

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ ABDELHAMID IBN BADIS - MOSTAGANEM



Faculté des Sciences Exactes et d'Informatique
Département de Mathématiques et informatique
Filière : Informatique

RAPPORT DE MASTER 2

Option : Intelligence Artificielle et Internet des Objets (IA&IoT)

THÈME :

**Système de navigation intelligent pour les non-voyants et
les malvoyants**

Présenté par : DJELTI Ilyes

HADJAIL Ines

MENAD Nadjat

MERZOUG Zoubida

Encadré par:

Madame BENHAMED Siham

Projet soutenu dans le cadre de l'arrêté 1275

Année Universitaire 2023-2024

Résumé

Les personnes non-voyantes rencontrent fréquemment des obstacles dans leur vie quotidienne, notamment des difficultés liées à la mobilité. Ces défis peuvent limiter leur indépendance et leur qualité de vie. Afin de répondre à ces besoins, nous proposons un modèle de navigation intelligent et innovant intégré dans des lunettes équipées d'un ensemble de capteurs tels que la caméra, le wifi et l'audio.

Pour ce faire, notre approche consiste à traiter en temps réel les séquences filmées par une caméra. Ce traitement repose sur la reconnaissance des objets à partir des séquences collectées par la caméra, ainsi que sur l'utilisation de méthodes d'intelligence artificielle (IA). Ces méthodes incluent la détection d'objets, le traitement de la parole et des images, ainsi que la génération de parole à partir de texte.

Notre modèle est conçu pour fournir une assistance précieuse aux non-voyants et aux malvoyants, en leur permettant de se déplacer plus facilement et en toute sécurité. En surmontant ces obstacles, nous visons à offrir à cette population une vie plus autonome et enrichissante, leur permettant de participer pleinement à la société et de mener une vie plus épanouie.

Mots-clés :

Personnes non-voyantes, Personnes malvoyants, Obstacles, Système de navigation intelligent, Dispositif innovant, Sécurité, Indépendance, Qualité de vie, Autonomie.

Abstract

Blind individuals frequently encounter obstacles in their daily lives, particularly with mobility challenges. These difficulties can limit their independence and quality of life. To address these needs, we propose an intelligent and innovative navigation model integrated into glasses equipped with a set of sensors such as a camera, Wi-Fi, and audio.

To achieve this, our approach involves processing real-time footage captured by a camera. This processing is based on object recognition from the sequences collected by the camera and utilizes artificial intelligence (AI) methods. These methods include object detection, speech and image processing, and text-to-speech generation.

Our model is designed to provide valuable assistance to blind and visually impaired individuals, enabling them to move around more easily and safely. By overcoming these obstacles, we aim to offer this population a more autonomous and fulfilling life, allowing them to fully participate in society and lead more enriched lives.

Keywords:

Blind people, visually impaired person, obstacles, Intelligent navigation system, Innovative device, Security, Independence, Quality of life, Autonomy.

ملخص

يواجه الأشخاص المكفوفون بشكل متكرر عقبات في حياتهم اليومية، لا سيما فيما يتعلق بتحديات التنقل. يمكن أن تحد هذه الصعوبات من استقلاليتهم وجودة حياتهم. لتلبية هذه الاحتياجات، نقتراح نموذجًا للتنقل الذكي والمبتكر مدمجًا في نظارات مجهزة بمجموعة من المستشعرات مثل الكاميرا والواي فاي والصوت.

لتحقيق ذلك، تعتمد طريقتنا على معالجة اللقطات في الوقت الفعلي التي تلتقطها الكاميرا. تعتمد هذه المعالجة على التعرف على الكائنات من التسلسلات التي تجمعها الكاميرا وتستخدم أساليب الذكاء الاصطناعي (AI) تشمل هذه الأساليب اكتشاف الكائنات، معالجة الكلام والصور، وتحويل النص إلى كلام.

تم تصميم نموذجنا لتقديم مساعدة قيمة للأشخاص المكفوفين وضعاف البصر، مما يمكنهم من التنقل بسهولة وأمان أكبر. من خلال التغلب على هذه العقبات، نهدف إلى تقديم حياة أكثر استقلالية وإثراءً لهذه الفئة، مما يسمح لهم بالمشاركة الكاملة في المجتمع وعيش حياة أكثر إثراءً.

الكلمات الرئيسية:

الأشخاص المكفوفون ، الأشخاص ضعاف البصر، عقبات، نظام التنقل الذكي، جهاز مبتكر، الأمان، الاستقلالية، جودة الحياة، الاستقلالية.

Dédicaces

Je dédie ce projet de fin d'études à tous ceux qui ont contribué à sa réalisation, de près ou de loin.

Merci à vous tous et merci à ma famille.

DJELTI Ilyes.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

Mes chers parents, que nulle dédicace ne puisse exprimer mes sincères sentiments, pour leur aide,
Mes chers amis, qui sans leurs encouragements ce travail n'aurait jamais vu le jour. Et à toute ma
famille, et à tous ceux que j'aime.

HADJAIL Ines.

Dédicaces

À mes parents,

Sources inépuisables d'amour et de soutien,
Qui m'ont inculqué les valeurs du travail et de la persévérance,
Je dédie ce mémoire, fruit de mes efforts et de ma détermination.

À mes frères et sœurs,

Complices de toujours et piliers de ma vie,
Merci pour vos encouragements et votre présence constante,
Vous avez toujours cru en moi, même lorsque j'en doutais.

À mes amis,

Rayons de soleil qui illuminent mon quotidien,
Merci pour votre amitié indéfectible et votre joie de vivre,
Vous avez rendu cette aventure inoubliable.

À mes enseignants,

Qui ont partagé leur savoir et transmis leur passion,
Je vous remercie pour votre guidance et vos précieux conseils,
Ils ont été essentiels à mon épanouissement intellectuel.

MENAD Nadjat.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire

À mes chers Parents,

Pour votre amour et vos sacrifices, merci du fond du cœur. Que Dieu vous protège et vous garde.

À ma sœur douce Alae et mon cher frère Rayene,

Je vous aime et vous souhaite tout le succès du monde.

À ma petite nièce adorée Malek,

Tu es une source de joie et de bonheur. Je t'aime très fort, petite étoile.

À toute ma famille.

À tous mes cher(e)s ami(e)s.

Sans oublier tous les professeurs, du primaire à l'enseignement supérieur.

MERZOUQ Zoubida.

Remerciements

Nos remerciements vont à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire de fin d'études. Nous tenons à exprimer notre entière gratitude envers Madame Siham BENCHAMMED qui nous a pleinement encadrés, judicieusement conseillés et orientés. Nos remerciements les plus sincères sont adressés à Messieurs BENAMER, MDJAHED, MOUSSA, et KHLIFA. Nous remercions énormément Monsieur le président du jury ainsi que les membres du jury, pour avoir accepté de consulter et d'évaluer notre travail. Nos remerciements les plus vifs vont à notre faculté FSEI, plus précisément au département d'informatique, et à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation, ainsi qu'à tous ceux qui ont collaboré de près ou de loin à la réalisation de ce présent travail.

Liste des figures

Figure 1 : Homme malvoyant utilisant une canne blanche.....	8
Figure 2: Un mal voyant marchant avec un chien de guide.....	8
Figure 3: Un mal voyant marchant avec un guide humain	9
Figure 4: Méthodes de Machine Learning [15]	12
Figure 5: Exemple de segmentation [44].....	16
Figure 6: Exemple de détection de contour [46]	17
Figure 7: Raspberry pi 3 Model B.....	19
Figure 8: Emplacement des différents composants du Raspberry Pi 3 Modèle B	19
Figure 9: Module de Caméra Raspberry Pi	20
Figure 10: Capteur Ultrasonique HC-SR04.....	21
Figure 11: Capteur infrarouge	22
Figure 12: Capteur d'inertie.....	22
Figure 13: Capteur magnétique	23
Figure 14: Capteur de positionnement	24
Figure 15: Capteur audio.....	24
Figure 16 : Capteur de lumière.....	25
Figure 17: Capteur de pression.....	26
Figure 18 : Capteur de température	26
Figure 19 Capteur LIDAR	27
Figure 20: Modèle de navigation intelligent.....	33
Figure 21: Diagramme de la séquence du système.....	34
Figure 22: Architecture des capteurs	35
Figure 23: Diagramme de cas d'utilisation de l'utilisateur.....	36
Figure 24: Diagramme de cas d'utilisation de lunette	36
Figure 25: Diagramme de séquence des capteurs.....	37
Figure 26: Organigramme de la reconnaissance.....	38
Figure 27: Organigramme de prétraitement des données	39
Figure 28: Exemple de conversion	41
Figure 29: Exemple de validation.....	41
Figure 30: Intégration des données dans la base de donnée	42
Figure 31: Organigramme de traitement des données	42
Figure 32: Exemple d'identification d'obstacle	43
Figure 33: Organigramme de la décision	44
Figure 34 : Composants pour la conception de lunettes intelligentes.....	47
Figure 35: Exemple de séquence d'une vidéo avant la détection	51
Figure 36: Exemple de détection d'objets par YOLOv5.....	52
Figure 37: Exemple de sortie du terminal	52

Liste des tableaux

Tableau N°	Titre du tableau	Page
Tableau 1	Méthodes de Machine Learning	12
Tableau 2	Méthodes du Deep Learning	14
Tableau 3	Tableau des packages	47
Tableau 4	Conception lunette	55
Tableau 5	Personnels lunav	55
Tableau 6	Les besoins de lunav	56

Liste des abréviations

Abréviation	Expression Complète
IoT	Internet Of Things
IA	Intelligence artificielle
SNI	Systèmes de Navigation Intelligents
SVM	Machines à Vecteurs de Support
KNN	K plus proches voisins
PCA	Analyse en composantes principales
ANN	Réseaux de neurones artificiels
CNN	Réseaux de neurones convolutifs
RNN	Réseaux de neurones récurrents
LSTM	Long Short-Term Memory
GAN	Réseaux de neurones adverses génératifs
NLP	Traitement du langage naturel
YOLO	You Only Live Once

Table des matières

Introduction Générale	4
Chapitre 1 Méthodes intelligentes de navigation	6
1.1 Introduction.....	6
1.2 Besoins spécifiques des non-voyants et malvoyants en matière de navigation :.....	6
1.3 Méthodes Traditionnelles de Navigation	7
1.3.1 Canne blanche	8
1.3.2 Chien guide	8
1.3.3 Techniques d'orientation et de mobilité.....	9
1.3.4 Guidage humain	9
1.4 Fondements de l'Intelligence Artificielle dans la Navigation.....	9
1.4.1 Machine Learning	10
1.4.2 Deep Learning.....	13
1.4.3 Navigation par IA.....	15
1.5 Traitement d'image.....	16
1.5.1 Segmentation.....	16
1.5.2 Détection de contour	17
1.6 Conclusion	17
Chapitre 2 Technologie IoT pour la navigation.....	18
2.1 Introduction.....	18
2.2 Présentation du Raspberry Pi :	18
2.3 Les capteurs	19
2.3.1 Capteurs Utilisés dans les systèmes de navigation	20
2.3.2 Rôle des capteurs dans les systèmes de navigation	28
2.4 Les avantages et les limites des capteurs sélectionnés	29
2.4.1 Caméra :	29
2.4.2 Capteurs de distance ultrasoniques :.....	29
2.4.3 Capteurs infrarouges :	29

2.4.4	Accéléromètre et gyroscope :	30
2.4.5	Boussole électronique (magnétomètre) :	30
2.4.6	Module GPS :	30
2.4.7	Module de reconnaissance vocale :	30
2.4.8	Capteurs de luminosité ambiante, pression/altitude et température :	31
2.5	Conclusion	31
Chapitre 3 Conception du modèle de navigation proposée		32
3.1	Introduction.....	32
3.1.1	Modèle de navigation Intelligent.....	32
3.2	Conclusion	45
Chapitre 4 Implémentation du modèle de navigation.....		46
4.1	Introduction :	46
4.2	Système de navigation	46
4.2.1	Lunettes Intelligentes : caractéristiques.....	46
4.2.2	Développement de système de navigation	47
4.3	Langages, environnements et outils de développement :	48
4.3.1	Outils de Programmation	48
4.3.2	Environnement de Développement	49
4.3.3	Modèle de Détection d'Objets YOLOv5	49
4.4	Les packages Utilisés:	49
4.5	Démonstration de la fonctionnalité de la caméra des lunettes	51
4.5.1	Image avant la détection.....	51
4.5.2	Image après la détection d'objets.....	52
4.5.3	Explication des valeurs de précision	52
4.6	Fonctionnalités de Reconnaissance de Texte, Connexion et Audio.....	53
	Reconnaissance de Texte	53
	Connexion.....	53
4.6.1	Audio.....	54
4.7	Conclusion	54
Conclusion Générale.....		55
Annexe A: Business Model Canvas.....		57
Annexe B : Business Plan.....		58

Introduction Générale

L'intelligence artificielle et l'Internet des Objets ont profondément transformé notre quotidien, ouvrant la voie à une nouvelle ère d'innovation et de possibilités. Ces avancées technologiques ont révolutionné de nombreux aspects de notre vie, de la manière dont nous communiquons et travaillons à la façon dont nous interagissons avec notre environnement. Parmi les domaines les plus impactés figurent les systèmes de navigation, où l'intégration de l'IA et de l'IOT a ouvert de nouvelles perspectives pour des solutions plus intelligentes et adaptatives.

Les systèmes de navigation ont bien tiré un profit de l'intégration de l'IA et de l'IOT, ils sont devenus plus intelligents, plus efficaces et plus fluides, donnant des fonctionnalités comme la navigation en temps réel, la reconnaissance vocale, la prédiction des besoins de l'utilisateur en fonction de ses habitudes de déplacement et l'intégration avec d'autres systèmes.

L'exploitation de l'intelligence artificielle dans les systèmes de navigation [1] a permis aux machines d'apprendre, de raisonner et de prendre des décisions de manière autonome, transformant ainsi notre compréhension de la navigation. Grâce à des algorithmes sophistiqués et à des réseaux de neurones profonds, les systèmes de navigation sont désormais capables d'analyser des données complexes en temps réel, de prédire les schémas de déplacement et de s'adapter aux besoins individuels des utilisateurs. Cette capacité d'adaptation dynamique est cruciale pour répondre aux défis uniques rencontrés par certaines communautés, telles que les non-voyants, en matière de navigation.

