d'un capteur ou d'une batterie *avant* qu'elle ne survienne, permettant une intervention proactive.
2. **Optimisation Avancée du "Core Domain"** : Le service de "Trajet Optimisé" pourrait être enrichi en intégrant des sources de données externes. On pourrait y ajouter :
  - a. L'optimisation des **plages horaires** pour minimiser les nuisances sonores dans les zones résidentielles.
3. **Élargissement du Modèle de Domaine** : Le système est actuellement centré sur les poubelles individuelles. L'architecture pourrait être étendue pour inclure de nouveaux types d'entités, comme les **poubelles collectives**, les **silos à verre** ou les **bennes de recyclage**, chacune avec ses propres capteurs et contraintes de collecte.

## 7.Aides

### Tableau des figures

Figure 1 : ContexteMap .....	6
Figure 2: Matrice des Risques .....	12
Figure 3 : Schémas Bowties .....	13
Figure 4 : Schéma Architecture Haute Abstraction .....	16
Figure 5 : Schéma Architecture Détaillé .....	17
Figure 6 : Schéma de la poubelle .....	20

Rédaction avec l'aide de chatGPT/Gemini