

CAHIER DES CHARGES : PROJET "RUCHE INTELLIGENTE"

1. Informations Générales

- **Nom du projet** : Beehive
- **Date de création du document** : 02/01/2026
- **Chef de projet** : Dyhia BOUDJEMA
- **Commanditaire / Client** : Ludivin CREPIN
- **Équipe projet** : Dyhia BOUDJEMA, Mohamed EL OUAHBI, Sarujan THEVANESAN

2. Contexte et Présentation du Projet

2.1. Contexte Général

Le secteur de l'apiculture et de la protection de la biodiversité fait face à des défis majeurs : mortalité accrue des colonies, impact du changement climatique et manque de données précises sur les populations d'insectes pollinisateurs. Actuellement, la surveillance des ruches et des habitats d'abeilles sauvages (hôtels à insectes) repose sur une observation humaine manuelle, chronophage et non continue.

Ce projet s'inscrit dans le domaine "IA embarquée dans le domaine biologique", avec pour ambition de créer une **start-up innovante** capable d'automatiser ces processus grâce à l'Intelligence Artificielle.

2.2. Objectifs du Projet

L'objectif principal est de développer une solution d'**IA embarquée** (Edge AI) capable de :

1. **Surveiller la santé** d'une colonie d'abeilles domestiques.
2. **Monitorer la biodiversité locale** en analysant l'occupation des nichoirs à abeilles sauvages adjacents.

Pour la phase actuelle de validation (POC - Proof of Concept), l'effort se concentre spécifiquement sur la brique technologique de **vision par ordinateur pour les**

abeilles sauvages. L'objectif est de prouver qu'une IA peut cartographier un nichoir et déterminer son taux d'occupation en temps réel.

2.3. Périmètre du POC (Proof of Concept)

Le périmètre technique de ce prototype est délimité par les tâches suivantes, réparties en trois pôles :

- **Pôle Data & Dataset** : Constitution d'un jeu de données de 100 photos de nichoirs et création de vignettes classifiées "VIDE" vs "PLEIN".
- **Pôle Intelligence Artificielle** :
 - Entraînement d'un modèle **YOLO** pour la détection des objets trou_de_nid.
- **Pôle Développement & Intégration** : Création d'un script Python de liaison (prise photo -> détection -> découpe -> classification) et affichage d'un dashboard de résultats (Taux d'occupation en %).

2.4. Public Cible et Bénéficiaires

- **Apiculteurs professionnels et amateurs** : Pour une gestion optimisée du rucher.
- **Collectivités et Espaces Verts** : Pour le suivi de la biodiversité locale (bio-indication).
- **Scientifiques/Biologistes** : Pour l'obtention de données statistiques fiables sur les populations d'abeilles solitaires.

2.5. Équipe Projet

Le projet est mené par le groupe "Biologie / Start-up innovante" composé de :

Dyhia, Mohamed, Sarujan

3. Cas d'usage / Scénario fonctionnel

Cette section détaille les fonctionnalités attendues, divisées entre la surveillance de la colonie (Domestique) et le POC actuel (Sauvage).

3.1. Module "Ruche Domestique" (Santé & Production)

Le système doit assurer une surveillance active de la colonie *Apis Mellifera*.

- **Diagnostic Sonore** : Détecter le son vibratoire spécifique de la reine et les signaux de stress de la colonie.