Afin de tirer parti des méthodes IA et de la technologie IoT pour rendre les personnes non-voyantes et les personnes malvoyantes plus autonome que possible, nous proposons un système de navigation intelligent intégré dans des lunettes. Ces lunettes se composent d'un ensemble de capteurs tels que des capteurs Camera, capteurs de distance, CPU, GPS Module for Jetson Nano, Capacitive Touch Sensor Module qui fonctionne avec l'intelligence artificielle visant à faciliter le déplacement de ces gens en garantissant leur sécurité. Les méthodes IA utilisées incluent les méthodes de Deep Learning (Détection d'objets, Réseaux de neurones convolutifs) et les méthodes de Machine Learning (reconnaissance vocale, reconnaissance de texte).

Dans ce mémoire, nous introduisons notre système de navigation intelligent à travers quatre chapitres :

Dans le premier chapitre « Méthodes intelligentes de navigation », nous présenterons le rôle de l'intelligence artificielle dans la navigation, les besoins des non-voyants, et nous citerons les méthodes Machine Learning et Deep Learning utilisées dans les systèmes de navigation.

Dans le deuxième chapitre intitulé « Technologie IoT pour la navigation », nous présenterons la description des capteurs utilisés dans les systèmes de navigation, leurs avantages et leurs inconvénients.

Dans le troisième chapitre intitulé « Conception du système », nous présenterons notre modèle de navigation intelligent en expliquant ces différents composants.

Dans le quatrième chapitre « Implémentation du modèle de navigation », nous parlerons de l'implémentation dont le langage utilisé, l'environnement, et modèle de détection d'objet.

Ce mémoire inclut deux annexes essentielles qui fournissent une vue d'ensemble approfondie de la stratégie et de la planification commerciale de notre projet.

L'Annexe A : Business Model Canvas présente notre modèle économique de manière concise et structurée

L'Annexe B : Business Plan détaille notre stratégie opérationnelle et financière pour la mise en œuvre et le développement de notre projet de navigation intelligente.

Enfin, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale.

Chapitre 1

Méthodes intelligentes de navigation

1.1 Introduction

Les Systèmes de Navigation Intelligents (SNI) [2] représentent une évolution significative dans le domaine de la navigation, offrant des solutions sur mesure pour répondre aux besoins variés des différentes communautés. Au cœur de ces systèmes se trouvent les méthodes intelligentes de navigation, qui tirent parti des avancées de l'intelligence artificielle et du traitement d'image pour permettre à la machine de prendre des décisions réactives et adaptatives.

Dans ce chapitre, nous parlerons des besoins spécifiques des non-voyants, nous présentons les méthodes intelligentes de navigation et les méthodes traditionnelles explorant les méthodes avancées de machine learning pour la navigation. Nous allons aussi présenter les principales méthodes de traitement d'image qui contribuent dans la conception des systèmes de navigation.

Les méthodes intelligentes de navigation vont au-delà de la simple cartographie et du guidage, en permettant à la machine de comprendre son environnement, d'anticiper les besoins de l'utilisateur et de réagir de manière contextuelle en fonction des connaissances acquises.

1.2 Besoins spécifiques des non-voyants et malvoyants en matière de navigation :

Les Besoins spécifiques de navigation des personnes non-voyantes et malvoyante se basent au tour des cinq points suivants : l'accessibilité totale, la précision et fiabilité, la navigation piétonne sécurisée, l'indications détaillées, la reconnaissance et signalement des obstacles et la personnalisation.

- **Accessibilité totale** : Les non-voyants et les malvoyants ont besoin d'un système de navigation qui soit entièrement accessible, sans dépendance visuelle. Cela inclut des interfaces utilisateur vocales claires ou gestuelles intuitives.
- **Précision et fiabilité** : Étant donné qu'ils ne peuvent pas utiliser la vision pour compenser les erreurs de navigation, les non-voyants et les malvoyants dépendent fortement de la précision et de la fiabilité du système. Des indications précises sur les directions à suivre et les obstacles à éviter sont essentielles.
- **Navigation piétonne sécurisée** : Les non-voyants et les malvoyants se déplacent principalement à pied, donc un système de navigation doit prendre en compte les caractéristiques piétonnes telles que les trottoirs, les passages piétons et les intersections complexes pour assurer une navigation sûre.
- **Indications détaillées** : Les indications fournies par le système de navigation doivent être détaillées et spécifiques. Par exemple, plutôt que de simplement dire "tournez à droite", le système devrait indiquer clairement quelle rue emprunter et à quelle distance se trouve le virage.
- **Reconnaissance et signalement des obstacles** : Le système doit être capable de détecter et de signaler les obstacles potentiels sur le trajet, tels que les marches, les travaux routiers et les obstacles imprévus.
- **Intégration de la réalité augmentée ou des sons directionnels** : Des fonctionnalités telles que la réalité augmentée ou les sons directionnels peuvent aider les non-voyants à se repérer dans leur environnement en fournissant des informations auditives ou tactiles sur les directions à suivre.
- **Personnalisation** : Les non-voyants peuvent avoir des préférences individuelles en matière de navigation, donc un système devrait offrir des options de personnalisation pour s'adapter aux besoins de chaque utilisateur.

1.3 Méthodes Traditionnelles de Navigation

Les méthodes traditionnelles de navigation pour les non-voyants et les malvoyants reposent sur des techniques tactiles et auditives qui leurs offrent l'opportunité de se déplacer d'une manière autonome en toute sécurité, voici quelques méthodes :

1.3.1 Canne blanche

La canne blanche est l'un des outils les plus couramment utilisés par les non-voyants pour la navigation. Elle permet aux utilisateurs de détecter les obstacles à venir en les effleurant avec la canne, offrant ainsi une forme de navigation tactile.

La figure 1 montre un homme malvoyant marchant avec une canne blanche pour se guider sur le trottoir d'une rue urbaine.



Figure 1 : Homme malvoyant utilisant une canne blanche

1.3.2 Chien guide

Les chiens guides sont des animaux spécialement dressés pour aider les non-voyants à se déplacer en toute sécurité. Ces chiens sont formés pour naviguer dans différents environnements, éviter les obstacles et suivre des instructions verbales de leur maître.

La figure 2 montre une personne malvoyante marchant avec une canne blanche et tenant en laisse un chien guide.



Figure 2: Un mal voyant marchant avec un chien de guide

1.3.3 Techniques d'orientation et de mobilité

Les non-voyants apprennent souvent des techniques spéciales pour s'orienter et se déplacer en toute sécurité dans leur environnement. Cela peut inclure l'utilisation de repères auditifs, tels que le bruit de la circulation ou les sons environnementaux, ainsi que des repères tactiles, comme les bordures de trottoir ou les rampes d'escalier.

1.3.4 Guidage humain

Dans certaines situations, les non-voyants peuvent compter sur l'aide d'une personne voyante pour les guider dans un environnement complexe ou inconnu. Cela peut impliquer de donner des instructions verbales, de tenir le bras de la personne voyante ou d'utiliser des signaux tactiles pour communiquer.

La figure 3 montre une personne malvoyante utilisant une canne blanche, accompagnée par une autre personne qui lui tient le bras pour l'aider à marche.



Figure 3: Un mal voyant marchant avec un guide humain

1.4 Fondements de l'Intelligence Artificielle dans la Navigation

En plus des méthodes traditionnelles, les non-voyants peuvent également utiliser des technologies spéciales conçues pour les aider à naviguer [3]. Cela peut inclure des applications mobiles de navigation vocale, des dispositifs portables de guidage et des systèmes GPS spécialement adaptés. Ces solutions sont basées sur des méthodes d'intelligence artificiel.

L'un des piliers de l'intelligence artificielle dans la navigation est la capacité à percevoir et à comprendre l'environnement. Cela peut être réalisé à l'aide de capteurs tels que des caméras, des lidars ou des radars pour collecter des données sur les obstacles, les routes, les piétons et autres éléments environnementaux.

Une fois que les données de l'environnement sont collectées, l'intelligence artificielle les utilise pour créer des modèles tridimensionnels de l'environnement et pour générer des cartes détaillées. Ces modèles et cartes sont essentiels pour planifier des trajets efficaces et sûrs.

L'intelligence artificielle utilise également les données des capteurs pour estimer la position et l'orientation de la machine par rapport à son environnement [4]. Cela permet au système de navigation de connaître précisément la position de l'utilisateur et de le guider efficacement.

Une fois que la machine a une perception précise de son environnement et de sa propre position, elle peut utiliser des algorithmes d'intelligence artificielle pour planifier des trajectoires sûres et efficaces vers la destination souhaitée. Cela implique de prendre en compte les obstacles, les règles de circulation et les préférences de l'utilisateur.

L'intelligence artificielle permet à la machine de prendre des décisions en temps réel en fonction des informations disponibles et des objectifs de navigation. Cela peut inclure des ajustements de trajectoire en cas de changements dans l'environnement ou des détours pour éviter les obstacles imprévus.

L'utilisation de techniques d'apprentissage automatique permet à la machine d'améliorer ses performances de navigation au fil du temps [5]. En analysant les données de navigation et en recevant des retours d'expérience de l'utilisateur, l'intelligence artificielle peut ajuster ses modèles et ses décisions pour devenir plus précise et efficace.

1.4.1 Machine Learning

Le Machine Learning est un sous-ensemble de l'intelligence artificielle (IA) [6]. Cette technologie vise à apprendre aux machines à tirer des enseignements des données et à s'améliorer avec l'expérience, au lieu d'être explicitement programmées pour le faire. Dans le Machine Learning, les algorithmes sont entraînés à trouver des patterns et des corrélations dans de grands ensembles de données, ainsi qu'à prendre les meilleures décisions et à émettre les meilleures prévisions en s'appuyant sur leur analyse. Avec la pratique, les applications du Machine Learning s'améliorent. Et plus le volume de données auxquelles elles ont accès est important, plus elles deviennent précises.

Les Méthodes de Machine Learning utilisées dans les systèmes de navigation sont :

- **Régression linéaire** [7] : Cette méthode est utilisée pour prédire des valeurs continues en se basant sur des variables indépendantes. L'entrée consiste en un ensemble de variables indépendantes, tandis que la sortie est une valeur continue prédite.

- **Régression logistique** [8] : Cette technique est employée pour prédire des variables binaires en se basant sur des variables indépendantes. L'entrée comprend un ensemble de variables indépendantes, et la sortie est une probabilité associée à une classe binaire.
- **Arbres de décision** [9] : Les arbres de décision sont utilisés pour la classification et la régression en divisant l'ensemble des données en sous-ensembles plus petits basés sur des caractéristiques. L'entrée est constituée des caractéristiques des données, tandis que la sortie est une décision de classification ou une valeur prédite pour la régression.
- **Forêts aléatoires** [10] : Cette méthode est une extension des arbres de décision, où plusieurs arbres de décision sont combinés pour améliorer la précision et la robustesse. L'entrée et la sortie sont similaires à celles des arbres de décision.
- **Machines à Vecteurs de Support (SVM)** [11] : Les SVM sont utilisées pour la classification en trouvant l'hyperplan qui sépare au mieux les différentes classes. L'entrée comprend les caractéristiques des données, et la sortie est la classe prédite pour chaque instance.
- **K plus proches voisins (KNN)** [12] : Cette méthode est utilisée pour la classification en identifiant les k voisins les plus proches d'un point et en attribuant une classe basée sur la majorité de ces voisins. L'entrée consiste en les caractéristiques des données, et la sortie est la classe prédite pour chaque instance.
- **Clustering K-means** [13] : Cette technique est utilisée pour regrouper des données non étiquetées en k clusters en minimisant la variance intra-cluster. L'entrée est constituée des données non étiquetées, et la sortie est l'attribution de chaque instance à un cluster spécifique.
- **Analyse en composantes principales (PCA)** [14] : L'analyse en composantes principales est utilisée pour réduire la dimensionnalité des données en trouvant les directions qui maximisent la variance. L'entrée est constituée des données originales, tandis que la sortie est une transformation des données dans un nouvel espace de dimensions réduites.

La figure 4 représente une classification hiérarchique des algorithmes d'analyse de données, classés en deux branches principales : l'apprentissage supervisé et l'apprentissage non supervisé.

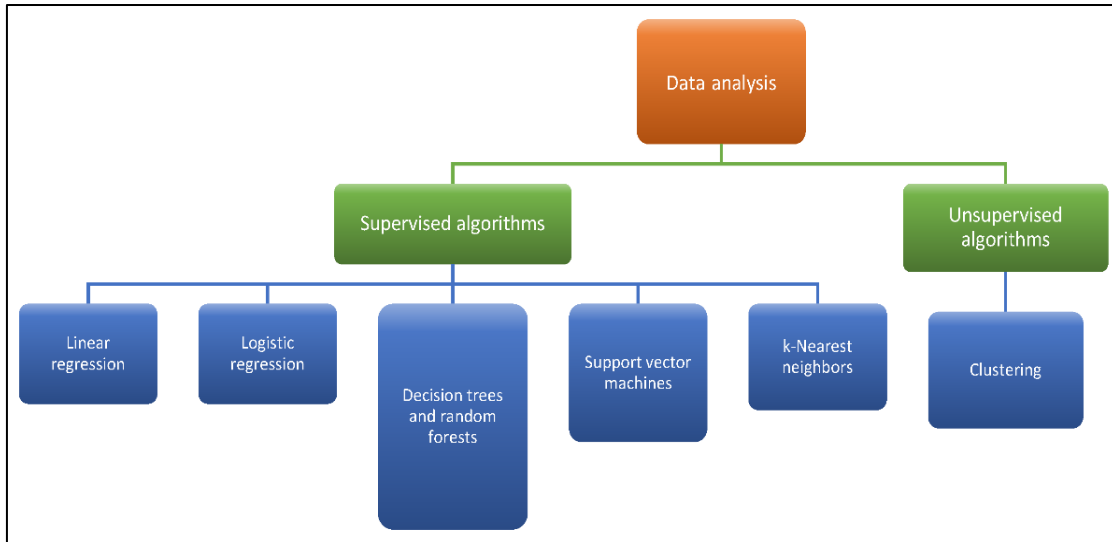


Figure 4: Méthodes de Machine Learning [15]

Nous proposons dans le tableau 1 un résumé des méthodes de Machine Learning, avec leurs intérêts, les entrées et les sorties.

Tableau 1– Méthodes de Machine Learning utilisées dans les systèmes de navigation

Méthode	L'intérêt	L'entrée	Sortie
Régression linéaire [16]	Prédiction de valeurs continues	Données numériques	Valeurs continues (régression)
Régression logistique [17]	Classification binaire	Données numériques, catégoriques	Probabilités de classes, classes binaires
Arbres de décision [18]	Classification, régression	Données numériques, catégoriques	Classes, valeurs continues
Forêts aléatoires [19]	Classification, régression, robustesse	Données numériques, catégoriques	Classes, valeurs continues
SVM [20]	Classification, régression	Données numériques	Classes, valeurs continues
KNN [21]	Classification, régression, simplicité	Données numériques, catégoriques	Classes, valeurs continues
Clustering K-means [22]	Clustering, segmentation de données	Données numériques	Centroides des clusters, labels de clusters

PVA [23]	Réduction de dimensionnalité, visualisation	Données numériques	Composantes principales, données réduites
-------------	---	--------------------	---

1.4.2 Deep Learning

Le Deep Learning (ou « apprentissage profond ») est un sous-domaine du Machine Learning, lui-même faisant partie de la grande famille de l'intelligence artificielle [24]. Il correspond à toutes les techniques de réseaux de neurones artificiels. Pour fonctionner de façon optimale, le Deep Learning a besoin d'une quantité importante de données. Découvrez sa définition et ses applications.

Les Méthodes de Deep Learning utilisées dans les systèmes de navigation sont :

- **Réseaux de neurones artificiels (ANN)** [25] : Utilisés pour l'apprentissage supervisé et non supervisé en utilisant des structures de neurones artificiels. L'entrée consiste en des données brutes ou prétraitées, tandis que la sortie est une prédiction ou une représentation des données.
- **Réseaux de neurones convolutifs (CNN)** [26] : Spécialement conçus pour l'analyse des données structurées, notamment des images, en conservant la structure spatiale des données. L'entrée est généralement une image, et la sortie est une prédiction ou une représentation des caractéristiques de l'image.
- **Réseaux de neurones récurrents (RNN)** [27] : Conçus pour le traitement de séquences de données, tels que des séquences de texte ou de signaux temporels. L'entrée est une séquence de données, et la sortie peut être une prédiction basée sur la séquence.
- **Long Short-Term Memory (LSTM)** [28] : Une variante des réseaux de neurones récurrents qui est capable de conserver la mémoire à long terme et de gérer les problèmes de disparition du gradient. L'entrée et la sortie sont similaires à celles des RNN, mais les LSTM sont mieux adaptés pour traiter les dépendances à long terme dans les séquences.
- **Réseaux de neurones adverses génératifs (GAN)** [29] : Utilisés pour générer de nouvelles données réalistes en formant deux réseaux de neurones simultanément : un générateur et un discriminateur. L'entrée pour le générateur est généralement un vecteur de bruit aléatoire, et la sortie est une donnée synthétique. Le discriminateur prend en entrée des données réelles ou synthétiques et produit une estimation de la probabilité que les données soient réelles.
- **Autoencodeurs** [30] : Utilisés pour apprendre une représentation compacte des données en comprimant l'entrée dans un espace latent de dimension inférieure, puis en la décompressant

pour reconstruire l'entrée. L'entrée et la sortie sont généralement les mêmes, mais l'autoencodeur apprend à représenter efficacement les données dans un espace de dimension réduite

- **Réseaux de neurones siamois** [31] : Utilisés pour comparer deux entrées en les passant à travers un réseau de neurones partagé. L'entrée est constituée de deux instances de données à comparer, et la sortie est une mesure de similarité ou de dissemblance entre les deux entrées
- **Transformers** [32] : Utilisés principalement dans le traitement du langage naturel (NLP) pour capturer les dépendances à long terme dans les séquences de données. L'entrée est une séquence de tokens, et la sortie peut être une prédiction de la prochaine séquence de tokens ou une représentation encodée des séquences de texte.

Nous proposons dans le tableau 2, un résumé des méthodes de Deep Learning, avec leurs intérêts, les entrées et les sorties.

Tableau 2– méthodes du Deep Learning

Méthode	L'intérêt	L'entrée	Sortie
ANN [33]	Modélisation de relations complexes et variées	Données diverses (texte, images, etc.)	Classifications, régressions, prédictions diverses
CNN [34]	Excellents pour le traitement d'images.	Images (matrices de pixels)	Classes d'objets, cartes de caractéristiques
RNN [35]	Excellents pour le traitement des séquences.	Séquences (texte, audio)	Séquences, classifications, prédictions temporelles
LSTM [36]	Gère les dépendances à long terme dans les séquences	Séquences (texte, audio)	Séquences, classifications, prédictions temporelles
GAN [37]	Génération de données réalistes, telles que des images ou vidéos	Bruit aléatoire, images	Nouvelles images, vidéos générées

Autoencodeurs [38]	Réduction de dimensionnalité, détection d'anomalies	Données diverses (images, texte, etc.)	Représentations encodées, reconstructions
Réseaux de neurones siamois [39]	Comparaison et similarité entre deux entrées	Paires d'images, paires de textes	Scores de similarité
Transformers [40]	Traitement efficace des séquences, excellent pour le NLP	Séquences (texte)	Traductions, résumés, réponses à des questions

1.4.3 Navigation par IA

L'intelligence artificielle (IA), en particulier le Deep Learning et le Machine Learning, révolutionne le domaine de la navigation maritime. Ces technologies permettent aux systèmes de navigation d'être plus autonomes, intelligents et efficaces, ce qui améliore la sécurité et l'optimisation des opérations maritimes.

Dans le contexte de la navigation, le ML est utilisé pour diverses tâches, telles que :

- **Prédiction de la trajectoire du navire** : Les modèles ML peuvent analyser les données historiques de position, de vitesse et de direction du navire, ainsi que les conditions météorologiques et océanographiques, pour prédire sa future trajectoire. Cela permet d'éviter les collisions et d'optimiser les itinéraires.
- **Détection d'obstacles** : Les algorithmes ML peuvent analyser des images radar et lidar pour identifier et classifier les obstacles tels que les autres navires, les bouées et les terres émergées. Cela permet d'améliorer la sécurité de la navigation en alertant les capitaines des dangers potentiels.
- **Maintenance prédictive** : Les modèles ML peuvent analyser les données des capteurs du navire pour identifier les signes avant-coureurs de défaillances mécaniques. Cela permet de planifier la maintenance de manière proactive et d'éviter les pannes en mer.

Dans le contexte de la navigation, le Deep Learning est utilisé pour des tâches plus sophistiquées que le ML traditionnel, telles que :

- **Reconnaissance d'images** : Les réseaux de neurones convolutifs (CNN) peuvent être utilisés pour identifier et classifier des objets dans des images, comme des feux de signalisation maritimes, des panneaux de signalisation et des types de navires.
- **Vision par ordinateur** : Les systèmes de vision par ordinateur basés sur le Deep Learning peuvent analyser des vidéos en temps réel pour détecter des événements tels que les changements de cap des autres navires ou la présence de débris dans l'eau.
- **Contrôle autonome** : Le Deep Learning peut être utilisé pour développer des systèmes de contrôle autonomes qui peuvent piloter des navires sans intervention humaine [41].

1.5 Traitement d'image

Le traitement d'images consiste à analyser et à manipuler des images pour extraire des informations utiles [42]. Dans le contexte de la navigation, cela peut impliquer l'utilisation de caméras embarquées ou de capteurs pour capturer des images de l'environnement environnant, telles que des images de la route, des panneaux de signalisation, des marquages au sol, etc.

1.5.1 Segmentation

La segmentation d'image est une opération de traitement d'images qui a pour but de rassembler des pixels entre eux suivant des critères prédéfinis [43]. Les pixels sont ainsi regroupés en régions, qui constituent un pavage ou une partition de l'image. Il peut s'agir par exemple de séparer les objets du fond (figure5).

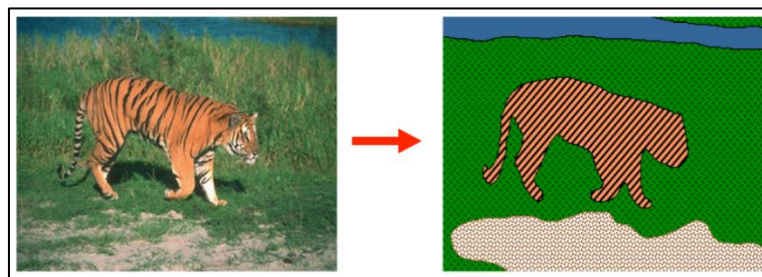


Figure 5: Exemple de segmentation [44]

1.5.2 Détection de contour

Le contour c'est la frontière entre deux objets dans une image [45]. La détection de contours (figure 6) c'est pour séparer l'objet de l'arrière plans, et est un procédé essentiel du traitement d'images qui vise à identifier les points d'une image où l'intensité lumineuse change brusquement. Ces variations indiquent généralement des éléments structuraux importants.

Il y a plusieurs méthodes de la détection de contour mais la plus utilisées c'est : Approximation de gradient.

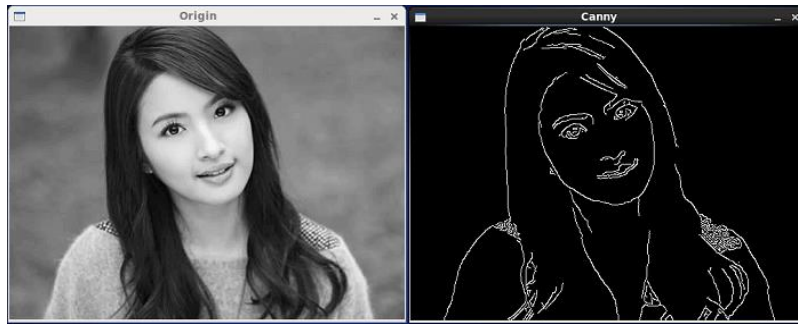


Figure 6: Exemple de détection de contour [46]

1.6 Conclusion

En conclusion, l'intégration de l'intelligence artificielle et de l'Internet des Objets dans les systèmes de navigation offre des solutions avancées pour répondre aux besoins spécifiques des non-voyants. Ces technologies permettent une navigation plus sûre, plus efficace et plus personnalisée, ouvrant la voie à un avenir où la mobilité est véritablement universelle. En continuant à innover dans ce domaine, nous pouvons créer une société plus inclusive et accessible pour tous.

Chapitre 2

Technologie IoT pour la navigation

2.1 Introduction

Les systèmes de navigation modernes font désormais partie intégrante de la navigation dans un monde en constante évolution. En intégrant plusieurs technologies telles que le GPS, les cartes numériques et divers capteurs, ces systèmes peuvent fournir des informations précises sur la localisation, les itinéraires et les conditions de circulation. Cependant, avec l'avènement de l'Internet des objets (IoT), ces systèmes ont atteint de nouveaux niveaux de complexité et de fonctionnalités.

L'Internet des objets permet des connexions entre divers appareils intelligents, permettant une communication en temps réel et une coordination efficace [47]. Dans le contexte des systèmes de navigation, cela signifie que les véhicules, les panneaux de signalisation, les feux de circulation et même les smartphones peuvent échanger des données pour optimiser les déplacements. Ce chapitre examine en détail les divers types de capteurs, leurs caractéristiques, avantages et limitations, ainsi que leur intégration harmonieuse pour créer une expérience de navigation inclusive et efficace. Il aborde également les défis potentiels et les perspectives d'avenir dans ce domaine en constante évolution.

2.2 Présentation du Raspberry Pi :

Raspberry [48] est une carte mère d'un mini-ordinateur qui peut être branchée à n'importe quel périphérique (souris, clavier...). Cette carte est fabriquée pour aider à étudier les ordinateurs et pour représenter un moyen d'apprentissage de la programmation informatique en plusieurs langages (python, scratch...). Elle est aussi capable de lire les vidéos à haute définition et même à installer des jeux vidéo. L'intérêt d'utiliser le Raspberry Pi est sa capacité d'interaction avec le monde extérieur et d'exécuter plusieurs variantes du système d'exploitation libre (GNU/Linux, Raspbian Debian ...) et des autres logiciels compatibles.

La figure 7 représente une carte mère d'un Raspberry Pi 4.



Figure 7: Raspberry pi 4

La figure 8 représente un schéma détaillé du Raspberry Pi 4, illustrant les connexions entre ses différents composants et ports.

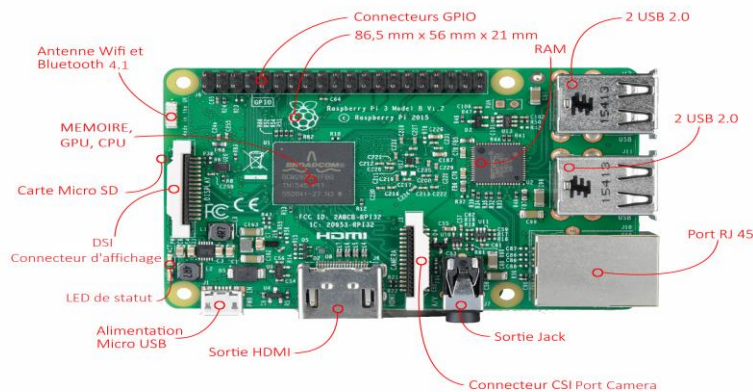


Figure 8: Emplacement des différents composants du Raspberry Pi 4

2.3 Les capteurs

Les capteurs jouent un rôle crucial dans les systèmes de navigation intelligents, fournissant une perception précise et détaillée de l'environnement environnant [49]. Ces capteurs agissent comme des yeux et des oreilles électroniques, permettant aux systèmes de naviguer de manière autonome, d'éviter les obstacles, de prendre des décisions intelligentes et d'accomplir leurs tâches avec précision et efficacité.

2.3.1 Capteurs Utilisés dans les systèmes de navigation

Il existe plusieurs capteurs utilisés dans les systèmes de navigation, notamment :

2.3.1.1 Caméra

Une caméra joue un rôle crucial dans les systèmes de navigation, elle améliore significativement les capacités des systèmes de navigation, en offrant une perception visuelle avancée et en augmentant la fiabilité des données collectées pour des prises de décision plus précises.

- Type : Caméra [50].
- Caractéristiques : Capteur CMOS, résolution variable selon le modèle, interfaces diverses (CSI, USB), support logiciel étendu.
- Cas d'utilisation : Surveillance, vision par ordinateur, imagerie embarquée, robotique, vision nocturne, etc.

La figure 9 montre un module de caméra Raspberry Pi.



Figure 9: Module de Caméra Raspberry Pi

2.3.1.2 Capteurs de distance ultrasoniques

Les capteurs de distance sont indispensables dans les systèmes de navigation, offrant des capacités essentielles pour la mesure de distance et la détection d'obstacles [51].

- Type : Capteur de distance.
- Caractéristiques : Mesure la distance en utilisant des ultrasons, portée et précision variable selon le modèle, interface simple.

- Cas d'utilisation : Mesure de distance, détection d'obstacles, robotique, systèmes de sécurité, etc.

La figure 10 montre un capteur à ultrasons, souvent utilisé pour la mesure de distance en robotique et autres applications électroniques.