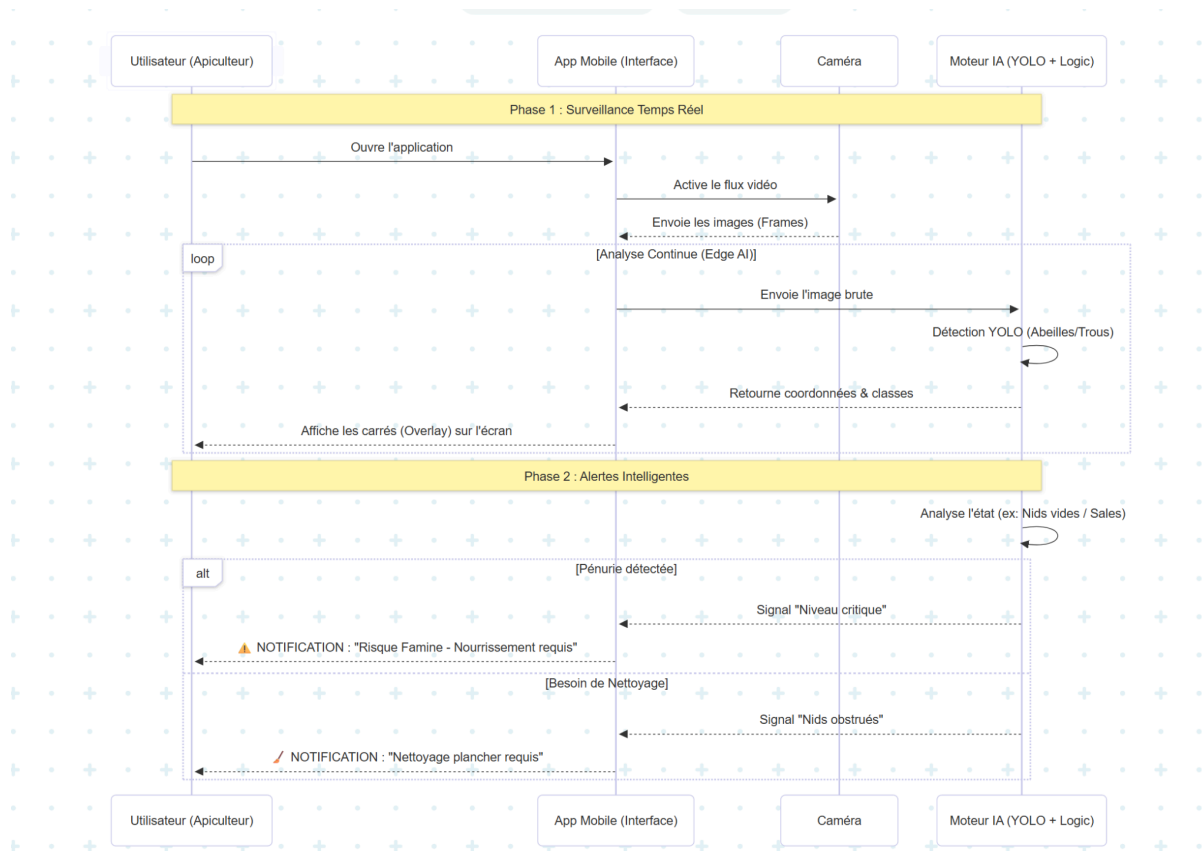
- **Reconnaissance des Menaces** : Identifier visuellement les prédateurs à l'entrée, spécifiquement le Frelon Asiatique et les guêpes.
- **Optimisation de la récolte** : Prédire le moment optimal pour la récolte en fonction des données de poids (capteurs) et des stocks, et alerter sur le besoin de diviser la ruche en cas de surcharge.
- **Gestion Thermique** : Réguler la température interne pour limiter l'essaimage et lutter contre le Varroa.

3.2. Module "Biodiversité & POC" (Abeilles Sauvages)

C'est le cœur du prototype actuel. Le système transforme les hôtels à insectes en capteurs connectés.

- **Détection d'Occupation** : Le système doit identifier les tubes de nidification sur une image globale du nichoir.
- **Classification d'État** : Pour chaque tube détecté, l'IA doit déterminer s'il est "**VIDE**" (noir/vide) ou "**PLEIN**" (bouché par terre, feuilles, résine).
- **Cartographie Florale** : Analyser le pollen ramené pour déduire la biodiversité environnante.
- **Tableau de Bord** : Afficher les résultats sous la forme : "*Nombre de tubes : X | Tubes occupés : Y | Taux d'occupation : Z%*"

3.3. Schéma fonctionnel :



4. Nature de la tâche IA

- [X] **Classification** (État des tubes : Vide ou Plein / Espèces).
- [] Régression
- [] Clustering
- [] Détection d'anomalie
- [] NLP (texte)
- [X] **Aide au diagnostic** (Santé de la ruche via audio - Phase ultérieure).
- [X] **Planification** (opérations d'intervention)
- [X] **Détection d'objets** (Computer Vision, Localisation des trous avec YOLO)

5. Stratégie de Données (Le Dataset)

La performance de l'IA reposant sur la qualité des données, nous avons constitué un jeu de données spécifique pour ce projet.

- **Constitution du Dataset :**
 - **Sources :** Agrégation d'images issues de bases open-source (Kaggle) et de prises de vues réelles pour varier les angles et les luminosités.
 - **Classes définies :** Le modèle a été entraîné pour distinguer les classes suivantes :
 - bee (Abeille domestique)
 - wasp / hornet (Guêpe / Frelon - pour éviter les faux positifs)
 - **Volume :** Utilisation d'un corpus d'environ **ex: 300 images** qualifiées.
- **Annotation & Préparation :**
 - **Augmentation de données (Data Augmentation) :** Pour pallier le nombre limité d'images et rendre le modèle robuste aux conditions extérieures, nous avons généré des variantes automatiques :
 - *Flip Horizontal* (Symétrie)
 - *Variations de luminosité* (+/- 15%)
 - *Flou gaussien* (pour simuler une abeille en mouvement rapide).

- **Stratégie de Données (Dataset) :**

Pour entraîner ces modèles, les sources suivantes sont utilisées :

- **Roboflow Universe :** Pour les images annotées de nichoirs (bounding boxes).
- **iNaturalist / Kaggle :** Pour les images de bouchons de nids (*Osmia cornuta*, *Mégachiles*) afin de classer le type de fermeture.
- **Volume cible POC :** Collecte de 100 photos de nichoirs entiers annotées.

6. Annexe Technique : Architecture Mobile Edge AI (POC Mobile)

Cette section détaille l'architecture logicielle de l'application mobile Android développée pour le prototype. L'approche retenue est celle du **"Edge AI"** (IA en périphérie), où l'inférence se fait directement sur le smartphone, sans connexion internet, garantissant autonomie et respect de la vie privée.

6.1. Stack Technique Mobile

Le développement repose sur les technologies natives Android modernes :

- **Langage** : Kotlin.
- **Interface Utilisateur (UI)** : Jetpack Compose (Material 3) pour une interface réactive et moderne.
- **Gestion Caméra** : CameraX (API ImageAnalysis) pour récupérer les flux vidéo bruts de manière optimisée.
- **Moteur IA** : TensorFlow Lite Support Library (pour exécuter le modèle sur mobile).
- **Architecture** : MVVM (Model-View-ViewModel) pour séparer la logique métier (détection) de l'interface graphique.

6.2. Structure du Projet (Arborescence)

Le code source est organisé selon les principes de la "Clean Architecture" simplifiée pour faciliter la maintenance :

```
android-app/
├── assets/
│   └── yolov8n_bees_v1_full_integer_quant.tflite # Le cerveau (Modèle IA Quantifié)
├── java/com/example/beedetetectionapp/
│   ├── data/
│   │   └── analyzer/
│   │       └── BeelImageAnalyzer.kt # Pont entre la Caméra et l'IA (Preprocessing)
│   └── model/
│       └── TFLiteObjectDetector.kt # Moteur d'inférence (Post-processing & NMS)
├── ui/
│   ├── components/ # Éléments graphiques (Overlay des boîtes)
│   ├── screens/
│   │   └── HomeScreen.kt # Écran principal avec prévisualisation Caméra
│   └── HomeViewModel.kt # Gestion de l'état (State Management)
```

6.3. Pipeline de Traitement "Edge AI"

L'application exécute une boucle de traitement optimisée pour la batterie et la performance temps réel :

1. **Acquisition (CameraX)** : Capture du flux vidéo frame par frame.
2. **Prétraitement (ImageAnalyzer)** :
 - Conversion de l'image YUV vers RGB.
 - Redimensionnement (Resize) en **640x640 pixels** (entrée requise par YOLO).
 - Normalisation des pixels (0-255 en UINT8 pour le modèle quantifié).
3. **Inférence (TFLite)** : Le modèle yolov8n_..._quant.tflite analyse l'image. Grâce à la **quantification INT8**, le modèle est 4x plus léger et plus rapide qu'un modèle classique, tournant facilement sur CPU mobile.
4. **Post-traitement** :
 - Décodage des sorties brutes (coordonnées \$x, y, w, h\$).
 - Filtrage par seuil de confiance (ex: > 50%).
 - Application du **NMS (Non-Maximum Suppression)** pour supprimer les détections en doublon sur le même objet.
5. **Rendu (Compose)** : Dessin des rectangles (Bounding Boxes) et des labels ("Bee", "Wasp") en superposition de la caméra (Overlay).

6.4. Modèle IA Embarqué

- **Architecture** : YOLOv8 Nano (la plus légère de la famille YOLO).
- **Entraînement** : Fine-tuning réalisé en Python sur le dataset personnalisé.
- **Optimisation** : Conversion au format .tflite avec **Quantification Full Integer (INT8)**. Cela permet de réduire la taille du modèle (passant de ~6Mo à ~1.5Mo) et d'accélérer l'exécution sur les processeurs ARM des smartphones.

6.5. Réalisation Technique du POC : Détection Visuelle (YOLO)

L'objectif unique de ce Proof of Concept (POC) est de valider la faisabilité technique de la reconnaissance d'abeilles (*Apis Mellifera*) en temps réel via une intelligence artificielle embarquée.

Pour la **démonstration finale**, nous avons choisi de réaliser une tâche ciblée et opérationnelle issue de notre POC. L'utilisation du modèle YOLO pour la détection d'abeilles permet de démontrer, dans un délai restreint, la viabilité technique et la faisabilité concrète de notre projet.

6.6. Entraînement du Modèle (Training)

Nous avons choisi l'architecture **YOLOv8 (You Only Look Once)** dans sa version **Nano (v8n)**. Ce choix est stratégique : c'est le modèle le plus léger, offrant le

meilleur compromis rapidité/précision pour un déploiement sur mobile ou microcontrôleur.

- **Environnement** : Entraînement réalisé en cpu de notre ordinateur
- **Hyperparamètres clés** :
 - *Image Size* : 640x640 pixels (standard YOLO).
 - *Epochs* : **ex: 50 ou 100** (Cycles d'apprentissage complets).
 - *Batch Size* : 16.
- **Transfer Learning** : Nous sommes partis des poids pré-entraînés (*pretrained weights*) sur le dataset COCO pour bénéficier de la capacité du modèle à reconnaître des formes génériques, avant de le spécialiser sur nos abeilles (*Fine-tuning*).