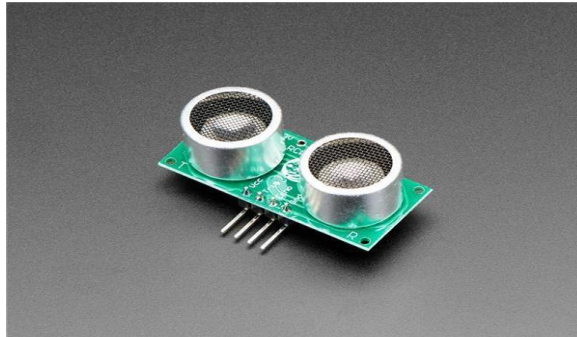


Figure 10: Capteur Ultrasonique HC-SR04

2.3.1.3 Capteurs infrarouges

Les capteurs infrarouges [52], également connus comme capteurs de proximité, sont extrêmement précieux dans les systèmes de navigation. En utilisant des rayons infrarouges pour détecter la proximité d'objets.

- Type : Capteur de proximité.
- Caractéristiques : Utilise des rayons infrarouges pour détecter la proximité d'objets, sortie analogique ou numérique, distances de détection variables.
- Cas d'utilisation : Détection d'obstacles, suivi de ligne, interfaces homme-machine, applications de sécurité, etc.

La figure 11 montre des modules de capteurs infrarouges, utilisés pour la détection d'obstacles ou de mouvements dans divers projets électroniques.



Figure 11: Capteur infrarouge

2.3.1.4 Accéléromètre et gyroscope

Les accéléromètres [53], en tant que capteurs d'inertie, sont essentiels dans les systèmes de navigation. Ils mesurent l'accélération et la vitesse angulaire sur plusieurs axes, fournissant des sorties numériques précises. Ces capteurs sont compacts et peu coûteux, ce qui les rend idéaux pour diverses applications.

- Type : Capteur d'inertie.
- Caractéristiques : Mesure de l'accélération et de la vitesse angulaire, sortie numérique, axes multiples, compact et peu coûteux.
- Cas d'utilisation : Navigation inertielle, stabilisation, détection de mouvement, réalité virtuelle, drones, etc.

La figure 12 représente un module de boussole, mettant en évidence ses divers composants et connexions.

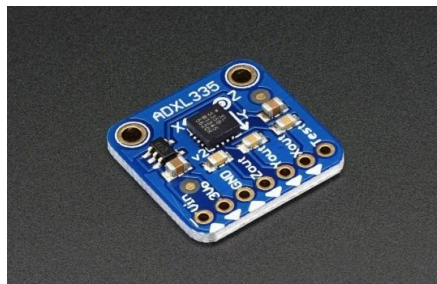


Figure 12: Capteur d'inertie

2.3.1.5 Boussole électronique (magnétomètre)

Les magnétomètres [54], ou capteurs magnétiques, jouent un rôle crucial dans les systèmes de navigation en mesurant le champ magnétique terrestre pour déterminer l'orientation.

- Type : Capteur magnétique.
- Caractéristiques : Mesure du champ magnétique terrestre, sortie numérique, compact et peu coûteux.
- Cas d'utilisation : Orientation, navigation, réalité augmentée, robotique, etc.

La figure 13 représente un module de boussole, mettant en évidence ses différents composants et connexions.



Figure 13: Capteur magnétique

2.3.1.6 Module GPS

Les capteurs GPS sont essentiels dans les systèmes de navigation en tant que capteurs de positionnement. En recevant des signaux satellites, ils déterminent avec précision la position et le temps.

C'est un capteur de positionnement [55], il se caractérise par une réception de signaux satellites pour déterminer la position et le temps, sortie de données NMEA, précision et taux de rafraîchissement variables. On l'utilise en de navigation, suivi de véhicules, géo localisation, cartographie, applications IoT, etc.

La figure 14 représente un Adafruit Mini GPS PA1010D, qui est un module GPS compact et polyvalent.

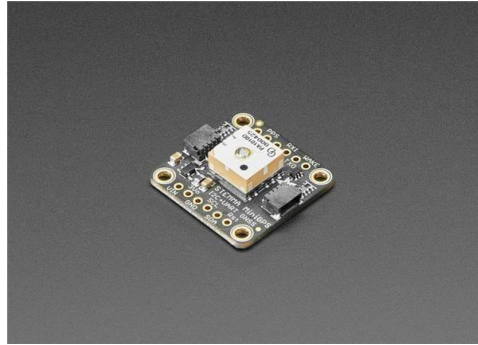


Figure 14: Capteur de positionnement

2.3.1.7 Module de reconnaissance vocale

Les capteurs de reconnaissance vocale, en tant que capteurs audio, apportent une dimension innovante aux systèmes de navigation. Capables de reconnaître la parole, ces capteurs permettent l'apprentissage et la reconnaissance de commandes vocales. Ils sont particulièrement utiles pour le contrôle vocal.

C'est un capteur audio [56], il se caractérise par une reconnaissance de la parole, interface UART ou série, apprentissage et reconnaissance de commandes vocales. On l'utilise en cas de contrôle vocal, domotique, assistance personnelle, interfaces utilisateur alternatives, etc.

La figure 15 représente un module de reconnaissance vocale.

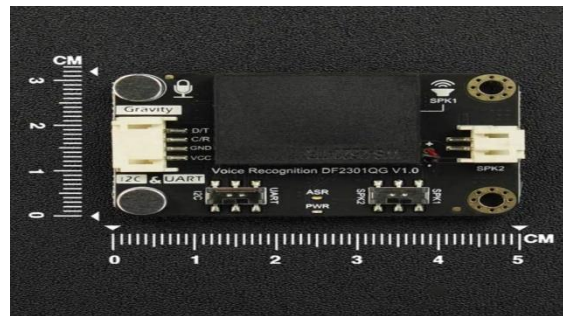


Figure 15: Capteur audio

2.3.1.8 Capteurs de luminosité ambiante

Un capteur de lumière joue un rôle crucial dans les systèmes de navigation en fournissant des informations précises sur l'intensité lumineuse ambiante [57]. Cette donnée est essentielle pour plusieurs aspects des systèmes modernes de navigation.

- Type : Capteur de lumière.

- Caractéristiques : Mesure de l'intensité lumineuse ambiante, sortie numérique, haute précision et sensibilité.
- Cas d'utilisation : Régulation de l'éclairage, gestion de l'énergie, luminosité adaptative, météorologie, etc.

La figure 16 représente un module de capteur de lumière.



Figure 16 : Capteur de lumière

2.3.1.9 Capteurs de pression ou d'altitude

Un capteur de pression est essentiel dans les systèmes de navigation pour plusieurs raisons fondamentales [58]. Ce type de capteur mesure non seulement la pression atmosphérique mais également l'altitude avec une grande précision, ce qui est crucial pour la navigation aérienne, terrestre et marine.

- Type : Capteur de pression.
- Caractéristiques : Mesure de la pression atmosphérique et de l'altitude, sortie numérique, haute précision et faible consommation d'énergie.
- Cas d'utilisation : Altitude, météorologie, navigation, suivi d'activités en plein air, applications IoT, etc.

La figure 17 représente un module de capteur de température et d'humidité.

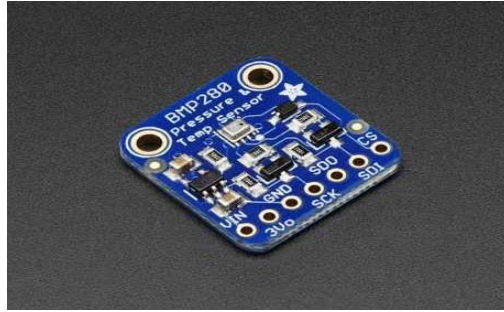


Figure 17: Capteur de pression

2.3.1.10 Capteurs de température

L'intégration d'un capteur de température dans les systèmes de navigation contribue à améliorer la sécurité, le confort et l'efficacité énergétique des véhicules et des infrastructures où il est déployé [59].

- Type : Capteur de température.
- Caractéristiques : Mesure de la température ambiante, sortie numérique ou analogique, précision élevée et linéarité.
- Cas d'utilisation : Surveillance de la température, contrôle environnemental, météorologie, systèmes de refroidissement/chauffage, etc.

La figure 18 représente un capteur de température.

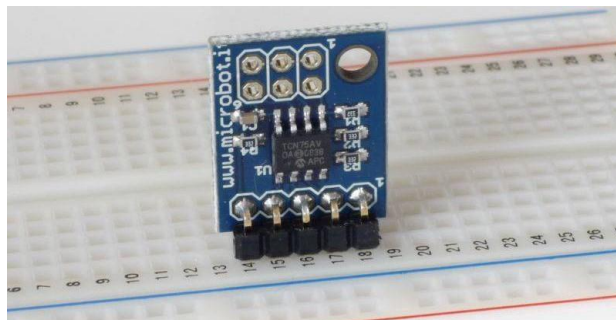


Figure 18 : Capteur de température

2.3.1.11 Lidar

Ce type de capteur utilise des impulsions laser pour mesurer avec précision la distance entre l'objet et le capteur lui-même. Dans les applications de navigation, le LiDAR est particulièrement utile pour la détection d'obstacles et la cartographie environnementale en temps réel.

- Type : Capteur LiDAR [60].
- Caractéristiques :
 - Portée : 0,2 à 50 mètres
 - Consommation moyenne : < 5 mA
 - Longueur d'onde : 905 nm
 - Interface : UART série (3.0V)
 - Taux de mise à jour : 1 à 20 lectures par seconde
 - Poids : 6,5 g
 - Dimensions : 32 mm x 30 mm x 22 mm
 - Sécurité oculaire : Classe 1
- Cas d'utilisation :
 - Lunettes intelligentes pour aider les personnes non-voyantes
 - Détection des obstacles pour la navigation sécurisée
 - Aide à la perception de l'environnement
 - Amélioration de l'autonomie et de la mobilité des utilisateurs.

La figure 19 montre un capteur LiDAR.



Figure 19 Capteur LIDAR

2.3.2 Rôle des capteurs dans les systèmes de navigation

L'intégration des capteurs dans le système de navigation pour les non-voyants est un processus complexe visant à combiner efficacement les données provenant de différentes sources sensorielles pour fournir une expérience de navigation cohérente et précise. Cette intégration repose sur une architecture logicielle robuste et des algorithmes sophistiqués qui traitent les informations des capteurs en temps réel et les transforment en indications significatives pour l'utilisateur.

Chaque type de capteur apporte des informations uniques sur l'environnement environnant, et l'intégration réussie de ces données est essentielle pour fournir une navigation fluide et sûre [61]. Voici quelques aspects clés de l'intégration des capteurs dans le système de navigation :

- **Fusion des données sensorielles** : Les données provenant de différents capteurs, tels que la caméra, les capteurs ultrasoniques, les capteurs infrarouges, etc., doivent être fusionnées de manière intelligente pour créer une représentation précise de l'environnement. Cela peut impliquer l'utilisation de techniques de fusion sensorielle telles que les filtres de Kalman ou les réseaux de neurones pour combiner les informations et réduire les erreurs de mesure.
- **Correction des erreurs et des imprécisions** : Chaque capteur a ses propres limitations et peut produire des données imprécises dans certaines situations. L'intégration des capteurs comprend souvent des mécanismes de correction des erreurs et de recalibration pour améliorer la fiabilité des informations fournies à l'utilisateur.
- **Adaptation aux conditions changeantes** : Les conditions environnementales peuvent varier considérablement, ce qui nécessite une adaptation dynamique des paramètres et des algorithmes de traitement des capteurs. Par exemple, l'intensité lumineuse, les conditions météorologiques et la densité des obstacles peuvent tous influencer la manière dont les capteurs interprètent l'environnement.
- **Interface utilisateur cohérente** : Les indications fournies à l'utilisateur doivent être cohérentes et intuitives, quel que soit le type de capteur utilisé. Cela nécessite une conception d'interface utilisateur soigneusement pensée qui présente les informations de manière claire et compréhensible, que ce soit par des sons, des vibrations ou d'autres moyens tactiles.
- **Test et validation** : Avant de déployer un système de navigation intégrant plusieurs capteurs, il est essentiel de le tester dans une variété de conditions réelles pour s'assurer de sa fiabilité et de sa performance. Des processus de validation rigoureux doivent être mis en place pour évaluer la précision et la robustesse du système dans des scénarios divers.

2.4 Les avantages et les limites des capteurs sélectionnés

Les capteurs sélectionnés pour le système de navigation intelligent offrent une gamme variée d'avantages, mais ils présentent également certaines limites qui doivent être prises en compte dans la conception et l'utilisation du système.

2.4.1 Caméra :

La caméra représente un outil essentiel dans les systèmes de navigation, offrant plusieurs avantages significatifs. Tout d'abord, elle fournit des informations visuelles détaillées sur l'environnement. De plus, elle est capable de détecter un large éventail d'objets et d'obstacles. En outre, la caméra peut être utilisée pour la reconnaissance d'objets et la lecture de panneaux de signalisation, la caméra présente également des limites à prendre en compte. Elle est fortement dépendante des conditions d'éclairage et de visibilité, elle peut être aussi sujette aux obstructions et aux interférences visuelles.

2.4.2 Capteurs de distance ultrasoniques :

Les capteurs de distance ultrasoniques sont largement utilisés dans les systèmes de navigation en raison de plusieurs avantages clés. Tout d'abord, ils offrent une mesure précise des distances à courte portée. De plus, ces capteurs fonctionnent efficacement dans des conditions de faible luminosité, ce qui les rend fiables même la nuit ou dans des environnements peu éclairés. Enfin, ils sont généralement disponibles à un coût abordable et sont largement disponibles sur le marché. Cependant, malgré leurs avantages elles présentent certaines limites importantes. Leur portée est limitée par rapport à d'autres capteurs, et ils sont sensibles aux surfaces réfléchissantes et aux interférences acoustiques.

2.4.3 Capteurs infrarouges :

Les capteurs infrarouges sont des composants essentiels des systèmes de navigation en raison de plusieurs avantages significatifs. Tout d'abord, ils offrent la capacité de détecter des objets à proximité sans nécessiter de contact direct, De plus, ces capteurs fonctionnent efficacement dans diverses conditions d'éclairage, Enfin, ils se distinguent par une faible consommation d'énergie. Cependant, malgré leurs avantages, les capteurs infrarouges présentent certaines limites importantes à prendre en considération. Tout d'abord, leur portée est généralement limitée. De plus, ils peuvent être sensibles aux conditions météorologiques et les surfaces réfléchissantes.

2.4.4 Accéléromètre et gyroscope :

Les accéléromètres et gyroscopes sont des composants essentiels dans les systèmes de navigation, offrant plusieurs avantages significatifs. Tout d'abord, ils fournissent des informations précieuses sur l'orientation et les mouvements de l'utilisateur ou de l'appareil. En outre, ces capteurs fonctionnent de manière fiable et indépendante des conditions environnementales. Enfin, ils se distinguent par une faible consommation d'énergie et une taille compacte. Cependant, malgré leurs nombreux avantages, les accéléromètres et gyroscopes présentent certaines limites qu'il convient de considérer. Tout d'abord, pour maintenir leur précision, ils peuvent nécessiter un calibrage fréquent. De plus, ces capteurs sont sensibles aux vibrations et aux mouvements brusques.