6.7. Déploiement Mobile & Application

Pour tester le modèle en conditions réelles ("Edge AI"), nous l'avons porté sur une application Android native.

- **Conversion TFLite** : Le modèle entraîné (best .pt) a été converti au format **TensorFlow Lite (.tflite)**.
- **Quantification (INT8)** : Nous avons appliqué une quantification *Full Integer*. Cela a permis de réduire la taille du modèle (passant de ~6 Mo à ~1.5 Mo) et d'accélérer l'inférence sur le processeur du smartphone sans perte significative de précision.
- **L'Application (Kotlin)** :
 - Utilisation de **CameraX** pour récupérer le flux vidéo.
 - Inférence en temps réel : L'appli dessine un cadre (Bounding Box) autour de l'abeille détectée avec le score de confiance (ex: *Bee 0.85*).

6.8. Tests Notebook

Cette section détaille le fonctionnement du notebook de test utilisé pour valider les performances du modèle **YOLOv8** sur le terrain.

Voici une version améliorée, plus professionnelle et structurée, idéale pour une intégration directe dans votre cahier des charges :

Tests Notebook (Validation du Modèle YOLO)

L'étape de test via le Notebook permet de valider la fiabilité de l'IA sur des données réelles avant son intégration finale.

A. Architecture du Notebook de Test

Le Notebook automatise l'inférence (prédiction) sur un jeu de données de test afin de confirmer visuellement la précision de la détection.

- **Moteur d'IA** : Exploitation du modèle optimisé via le fichier de poids `best.pt` généré lors de la phase d'entraînement.
- **Extraction des données** : Scan automatique du répertoire de test pour identifier et lister les fichiers sources
- **Traitement de l'image** : Application du modèle sur chaque frame avec un seuil de confiance de **0.25**, assurant un équilibre entre détection sensible et filtrage des faux positifs.
- **Interface de sortie** : Génération dynamique des boîtes labellisées avec un rafraîchissement d'affichage en temps réel pour une lecture fluide des résultats.

B. Protocole de Test et Validation

Pour garantir la robustesse du système, le protocole suivant est appliqué :

1. **Configuration** : Vérification de l'intégrité des chemins d'accès vers le modèle et les datasets de test.
2. **Exécution de l'inférence** : Lancement du script avec tri séquentiel des images pour assurer une continuité logique dans l'analyse de l'occupation du nichoir.
3. **Monitoring en temps réel** :
 - **Traçabilité** : Affichage systématique du nom du fichier pour corrélérer les erreurs éventuelles à des conditions de prise de vue spécifiques.
 - **Analyse Quantitative** : Décompte automatique des objets détectés (abeilles) pour valider le calcul du taux d'occupation.
 - **Analyse Qualitative** : Une temporisation de 5 secondes est instaurée pour permettre une vérification humaine rigoureuse de chaque détection.
4. **Critères de succès** : Le test est considéré comme concluant si les objets cibles sont correctement encadrés et si le taux de faux positifs reste négligeable.

6.9. Architecture IA (Pipeline du POC)

Le traitement de l'image suit un pipeline strict en 4 étapes, codé en Python :

1. **Acquisition** : prise de photo du nichoir.
2. **Localisation (YOLO)** : Utilisation d'un modèle **YOLOv8 Nano** (optimisé pour l'embarqué) fine-tuning pour détecter la classe `trou_de_nid`.
3. **Preprocessing** : Découpage automatique (crop) des zones d'intérêt (les trous).

4. **Classification (CNN)** : Analyse de chaque vignette par un modèle léger type **MobileNetV3** ou ResNet pour le statut Vide/Plein.

7. Critères de performance / KPIs

Indicateurs clés attendus :

- Précision (Accuracy) : > 95% pour la distinction des espèces dangereuses (Frelons).
- Fiabilité Détection (Recall) : > 98% pour l'occupation des tubes (ne pas rater un nid plein).
- Gain de temps pour l'apiculteur travaille 3 fois moins la semaine
- Marge d'erreur prévision récolte : < 3 jours.

8. Infrastructure Cloud & Coûts (AWS)

L'infrastructure retenue est **AWS** pour sa stabilité et sa complétude.

- **Stockage (S3 Standard)** : Estimation de 100 GB pour le POC (~2.43 USD/mois) ou jusqu'à 2 TB pour la prod (~65.67 USD/mois).
- **Entraînement (EC2)** : Utilisation d'instances GPU g4dn.xlarge pour le training. Coût estimé avec plan d'économie (Savings Plans) : ~262 USD/mois pour une utilisation intensive lors de la phase de développement.
- **Monitoring** : Instance EC2 légère (t4g.micro) pour le suivi continu (~4 USD/mois).
- **Budget total estimé (1 an)** : Environ **5,265.48 USD** pour une infrastructure complète de production (Training + Storage + Monitoring).