2.4.5 Boussole électronique (magnétomètre) :

La boussole électronique, ou magnétomètre, est un composant crucial des systèmes de navigation en raison de plusieurs avantages significatifs. Tout d'abord, elle fournit une orientation précise indépendamment des obstacles visuels. De plus, la boussole électronique se distingue par son faible coût et sa faible consommation d'énergie. Cependant, malgré ses avantages, la boussole électronique présente certaines limites importantes à prendre en compte. Tout d'abord, elle est sensible aux interférences magnétiques et aux perturbations électromagnétiques. De plus, elle peut nécessiter un recalibrage fréquent pour maintenir la précision.

2.4.6 Module GPS :

Le module GPS est un élément essentiel dans les systèmes de navigation en raison de ses nombreux avantages significatifs. Tout d'abord, il fournit une localisation précise en utilisant des signaux satellites. Cette capacité fonctionne de manière fiable dans le monde entier. Cependant, malgré ses avantages, le module GPS présente certaines limites importantes à prendre en considération. Tout d'abord, il peut rencontrer des difficultés de fonctionnement en cas de blocage des signaux satellites. De plus, le module GPS a tendance à consommer plus d'énergie par rapport à d'autres technologies de positionnement.

2.4.7 Module de reconnaissance vocale :

Le module de reconnaissance vocale représente une avancée significative dans les systèmes de navigation en raison de plusieurs avantages clés. Tout d'abord, il offre une interaction intuitive avec le

système De plus, le module de reconnaissance vocale est adapté aux utilisateurs non-voyants pour une utilisation sans contact avec l'appareil. Cependant, malgré ses avantages, le module de reconnaissance vocale présente certaines limites importantes à prendre en compte. Tout d'abord, la reconnaissance vocale peut être imparfaite dans des environnements bruyants De plus, certains services de reconnaissance vocale nécessitent une connexion Internet pour certains services de reconnaissance vocale.

2.4.8 Capteurs de luminosité ambiante, pression/altitude et température :

Les capteurs de luminosité ambiante, de pression/altitude et de température jouent des rôles essentiels dans les systèmes de navigation grâce à leurs nombreux avantages. Tout d'abord, ils fournissent des informations supplémentaires sur l'environnement environnant. De plus ces capteurs peuvent être utilisés pour adapter les indications en fonction des conditions Cependant, malgré leurs avantages, ces capteurs présentent certaines limites à prendre en compte. Tout d'abord, leur pertinence peut varier selon les situations de navigation spécifiques. De plus, ces capteurs peuvent être sensibles aux interférences externes et aux variations environnementales.

2.5 Conclusion

En conclusion, l'intégration des divers capteurs dans un système de navigation intelligent pour les non-voyants offre des avantages significatifs malgré quelques limites. Ces capteurs, tels que les caméras, les capteurs ultrasoniques, infrarouges, et autres, permettent une perception détaillée de l'environnement et une interaction intuitive avec le système. Malgré leurs défis individuels, une intégration efficace offre une expérience de navigation inclusive et sûre, améliorant ainsi l'autonomie et la qualité de vie des utilisateurs non-voyants. Avec des efforts continus dans la recherche et le développement, ces systèmes ont le potentiel de devenir encore plus sophistiqués et de favoriser une inclusion plus large dans la société.

Chapitre 3

Conception du modèle de navigation proposée

3.1 Introduction

Nous proposons dans ce projet à développer un système de navigation innovant pour les personnes non-voyantes en utilisant des technologies de pointe telles que les capteurs LiDAR, les caméras et le GPS pour la perception de l'environnement, l'intelligence artificielle (Deep Learning et Machine Learning) pour le traitement et l'analyse des données, et le traitement d'images pour l'extraction d'informations visuelles. Le système proposé guidera les utilisateurs en temps réel via des instructions vocales, offrant une solution de navigation autonome, informative et adaptable pour améliorer leur mobilité et leur qualité de vie.

3.1.1 Modèle de navigation Intelligent

Notre projet de système de navigation pour non-voyants repose sur une base de données centrale pour stocker les images, les localisations et les données vocales. Ensuite, nous installons et configurons les capteurs, lunettes et casques adaptés pour une collecte précise des données. Après collecte et traitement des données, les résultats sont présentés de manière accessible pour une navigation autonome et sécurisée en temps réel.

Ci-dessous, la figure qui résume et explique le principe de notre modèle :

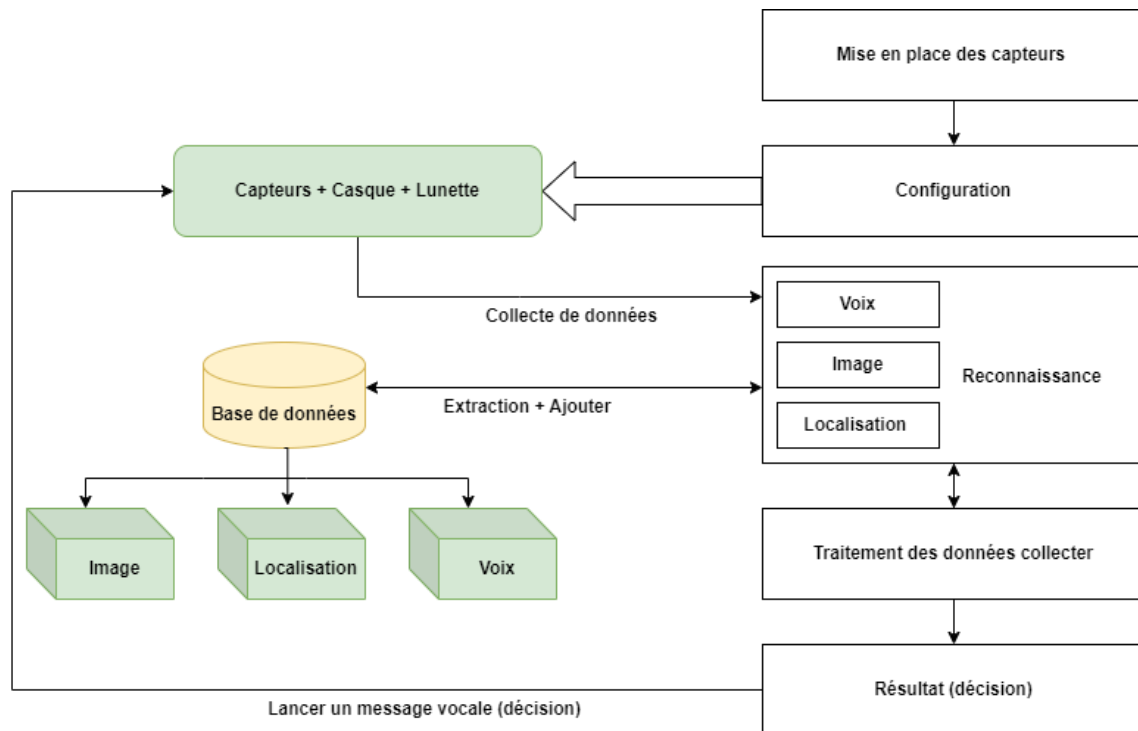


Figure 20: Modèle de navigation intelligent

Diagramme de séquence du modèle :

Le diagramme ci-dessous représente une séquence d'opérations effectuées par notre système qui s'incarne dans des lunettes intelligentes, et qui utilise une base de données voici une description générale de la chronologie des opérations :

Mise en place et installation : L'utilisateur met en place et installe les lunettes intelligentes.

Boucle de traitement continue (loop) : Les lunettes capturent en continu des images de l'environnement de l'utilisateur.

Détection de contenu : Les images capturées sont envoyées au système pour la détection de contenu. Cette étape consiste à analyser l'image pour identifier les éléments pertinents.

Segmentation : Une fois le contenu détecté, l'image est segmentée pour isoler les différentes parties de l'image, facilitant ainsi la reconnaissance des objets et des obstacles.

Comparaison : Les segments de l'image sont comparés à une base de données pour identifier s'il y a des obstacles potentiels. Cela implique la vérification contre des modèles d'obstacles connus.

Réponse en cas d'obstacle : Si un obstacle est détecté, le système génère un message vocal qui est transmis à l'utilisateur pour l'alerter de la présence de l'obstacle.

La figure 21 montre un diagramme de séquence pour l'interaction entre l'utilisateur, des lunettes intelligentes, un système et une base de données.

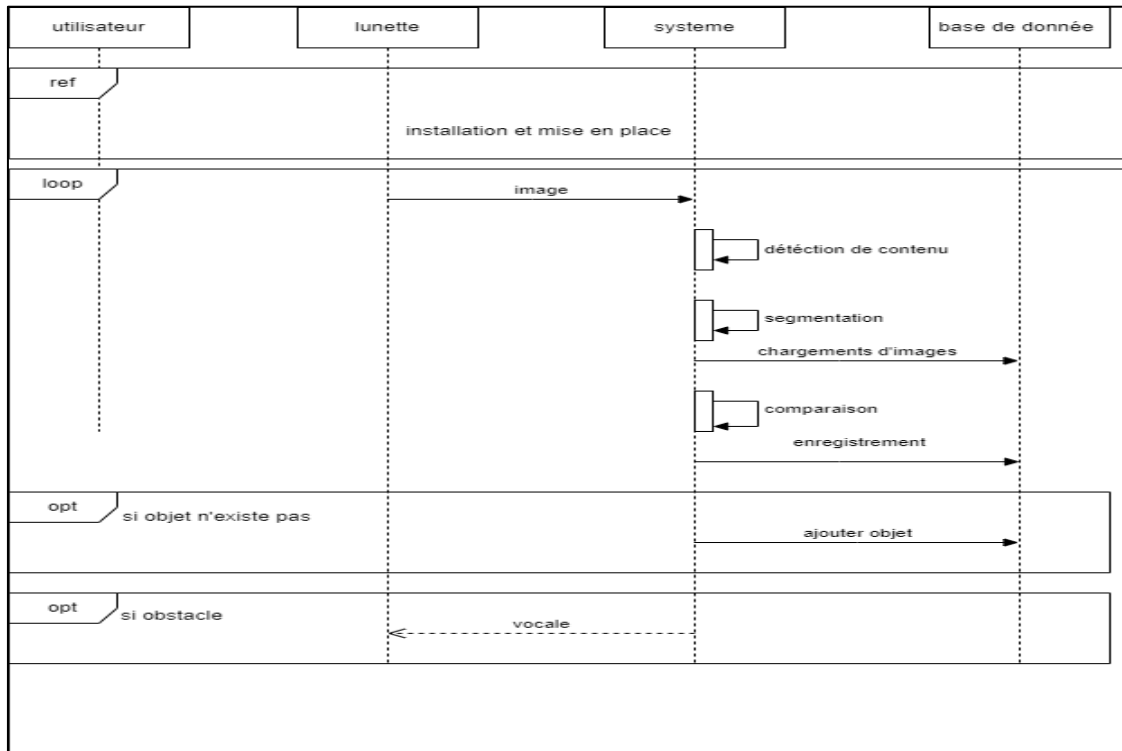


Figure 21: Diagramme de la séquence du système

3.1.1.1 La base de données

Notre base de données est une ressource cruciale, regorgeant d'images d'obstacles variés tels que des arbres, des voitures, les tables, les animaux, les êtres humains et pleins d'autres. Chaque image représente une pièce importante dans notre système. Ces données, soigneusement annotées et organisées, alimentent notre quête pour créer des technologies plus sûres et plus intelligentes pour l'avenir de la mobilité.

3.1.1.2 Mise en place

C'est la préparation des éléments nécessaires avant de commencer une tâche ou un processus. Pour l'installation et la configuration des capteurs, cela implique de s'assurer que tous les équipements, les outils et les composants nécessaires sont prêts et accessibles, et que l'environnement est adapté à leur fonctionnement optimal. Cela peut également inclure le positionnement correct des capteurs, leur calibration si nécessaire, et la configuration logicielle pour collecter et interpréter les données capturées. La figure 22 montre un diagramme de composants pour le système Lunav, incluant un Raspberry Pi 4 (CPU), un capteur de caméra, un capteur de son, un module GPS, et une carte WiFi/Bluetooth.

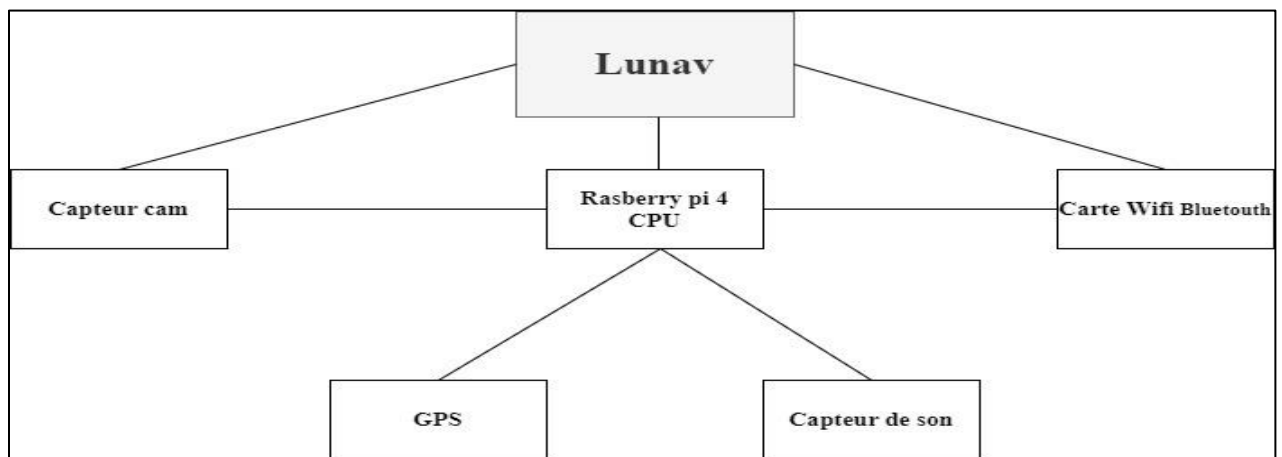


Figure 22: Architecture des capteurs

Le diagramme présente quatre principales fonctionnalités des lunettes intelligentes. La première fonctionnalité, détecter la position, permet aux lunettes de déterminer la position de l'utilisateur. La deuxième fonctionnalité, capter l'image, repose sur des capteurs ou des caméras intégrées aux lunettes pour capturer des images de l'environnement de l'utilisateur. Ensuite, une fois les images capturées, les données doivent être traitées, ce qui constitue la troisième fonctionnalité. Enfin, la quatrième fonctionnalité, générer et envoyer de l'audio, intervient après le traitement des données. Les lunettes génèrent alors des informations audios pour l'utilisateur.

La figure 23 illustre les principales fonctionnalités des lunettes, incluant la détection de position, la capture d'image, le traitement des données et la génération et l'envoi d'audio.

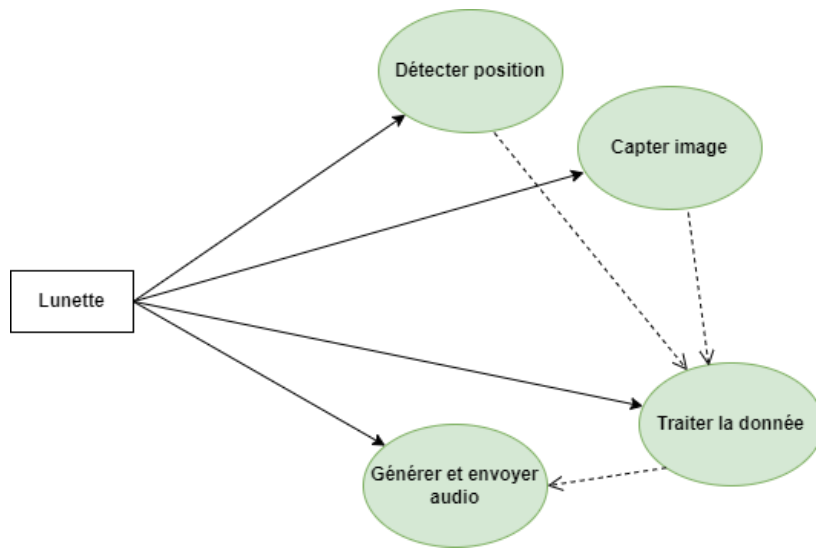


Figure 23: Diagramme de cas d'utilisation de l'utilisateur

Le diagramme montre les interactions de l'utilisateur avec les lunettes intelligentes. Deux cas d'utilisation principaux sont représentés : "Placer lunette" et "Connecter lunette". L'utilisateur, représenté par un personnage, effectue ces deux actions. Le cas d'utilisation "Placer lunette" indique que l'utilisateur doit positionner les lunettes. Le cas d'utilisation "Connecter lunette" montre que l'utilisateur doit établir une connexion.

La figure 24 illustre un diagramme de cas d'utilisation où l'utilisateur interagit avec le système pour "Placer lunette" et "Connecter lunette".

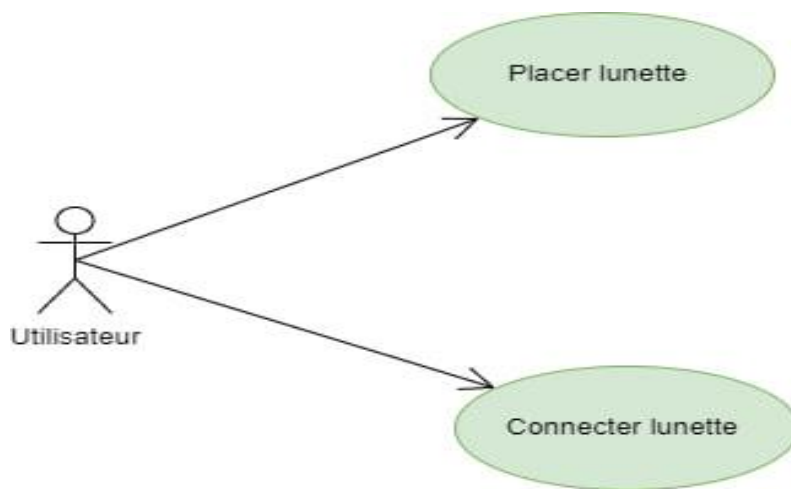


Figure 24: Diagramme de cas d'utilisation de lunette

3.1.1.3 La configuration

L'étape de configuration implique l'installation et l'ajustement des capteurs, des lunettes et des casques utilisés dans le système. Les paramètres des capteurs sont configurés, les dispositifs de visualisation sont calibrés, et des tests sont effectués pour garantir leur bon fonctionnement ensemble.

Diagramme de séquence des capteurs :

Ce diagramme représente l'étape de la configuration d'un système de capteurs. L'administrateur affiche l'interface. Ensuite, l'application de configuration (App-conf) reçoit et affiche une liste de capteurs, parmi lesquels l'administrateur en sélectionne un. Les caractéristiques du capteur sélectionné sont envoyées et affichées à l'administrateur, qui peut ensuite les enregistrer. Une fois la configuration terminée, le système informe de la fin du processus et quitte.

La figure 25 montre un diagramme de séquence illustrant les interactions entre l'admin, l'application de configuration et les capteurs pour configurer et enregistrer les caractéristiques des capteurs.

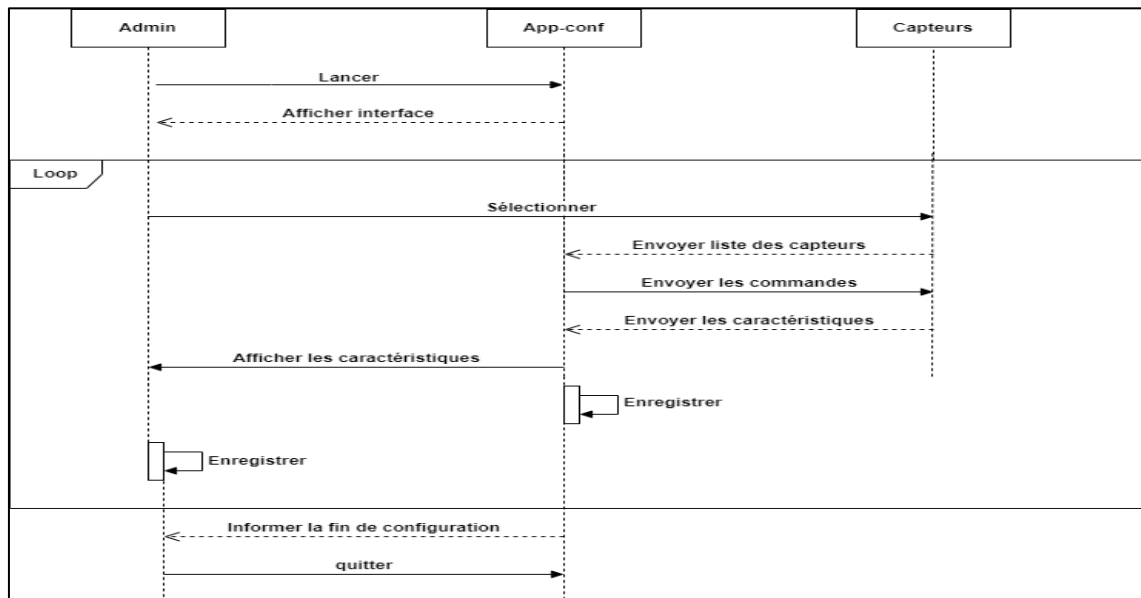


Figure 25: Diagramme de séquence des capteurs

3.1.1.4 Reconnaissance

L'étape de reconnaissance dans notre système comprend plusieurs étapes clés : prétraitement des données, extraction des caractéristiques, segmentation, apprentissage et entraînement, conversion des données, validation du modèle, intégration dans le système.

La figure 26 présente un organigramme montrant le processus de démarrage, de lecture, de vérification de compatibilité, de conversion et de reconnaissance de vidéos et de séquences.

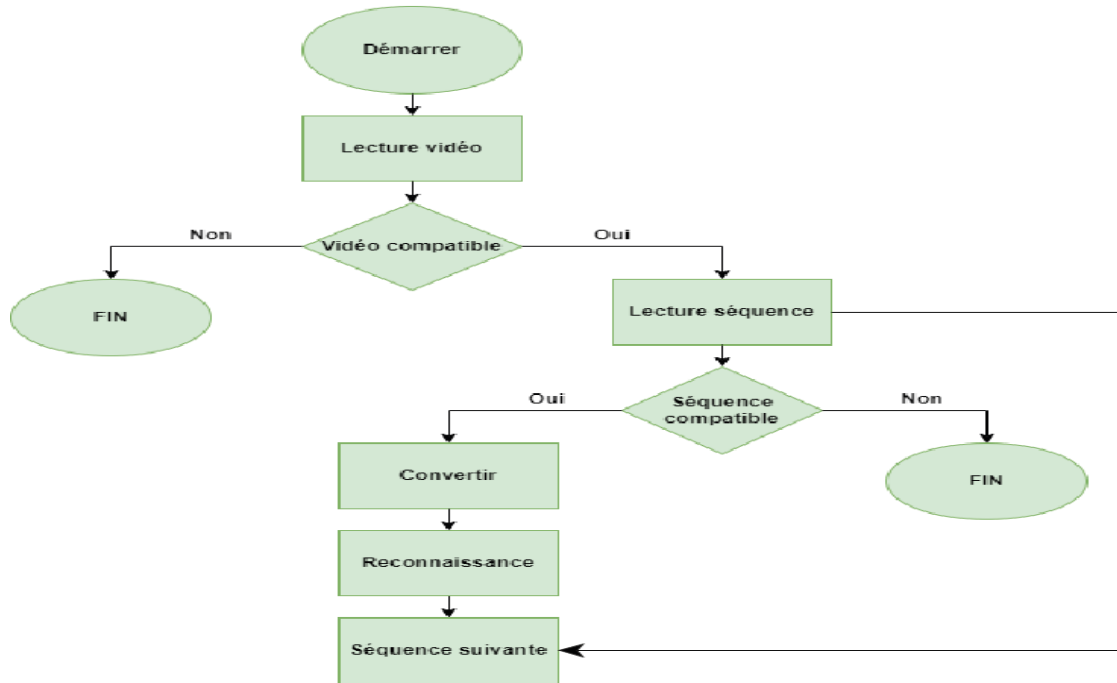


Figure 26: Organigramme de la reconnaissance

3.1.1.4.1 Prétraitement des données d'images :

Les données collectées par les capteurs sont prétraitées pour nettoyer les bruits indésirables et améliorer la qualité des données. Une image est représentée sous la forme d'une matrice de pixel, ou chaque élément de la matrice (pixel) contient des informations sur la luminosité et la couleur.

La figure 27 montre un processus de prétraitement des données. Le diagramme commence par l'acquisition des données et comprend plusieurs étapes : la vérification de la qualité des données, le filtrage des données, l'étalonnage des données, la normalisation des données et, si nécessaire, la réduction de la dimensionnalité. Toutes ces étapes conduisent à l'obtention de données prétraitées.

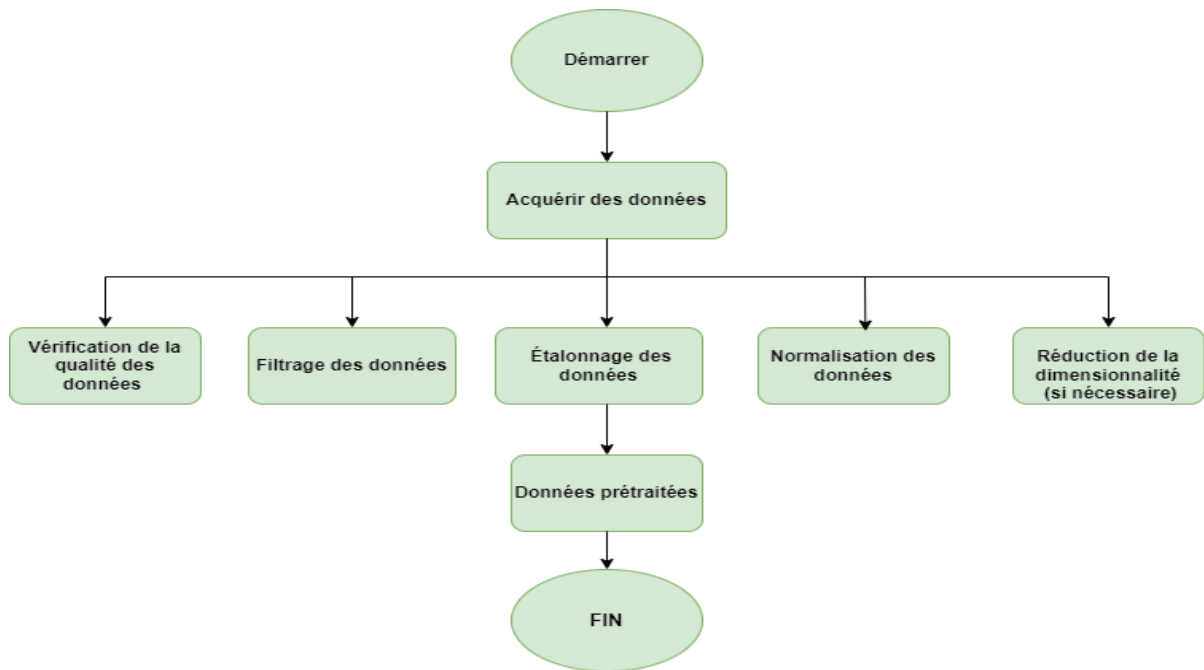


Figure 27: Organigramme de prétraitement des données

3.1.1.4.2 Segmentation :

Les informations visuelles collectées par les caméras des lunettes intelligentes sont segmentées pour identifier les différents éléments de l'environnement, tels que les obstacles, les chemins et les points de repère, facilitant ainsi leur reconnaissance et leur traitement par le système. Voici quelques méthodes utilisées dans ce contexte :

- **Réseaux de Neurones Convolutifs (CNN)** : les CNN sont utilisées pour détecter et segmenter les objets dans les images en temps réel. Les CNN extraient des caractéristiques importantes des images et prédisent les positions des objets.
- **Détection d'Objets avec Boîtes Englobantes** : Des boîtes englobantes sont générés pour chaque objet détecté, fournissant des informations sur les positions et les tailles des objets. Ces boîtes sont utilisées pour segmenter les objets visuellement.
- **Classification des Objets** : Les classes des objets sont détectées, comme les piétons, les véhicules, les panneaux de signalisation, etc. Cela permet de segmenter les différents types d'éléments présents dans l'environnement.

- **Annotation Visuelle** : Les objets détectés sont annotés visuellement sur l'image avec des boîtes englobantes et des labels, ce qui aide à vérifier la segmentation et à fournir une sortie visuelle utile.