9. Organisation du Projet (Méthode & Planning)

Méthodologie

Le projet suit la méthode **CRISP-DM** (Cross-Industry Standard Process for Data Mining) en 6 étapes itératives : Compréhension métier, Compréhension des données, Préparation, Modélisation, Évaluation, Déploiement.

Les deux diagrammes de gantt sont des documents PDF joints a part.

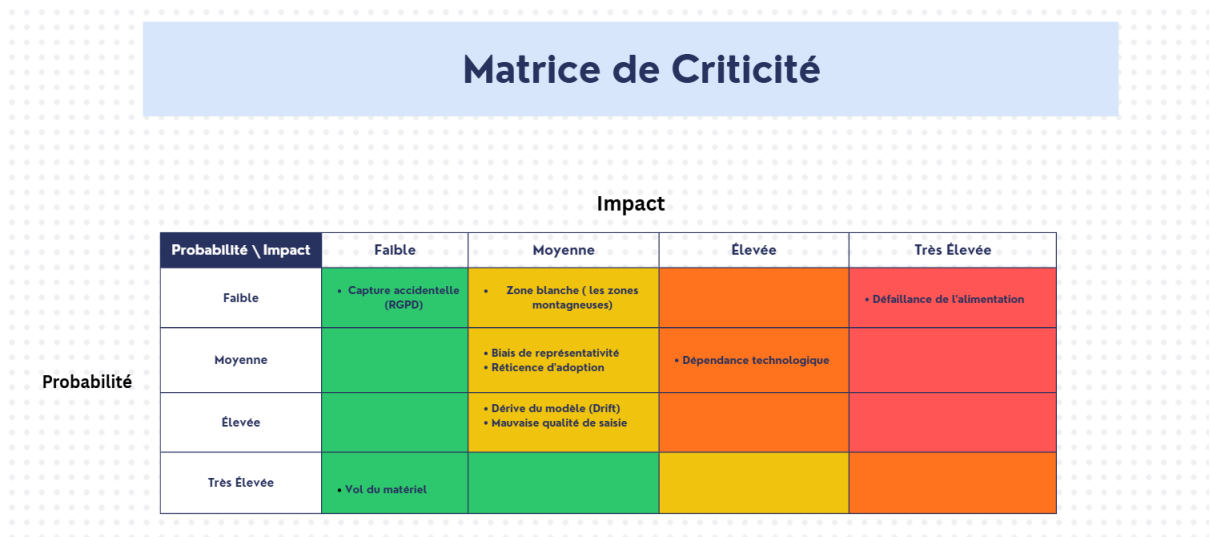
10. Risques identifiés

Selon la matrice de criticité établie, les risques majeurs sont ci-dessous dans le tableau et niveau risque juridique nous n'en avons pas . Bien que le dispositif utilise une caméra en extérieur, le projet a été conçu pour respecter strictement la vie privée (RGPD).

Risque	Probabilité	Impact	Mitigation (Solution)
Dérive du modèle (Drift)	Élevée	Moyen	Les sons de la reine ou l'aspect des nids changent. -> Réentraînement régulier.
Qualité de saisie	Élevée	Moyen	Capteurs encrassés par la propolis ou objectifs sales. -> Maintenance physique.
Défaillance Énergie	Faible	Très Élevé	Panne solaire en hiver. -> Batteries de secours et mise en veille profonde de l'IA.
Vol du matériel	Très Élevée	Faible	Matériel laissé en nature. -> Camouflage et ancrage, mais coût unitaire faible.

11. Annexes

Matrice de Criticité:

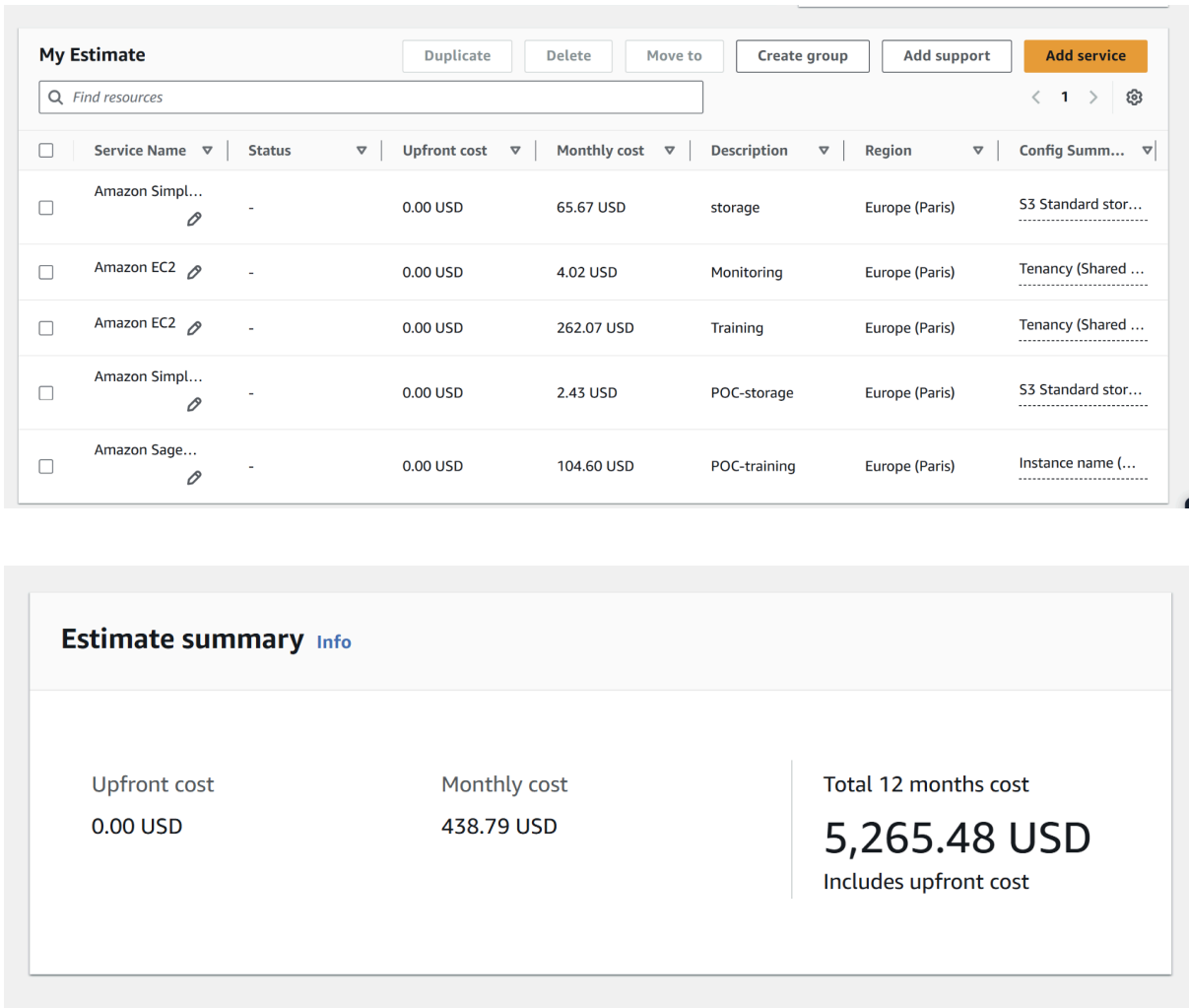


Matrice RACI :

Phase Globale du Projet	Chef de Projet (CP)	Ingénieur IA + Développeur	Développeur Hardware (HW)	Apiculteur Expert (AE)	Spécialiste Biodiversité (SB)
A. Initialisation du Projet (Définition du périmètre et du budget)	R, A	C	C	I	I

B. Collecte et Préparation des Données	A	R	C	C	C
C. Développement et Modélisation de l'IA	A	R	C	C	I
D. Intégration Hardware / IoT	A	C	R	I	I
E. Tests et Validation Terrain	A	C	C	R	C
F. Déploiement et Maintenance	R, A	R	R	I	I

Estimation des coûts :



SWOT : par grand groupe de projet

- Intelligence Artificielle et Diagnostic de Précision

FORCES :

- **Diagnostic sanitaire précis** : Capacité à reconnaître les espèces (mâle/femelle) et détecter les menaces externes comme les frelons ou les guêpes pour la protection de la colonie.
- **Analyse sonore avancée** : Détection du son vibratoire de la reine et diagnostic de l'état de la colonie (agitation, difficulté)
- **Gestion autonome** : Gestion de la température pour éliminer les parasites (Varroa) et prévenir l'essaimage.

FAIBLESSES :

- **Coût et complexité** : Nécessité d'un système d'IA embarquée coûteux et d'une complexité matérielle significative.
- **Dépendance aux données** : La performance dépend directement de la qualité et du volume des données d'entraînement (audio et visuelles).
- **Contraintes énergétiques** : Dépendance à l'alimentation solaire pour les composants IoT/IA

OPPORTUNITÉS :

- **Marché AgriTech** : Croissance de l'IA dans l'agriculture de précision offrant un contexte favorable.
- **Innovation technologique** : Possibilité de développer des fonctionnalités de détection précoce des maladies via l'image.