3.1.1.4.3 Extraction des caractéristiques :

Des traits pertinents sont extraits des données pour représenter efficacement les objets détectés. Si l'image est en couleur, elle est convertie en niveaux de gris pour simplifier le traitement. Chaque pixel coloré est transformé en une valeur unique, on cite quelques méthodes :

- **Convolutional Neural Networks (CNNs)** : Les CNNs, sont utilisés pour extraire des caractéristiques spatiales à partir des images. Ces modèles appliquent plusieurs couches de convolution et de pooling pour capturer des motifs à différents niveaux de complexité.
- **Prétraitement d'Images** : La conversion des images en niveaux de gris (ou dans ce cas, simplement la conversion RGB-BGR) peut être utilisée pour réduire la complexité des données et se concentrer sur les caractéristiques pertinentes pour la détection d'objets.
- **Détection en Temps Réel** : l'image se divise en une grille et prédit des boîtes englobantes et des probabilités de classes pour chaque grille. Cette méthode permet une détection rapide et efficace, adaptée pour des applications en temps réel comme la navigation pour les non-voyants.

3.1.1.4.4 Conversion des Données :

Les données brutes provenant des capteurs sont converties dans un format adapté à l'analyse et au traitement ultérieur par le système embarqué des lunettes intelligentes, facilitant ainsi la détection et la caractérisation des obstacles.

La figure 28 illustre le processus d'extraction des caractéristiques à partir de plusieurs séquences (séquence 1, séquence 2, ... séquence n), produisant ainsi des matrices correspondantes (matrice 1, matrice 2, ... matrice n).

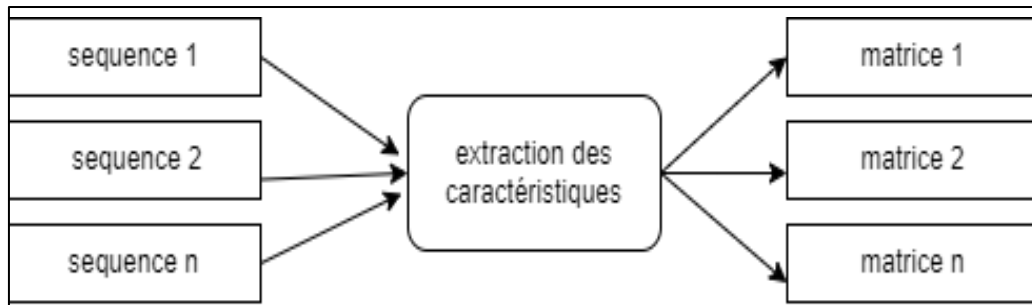


Figure 28: Exemple de conversion

3.1.1.4.5 Apprentissage et entraînement

Des algorithmes d'apprentissage automatique comme les réseaux de neurones convolutifs (CNN) sont utilisés. Les données d'entraînement sont préparées et les caractéristiques pertinentes sont extraites. Le modèle est formé en ajustant ses paramètres pour minimiser l'erreur de prédiction. Après l'entraînement, le modèle est validé avec des données de test pour vérifier sa précision avant d'être intégré et optimisé pour un usage opérationnel.

3.1.1.4.6 Validation du modèle

Le modèle est testé avec des données distinctes pour évaluer sa précision et sa capacité à généraliser.

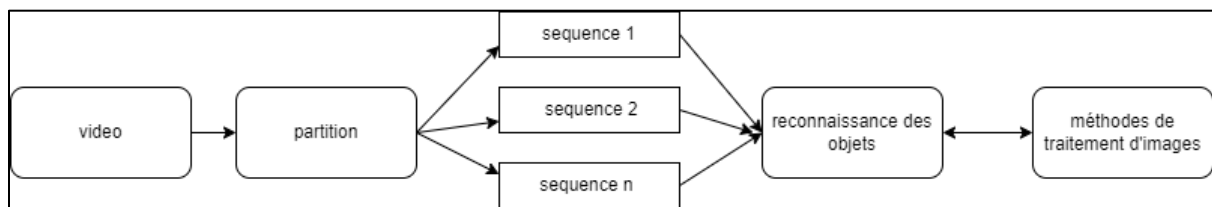


Figure 29: Exemple de validation

3.1.1.4.7 Intégration dans le système :

Une fois validé, le modèle est intégré dans le système global de navigation pour interpréter en temps réel les données des capteurs et fournir des informations sur les obstacles détectés aux utilisateurs.

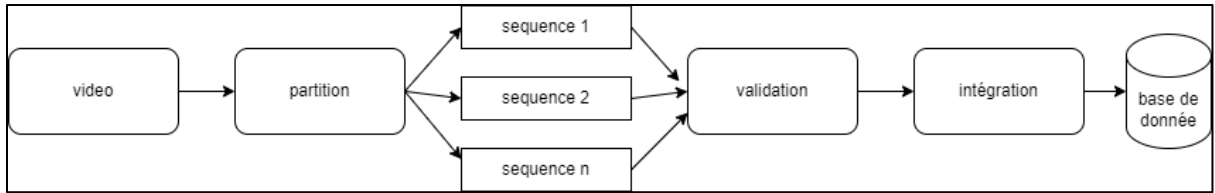


Figure 30: Intégration des données dans la base de donnée

3.1.1.5 Traitement des données

L'étape de traitement des données est une pierre angulaire de notre système. Elle se divise en six étapes essentielles : apprentissage et entraînement, filtrage des données, identification des obstacles, classification, intégration des résultats.

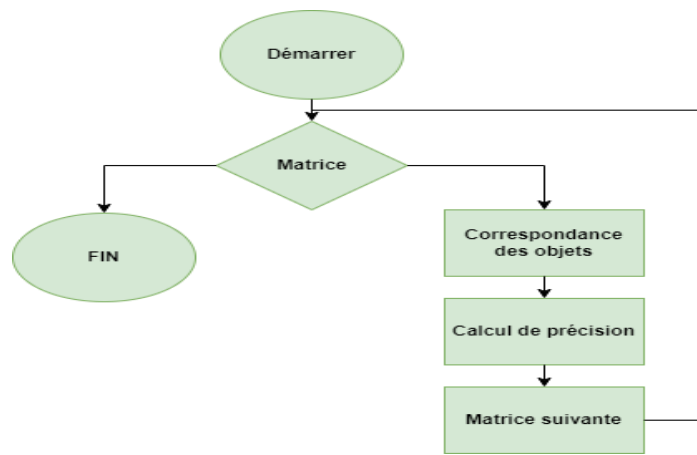


Figure 31: Organigramme de traitement des données

3.1.1.5.1 Apprentissage et entraînement :

Des algorithmes d'apprentissage automatique sont utilisés pour former un modèle à reconnaître les objets en fonction de leurs caractéristiques. On cite quelques méthodes :

- **Réseaux de Neurones Convolutifs (CNN)** : Utilisation de CNNs pour l'extraction des caractéristiques et la reconnaissance d'objets dans les images. Les architectures courantes incluent AlexNet, VGG, ResNet, et Inception.
- **Réseaux de Neurones Profonds (DNN)** : Application de DNNs pour des tâches de classification plus complexes et pour gérer les données multidimensionnelles.

- **Modèles Pré-entraînés** : Utilisation de modèles pré-entraînés comme YOLO (You Only Look Once), SSD (Single Shot MultiBox Detector) et Faster R-CNN, qui sont ensuite ajustés (fine-tuning) avec les données spécifiques du système de navigation.

3.1.1.5.2 Filtrage des Données

Les données collectées par les capteurs des lunettes intelligentes sont filtrées pour éliminer les interférences et les informations non pertinentes, garantissant ainsi la clarté des informations traitées et la fiabilité des images.

3.1.1.5.3 Identification des obstacles

Des caractéristiques pertinentes sont extraites des données segmentées pour permettre la reconnaissance efficace des obstacles, tels que leur forme, leur taille et leur distance par rapport à l'utilisateur, facilitant ainsi la génération d'alertes précises.

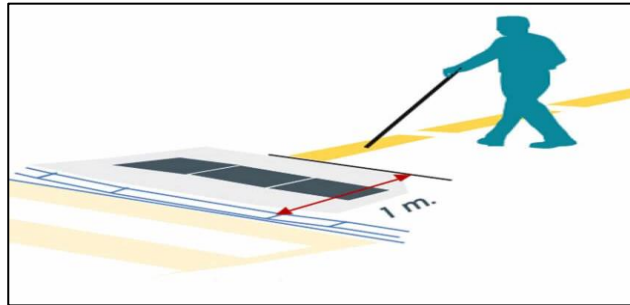


Figure 32: Exemple d'identification d'obstacle

3.1.1.5.4 Classification :

Les caractéristiques extraites sont utilisées pour classer les différents éléments de l'environnement en fonction de leur nature, permettant ainsi au système de reconnaître et de différencier les obstacles, les chemins sûrs et les points de repère, améliorant ainsi la qualité des indications fournies à l'utilisateur.

3.1.1.5.5 Intégration des Résultats :

Les informations traitées, telles que les obstacles détectés et leur classification, sont intégrées dans l'interface utilisateur des lunettes intelligentes, fournissant des indications et des alertes en temps réel à l'utilisateur sur les obstacles détectés et les itinéraires sûrs, facilitant ainsi sa navigation autonome et sécurisée.

3.1.1.6 La Décision

Une fois que les données ont été traitées et analysées, le système prend une décision concernant la navigation de l'utilisateur. Cette décision est ensuite représentée sous forme d'un message vocal clair et précis, transmis directement à l'utilisateur par le biais des écouteurs ou du haut-parleur intégré des lunettes intelligentes. Grâce à cette communication audio, l'utilisateur reçoit des instructions en temps réel sur la présence et la nature des obstacles détectés, lui permettant ainsi de naviguer en toute sécurité et en toute confiance dans son environnement.

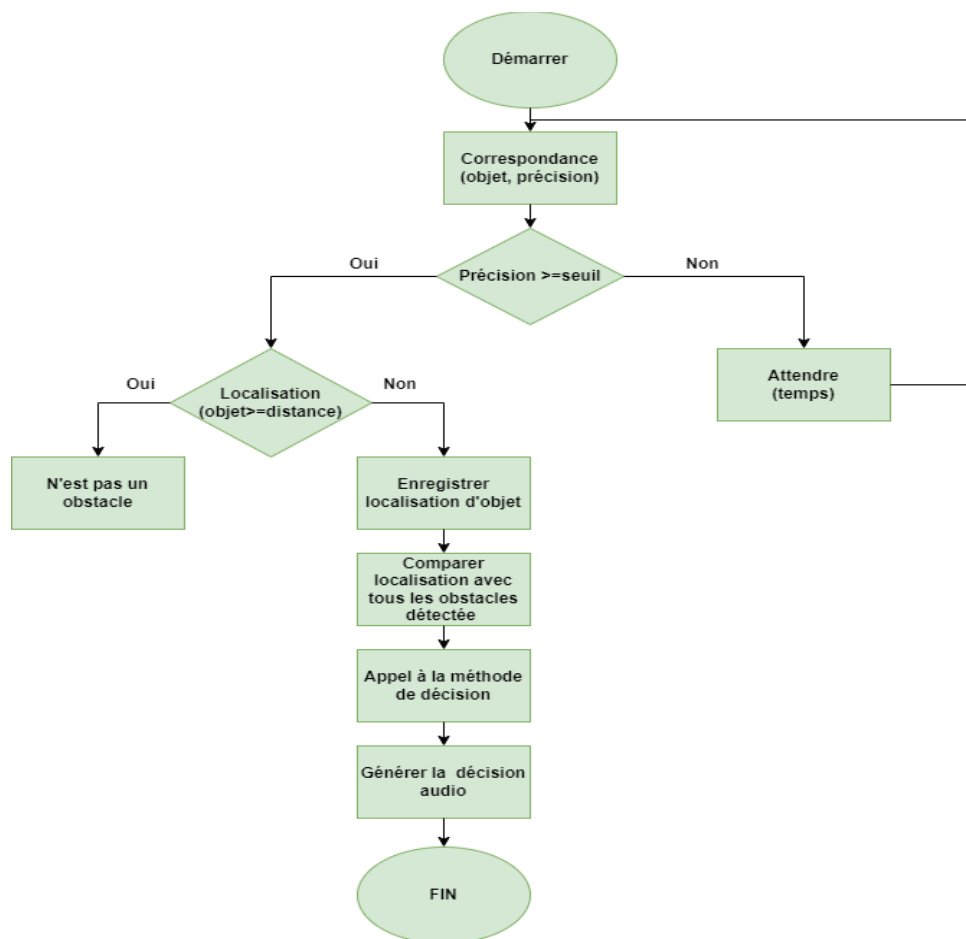


Figure 33: Organigramme de la décision

3.2 Conclusion

En conclusion, notre modèle de système de lunettes intelligentes pour la détection d'obstacles chez les malvoyants et les non-voyants est complet. Avec ses différentes étapes, du traitement des données à la prise de décision transmise par des messages vocaux, il offre une solution intégrée et efficace pour assister les utilisateurs dans leur navigation quotidienne. Grâce à sa conception soigneusement élaborée et à sa capacité à fournir des instructions en temps réel, ce modèle représente une avancée significative dans l'autonomie et la sécurité des personnes ayant une déficience visuelle.

Chapitre 4

Implémentation du modèle de navigation

4.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous allons parler des différents composants utilisés dans notre système (capteur WIFI, capteur GPS, capteur CAMERA, capteur SON) ainsi que les outils qu'on a utilisés dans la programmation. Le système est composé de deux parties : une première partie qui s'incarne dans des lunettes intelligentes composées d'un ensemble de capteur, et une deuxième partie qui consiste en un programme pour une détection d'objet.

4.2 Système de navigation

4.2.1 Lunettes Intelligentes : caractéristiques

Nos lunettes intelligentes représentent une avancée technologique significative pour les personnes non-voyantes et malvoyantes. Conçues pour améliorer leur mobilité et leur sécurité, ces lunettes intègrent une série de capteurs avancés qui détectent et analysent l'environnement en temps réel. Parmi les principaux capteurs, on trouve des capteurs WIFI, GPS, CAMÉRA et SON.

Les capteurs WIFI permettent aux lunettes de se connecter à des réseaux locaux et à des appareils externes. Cette connectivité est essentielle pour recevoir des mises à jour en temps réel sur les conditions environnantes et pour accéder à des bases de données d'informations, améliorant ainsi la précision des instructions fournies aux utilisateurs.

Les capteurs GPS jouent un rôle crucial dans la navigation. Ils fournissent des données de localisation précises, permettant aux lunettes de déterminer la position exacte de l'utilisateur et de planifier des itinéraires sécurisés. Les informations GPS sont également utilisées pour alerter les utilisateurs des points d'intérêt et des dangers potentiels à proximité.

Les caméras intégrées sont essentielles pour la reconnaissance des objets et des personnes. Grâce à des algorithmes de traitement d'image avancés, les caméras peuvent identifier et classer différents types d'obstacles, et même reconnaître les visages. Ces informations sont ensuite converties en instructions audio pour guider l'utilisateur.