MENACES :

- **Concurrence Low-Cost** : Solutions de monitoring plus simples (poids, température) et beaucoup moins chères proposées par des concurrents.
- **Réglementation** : Risques liés à la législation sur l'IoT et la gestion des données agricoles

● Optimisation des Opérations d'Apiculture

FORCES :

- **Gain de temps et d'efficacité** : Planification automatisée des interventions et réduction de l'effort de l'apiculteur.
- **Anticipation** : prévision du moment optimal de la récolte et de la nécessité de diviser les ruches en cas de surcharge.
- **Logistique intelligente** : Gestion des stocks de miel et suggestion d'équipement à prévoir avant une visite

FAIBLESSES :

- **Algorithmes complexes** : Difficulté de créer des algorithmes de prévision fiables qui doivent gérer de nombreuses variables environnementales et internes.
- **Dépendance technologique** : Risque de perte de compétence traditionnelle ou de dépendance excessive à l'outil.

OPPORTUNITÉS :

- **Nouveaux services** : Développement d'applications mobiles intégrant l'historique et la logistique pour les apiculteurs.
- **Suivi des butineuses** : Estimation du taux de chargement en pollen pour confirmer l'efficacité de l'emplacement.

MENACES :

- **Aléas climatiques** : Les conditions météo imprévisibles peuvent rendre les prévisions de l'IA inefficaces.
- **Risque économique** : Une erreur de prévision (mauvaise récolte) peut entraîner des pertes financières directes.
- **Adoption difficile** : Réticence des apiculteurs traditionnels face à la technologie complexe

● **Extension de l'Écosystème aux Abeilles Sauvages**

FORCES :

- **Innovation matérielle unique** : Concept de tubes de nidification "intelligents" et instrumentés (capteurs, caméras).
- **Automatisation** : cartographie du taux d'occupation et système de barillet rotatif pour présenter des tubes vides automatiquement.
- **Maintenance facilitée** : Notification automatique pour l'ajout de modules ou le remplacement des tubes.

FAIBLESSES :

- **Coût d'installation élevé** : L'instrumentation des tubes représente un investissement initial important.
- **Durabilité** : Maintenance du hardware (caméras, capteurs) dans un environnement extérieur exposé aux éléments.

OPPORTUNITÉS :

- **Nouveau marché B2B** : Ouverture vers l'agriculture, l'éco-construction et les

parcs naturels (gestion des nids).

→ **RSE et Financement** : Accès aux fonds privés (Responsabilité Sociétale des Entreprises) axés sur la protection des pollinisateurs

MENACES:

→ **Pièges écologiques** : Risque que les hôtels deviennent des pièges à parasites s'ils sont mal conçus ou mal entretenus (bien que l'IA vise à résoudre cela).

→ **Vol ou vandalisme** : Risque accru pour du matériel technologique laissé en pleine nature sans surveillance constante.

● **Surveillance Écosystémique et Biodiversité**

FORCES :

→ **Valeur scientifique et écologique** : La ruche ne produit plus seulement du miel, mais monitorise la santé de l'écosystème local (recensement).

→ **Cartographie florale** : Analyse de la biodiversité (pollen, plantes) pour des décisions stratégiques sur l'emplacement.

→ **Bio-indication** : Capacité potentielle à détecter la pollution (pesticides, métaux lourds) via l'analyse du pollen

FAIBLESSES:

→ **Exigence des données** : Nécessité d'entraîner l'IA à reconnaître une très grande diversité d'insectes (bourdons, osmies, etc.).

→ **Complexité de l'analyse** : Interprétation des données de biodiversité qui nécessite une expertise pointue.

OPPORTUNITÉS:

→ **Élargissement du public cible** : Intérêt des chercheurs, ONG, et collectivités locales au-delà des apiculteurs classiques.

→ **Conseil environnemental** : L'IA peut suggérer de planter des types de fleurs spécifiques si la diversité chute.

→ **Subventions** : Accès aux aides gouvernementales pour la protection de la biodiversité.

MENACES:

→ **Qualité des données** : Risque de diagnostics erronés si la diversité des données d'entraînement est insuffisante.

→ **Pertinence locale** : Difficulté d'adapter le modèle de reconnaissance à tous les écosystèmes locaux spécifiques.

FORCES :

- Avantage écologique et scientifique
- diagnostic sanitaire de précision
- Innovation matérielle poussée
- Flexibilité et extensibilité de l'écosystème

FAIBLESSES:

- Le coût élevé des installations IOT
- Complexité de l'hardware
- Dépendance à l'alimentation solaire
- Maintenance et durabilité

OPPORTUNITÉS:

- Le concept de gestion des nids pour les **abeilles sauvages** ouvre la voie à un marché B2B (hôtels à insectes, agriculture).
- Financement de la biodiversité et la responsabilité sociale des entreprises
- Explosion du marché de l'IA agricole
- Élargissement du public cible

MENACES:

- Le climat, voir si l'ia est efficace pour les prévisions. On pourrait avoir une perte économique.
- Acceptation des apiculteurs traditionnels (faiblesse d'adoption)
- Concurrence des "Géants" du Monitoring (solutions plus simples mais moins chères)
- Qualité et diversité des données d'entraînement

CRISP-DM : Pour chaque projet

- **Compréhension Métier** : L'objectif est de définir clairement les objectifs du projet

Groupe de Projet	Objectif IA/Modélisation	Critères de Succès
Reconnaissance des Espèces	Classifier les insectes entrants (abeilles mâle/femelle pour la reproduction et les espèces externes comme les guêpes/frelons pour la protection).	Précision (Accuracy) > 95% pour la détection des menaces.
Diagnostic Sonore	Détecter la présence et le son vibratoire de la reine et reconnaître l'état de la colonie (agitée ou en difficulté).	Sensibilité (True Positive Rate) de détection du son de la reine > 90 %.
Optimisation des Opérations	Prédire le moment optimal de la récolte et prévoir la division des ruches en cas de surcharge.	Marge d'erreur de prévision de récolte (RMSE) < 3 jours.
Surveillance de la Biodiversité	Cartographie florale (reconnaissance) et recensement automatisé de la biodiversité (le dénombrement).	Augmentation significative de la richesse et de l'abondance des espèces recensées par rapport à l'observation manuelle.
Gestion des Abeilles Sauvages	Détecter l'occupation des tubes (reconnaissance ?) de nidification instrumentés pour anticiper la nécessité de remplacement ou l'installation de nouveaux hôtels.	Taux de fiabilité de la détection d'occupation > 98 %. Réduction du temps de surveillance manuelle

--	--	--

- **Compréhension des données :**

Identification, collecte et examen initial des jeux de données brutes.

- **Données de Vision (Classification)** : Flux vidéo/images haute résolution des entrées de ruche et des zones de biodiversité.
- **Données Audio (Diagnostic)** : Enregistrements audio internes de la ruche (vibrations de la reine, bourdonnement).
- **Données de Capteurs (Séries Temporelles)** : Poids (pour la prévision de récolte), température, humidité. Données des capteurs instrumentés des tubes de nidification (occupation).
- **Données géospatiales** : Coordonnées GPS pour l'emplacement stratégique et la cartographie florale.

- **Préparation des données :**

Sélection des données pertinentes, nettoyage, construction et formatage final pour l'entraînement.

- **Nettoyage et filtrage** : Débruitage des enregistrements audio (suppression du bruit de fond externe, vent). Correction ou suppression des lectures aberrantes des capteurs (poids).
- **Features Engineering** : Transformation des signaux audio en spectrogrammes pour l'analyse spectrale. Extraction des caractéristiques temporelles (tendances de poids) pour les modèles de prévision.
- **Annotation et Labellisation** : Annotation précise (par des experts apicoles et des biologistes) de tous les jeux de données (identification d'espèces , marquage temporel du son de la reine , étiquetage de l'état de stress).

- **Modélisation :**

Sélection et application des techniques de modélisation.

- **Vision (Reconnaissance des Espèces et Biodiversité)** : Mise en œuvre de Réseaux Neuraux Convolutifs (CNN) pour l'inférence en temps réel sur l'IA embarquée.
- **Audio (Diagnostic Sonore)** : Utilisation de modèles de Deep Learning (par exemple, CNN sur les spectrogrammes) pour la classification d'événements audio et la détection d'anomalies.

- **Séries Temporelles (Optimisation des Opérations)** : Application de modèles d'apprentissage automatique (comme Random Forest) pour la prévision de la masse et du moment optimal de la récolte.
- **Déploiement Embarqué (Edge AI)** : Les modèles choisis doivent être optimisés et compressés (quantification, élagage) pour fonctionner efficacement sur le matériel de faible puissance de la ruche.

- **Evaluation :**

Évaluer la performance des modèles et leur adéquation aux objectifs métier.

- **Métriques Techniques** : Mesurer la *F1-score*, la *Précision* et le *Rappel* pour les tâches de classification (menaces, reine, espèces). Calculer l'*Erreur Quadratique Moyenne (RMSE)* et l'*Erreur Absolue Moyenne (MAE)* pour les modèles de prévision de récolte.
- **Validation croisée** : Utiliser des jeux de données de validation et de test distincts pour garantir la généralisation du modèle et éviter le surapprentissage.
- **Validation Métier** : Confirmer avec l'apiculteur expert que les alertes et les diagnostics générés (ex: planification des interventions , alerte de frelon) sont opérationnellement pertinents et fiables.

- **Déploiement :**

Intégration et maintenance des modèles d'IA dans le système final.

- **Intégration matérielle (Hardware)** : Finaliser l'intégration des modèles optimisés sur la puce d'IA embarquée(NPU) (microcontrôleur ou processeur Edge).
- **Mécanisme d'Alerte** : Déployer l'infrastructure logicielle pour générer les alertes en temps réel (diagnostic sonore , attaques externes) et les plans d'intervention vers l'interface utilisateur.
- **Maintenance et Monitoring** : Mettre en place un processus de surveillance des performances du modèle en production (*Model Drift*) et de collecte de nouvelles données pour les mises à jour et l'amélioration continue (durabilité de l'écosystème).