Les capteurs SON (ultrasoniques) détectent les obstacles en émettant des ondes sonores à haute fréquence, qui rebondissent sur les objets et retournent vers le capteur. Cela permet de calculer la distance précise des obstacles, ce qui est particulièrement utile pour détecter les objets à hauteur de la tête et les obstacles inattendus.

L'intégration de ces capteurs permet aux lunettes de fournir des instructions en temps réel via des notifications audio, aidant ainsi les utilisateurs à naviguer de manière autonome et sécurisée. Les avantages incluent une réduction significative des risques de collisions et une amélioration notable de la confiance et de l'indépendance des utilisateurs dans leurs déplacements quotidiens.

La figure 34 illustre les différents composants nécessaires à la conception de lunettes intelligentes.



Figure 34 : Composants pour la conception de lunettes intelligentes

4.2.2 Développement de système de navigation

Nos lunettes intelligentes intègrent des technologies avancées pour offrir une assistance complète et en temps réel aux personnes non-voyantes et malvoyantes. Le programme sous-jacent utilise une combinaison de capteurs et d'algorithmes sophistiqués pour fournir des fonctionnalités clés telles que la reconnaissance d'objets, la reconnaissance de texte, et la navigation par commande vocale.

Le modèle YOLOv5, chargé au début du programme, est utilisé pour la détection d'objets. Ce modèle, basé sur des réseaux de neurones convolutifs, permet de détecter et de classer en temps réel les objets présents dans le champ de vision de l'utilisateur. Cette détection est effectuée de manière asynchrone pour assurer une fluidité et une réactivité optimales.

En parallèle, le programme utilise la technologie Tesseract OCR pour la reconnaissance de texte dans les images capturées par les lunettes. Cette fonctionnalité permet de lire et de convertir en audio tout texte détecté, aidant ainsi l'utilisateur à interagir avec son environnement de manière plus informée.

Pour la navigation, le programme s'appuie sur l'API Google Maps. Lorsqu'une commande vocale de type "navigate to [destination]" est reconnue, le système obtient des directions détaillées à partir de la localisation actuelle de l'utilisateur et les convertit en instructions audio claires et précises. Cette intégration permet une navigation assistée efficace, facilitant les déplacements des utilisateurs dans des environnements variés.

Le programme utilise également des capteurs WIFI pour maintenir la connectivité et accéder aux informations en temps réel, et des capteurs GPS pour fournir des données de localisation précises. L'ensemble de ces technologies est orchestré pour offrir une expérience utilisateur intuitive, sécurisée et autonome.

En résumé, nos lunettes intelligentes sont conçues pour améliorer la qualité de vie des personnes non-voyantes et malvoyantes en leur offrant une assistance technologique avancée et en temps réel, leur permettant ainsi de naviguer et d'interagir avec leur environnement de manière plus indépendante et sécurisée.

4.3 Langages, environnements et outils de développement :

4.3.1 Outils de Programmation

4.3.1.1 Python

Python [62] est un langage de programmation polyvalent et simple à utiliser. Il offre des bibliothèques puissantes comme OpenCV pour la vision par ordinateur et TensorFlow pour la Machine Learning. Python est également supporté par une large communauté de développeurs, ce qui facilite l'accès à des ressources et du support.

Nous avons choisi Python pour sa simplicité, sa rapidité de prototypage, et ses bibliothèques robustes pour le traitement d'images et l'intelligence artificielle, indispensables pour notre projet.

4.3.2 Environnement de Développement

4.3.2.1 Visual Studio Code (VSC)

VSC [63] est un IDE open-source de Microsoft, apprécié pour son interface intuitive, ses nombreuses extensions et ses outils de débogage intégrés. Il offre également une excellente intégration avec Git pour le contrôle de version.

VSC a été choisi pour sa flexibilité, ses outils intégrés et son soutien communautaire, qui facilitent le développement et la gestion de notre projet.

4.3.3 Modèle de Détection d'Objets YOLOv5

4.3.3.1 Présentation de YOLOv5

YOLOv5 [64] est un modèle de détection d'objets en temps réel, connu pour sa rapidité et sa précision. Il est compatible avec Python et facile à intégrer avec OpenCV.

YOLOv5 a été choisi pour ses performances en temps réel, sa précision et sa simplicité d'intégration avec notre environnement Python.

4.4 Les packages Utilisés:

Ci-dessous nous présentons un tableau résumant les packages, fonctions, entrées et sorties :

Tableau 3–Résumé des Packages utilisés

Package Utilisés	Fonction	Traitement de la Fonction	Entrées	Sorties
Torch	process_frame(frame)	Chargement du modèle YOLOv5 et détection d'objets.	Frame vidéo (image)	Prédictions de détection d'objets
cv2	scan_text_from_image(frame)	Conversion d'images en niveaux de gris pour OCR.	Frame vidéo (image)	Image convertie

	process_frame(frame)	Capture et traitement d'images/videos.	Frame vidéo (image)	Frame redimensionnée
	start_video_stream()	Démarrage de la capture vidéo depuis la caméra.	Aucun	Frames vidéo affichées
gtts	handle_navigation_command(command)	Conversion de texte en fichiers audio pour les directions.	Texte à convertir	Fichiers audio MP3
	scan_text_from_image(frame)	Conversion de texte extrait en fichiers audio.	Texte extrait	Fichiers audio MP3
	process_frame(frame)	Conversion de texte en fichiers audio pour les objets détectés.	Texte décrivant les objets détectés	Fichiers audio MP3
os	handle_navigation_command(command)	Exécution de commandes système pour jouer et supprimer des fichiers audio.	Commandes système	Exécution des commandes
	scan_text_from_image(frame)	Exécution de commandes système pour jouer et supprimer des fichiers audio.	Commandes système	Exécution des commandes
	process_frame(frame)	Exécution de commandes système pour jouer et supprimer des fichiers audio.	Commandes système	Exécution des commandes
speech_recognition	listen_for_command()	Écoute et reconnaissance des commandes vocales.	Audio capturé depuis le microphone	Commande reconnue sous forme de texte
pytesseract	scan_text_from_image(frame)	Utilisation de Tesseract pour extraire du texte d'une image.	Image contenant du texte	Texte extrait
threading	process_frame(frame)	Exécution de tâches en parallèle pour éviter le blocage de la boucle principale.	Fonctions à exécuter en thread	Résultats des threads

	<code>start_video_stream()</code>	Utilisation de threads pour traiter les frames vidéo en parallèle.	Aucun	Frames vidéo affichées
googlemaps	<code>handle_navigation_command(command)</code>	Obtention des directions entre deux lieux à l'aide de Google Maps API.	Clé API, lieu de départ, destination	Itinéraires et instructions

4.5 Démonstration de la fonctionnalité de la caméra des lunettes

4.5.1 Image avant la détection

L'objectif de cette opération est d'utiliser le modèle de détection d'objets YOLOv5 (You Only Look Once version 5) pour analyser l'image fournie. Le but est d'identifier et de localiser divers objets présents dans l'image, tels que des véhicules, des bâtiments, des personnes, et d'autres éléments pertinents. En utilisant YOLOv5, un modèle avancé de vision par ordinateur, nous visons à obtenir des résultats rapides et précis en matière de détection d'objets.



Figure 35: Exemple de séquence d'une vidéo avant la détection

Figure 35 montre une image capturée par la caméra des lunettes avant toute détection d'objets. Cette image représente l'environnement tel que perçu par les lunettes.

4.5.2 Image après la détection d'objets

Figure 36 illustre la même scène après le traitement par le modèle YOLOv5. Les objets détectés sont encadrés et étiquetés avec les classes correspondantes. Par exemple, on peut voir des cadres autour d'une personne, d'une voiture, et d'autres objets présents dans l'image.

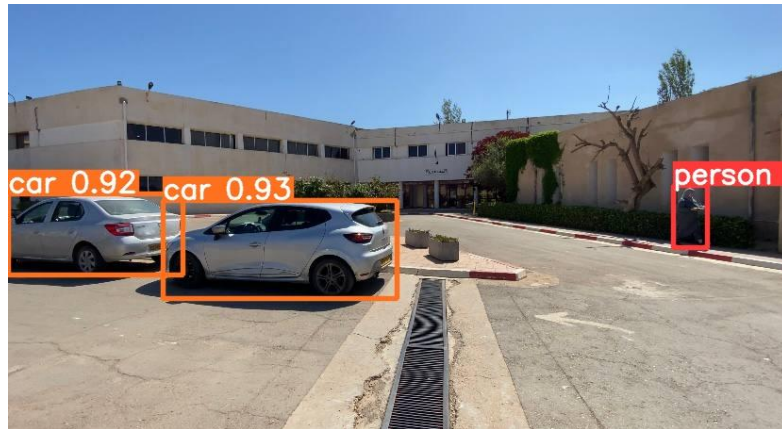


Figure 36: Exemple de détection d'objets par YOLOv5

4.5.3 Explication des valeurs de précision

Les valeurs de précision affichées (telles que les scores de confiance) indiquent la certitude avec laquelle le modèle identifie chaque objet. Un score de confiance élevé (proche de 1) signifie que le modèle est très sûr de sa prédiction, tandis qu'un score plus bas indique moins de certitude. Ces valeurs sont essentielles pour évaluer la fiabilité des détections.

1. Sortie du terminal

```
(venv) C:\Users\DELL\Desktop\lunav\yolov5\python detect.py --source "C:\Users\DELL\Desktop\lunav\Data_source_to_test\5.jpeg"
detect: weights=yolov5s.pt, source=C:\Users\DELL\Desktop\lunav\Data_source_to_test\5.jpeg, data=data\coco128.yaml, imgsz=[640, 640], conf_thres=0.25, iou_thres=0.45, max_de
t=1000, device=, view_img=False, save_txt=False, save_csv=False, save_conf=False, save_crop=False, nosave=False, classes=None, agnostic_nms=False, augment=False, visualize=
False, update=False, project=runs\detect, name=exp, exist_ok=False, line_thickness=3, hide_labels=False, hide_conf=False, half=False, dnn=False, vid_stride=1
YOLOv5 v7.0-312-g1bcd17ee Python-3.10.11 torch-2.3.0+cpu CPU

Fusing layers...
YOLOv5s summary: 213 layers, 7225885 parameters, 0 gradients, 16.4 GFLOPs
image 1/1 C:\Users\DELL\Desktop\lunav\Data_source_to_test\5.jpeg: 352x640 1 person, 2 cars, 297.6ms
Speed: 4.0ms pre-process, 297.6ms inference, 19.5ms NMS per image at shape (1, 3, 640, 640)
Results saved to runs\detect\exp18
```

Figure 37: Exemple de sortie du terminal

Figure 37 montre un exemple de sortie affichée dans le terminal lors de l'exécution du modèle de détection YOLOv5. Les lignes indiquent les objets détectés (une personne et deux voitures) et leurs scores de confiance.

4.6 Fonctionnalités de Reconnaissance de Texte, Connexion et Audio

Reconnaissance de Texte

- Capture de l'image :

Le programme capture des images à partir du flux vidéo en direct des lunettes.

- Conversion en niveaux de gris :

Les images capturées sont converties en niveaux de gris pour améliorer la précision de la reconnaissance de texte.

- Application de Tesseract OCR :

La technologie Tesseract OCR est utilisée pour analyser les images et extraire le texte présent. Une configuration spécifique est utilisée pour optimiser la reconnaissance dans plusieurs langues (arabe, anglais, français).

- Conversion en audio :

Si du texte est détecté, il est converti en audio à l'aide de la bibliothèque gTTS (Google Text-to-Speech).

- Lecture du texte détecté :

Le texte converti en audio est joué pour l'utilisateur via les haut-parleurs des lunettes, en utilisant des commandes système pour lire les fichiers audios.

Connexion

- Initialisation des capteurs :

Les capteurs WIFI des lunettes sont initialisés pour permettre une connectivité.

- Connexion au réseau :

Le capteur WIFI assure que les lunettes sont connectées à un réseau local pour recevoir des mises à jour en temps réel et accéder aux bases de données nécessaires.

4.6.1 Audio

- Reconnaissance de commandes vocales :

Le programme utilise la bibliothèque `speech_recognition` pour écouter et reconnaître les commandes vocales des utilisateurs.

- Gestion des commandes :

Les commandes vocales sont interprétées et les actions correspondantes sont exécutées (par exemple, obtenir des directions, annoncer des objets détectés, etc.).

- Synthèse vocale :

La bibliothèque `gTTS` est utilisée pour convertir le texte (extrait des images ou obtenu des directions) en fichiers audio.

- Lecture des fichiers audio :

Les fichiers audio générés sont lus pour l'utilisateur via des commandes système, en utilisant les haut-parleurs intégrés des lunettes.

- Suppression des fichiers temporaires :

Après la lecture des fichiers audio, ils sont supprimés pour libérer de l'espace et maintenir les performances du système.

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons détaillé l'implémentation du modèle de navigation en utilisant diverses technologies et outils de développement. L'ensemble de ces choix technologiques et méthodologiques a permis de créer une solution performante pour la détection d'objets en temps réel.

Conclusion Générale

L'intégration de l'intelligence artificielle et de l'Internet des Objets dans les systèmes de navigation pour les non-voyants et les malvoyants représente une avancée importante dans le domaine de la technologie. Les solutions développées permettent non seulement d'améliorer la mobilité et l'indépendance des utilisateurs, mais aussi d'assurer leur sécurité en leur donnant des indications précises et adaptées à leurs besoins spécifiques.

Le système de navigation intelligent proposé dans ce travail, incarné dans des lunettes intelligentes, utilise une combinaison de capteurs avancés, de techniques de traitement d'image et d'algorithmes de Machine Learning pour détecter et signaler les obstacles en temps réel. Grâce à l'utilisation de la caméra, des capteurs ultrasoniques, infrarouges, d'accéléromètre, de gyroscope, de boussole électronique, de

GPS et de reconnaissance vocale, le système est capable de fournir une perception détaillée de l'environnement et des instructions de navigation claires et précises.

Les méthodes de Machine Learning, telles que les réseaux de neurones convolutifs et les modèles de Deep Learning, jouent un rôle crucial dans l'analyse et le traitement des données capturées par les capteurs, permettant une reconnaissance et une classification précises des objets. La fusion des données sensorielles et les techniques de correction des erreurs assurent une fiabilité accrue des informations fournies à l'utilisateur.

Bien que chaque type de capteur présente des avantages spécifiques, il est essentiel de prendre en compte leurs limitations et de les intégrer de manière cohérente pour garantir une navigation fluide et sûre. La recherche continue dans ce domaine promet de surmonter ces défis et de développer des solutions encore plus sophistiquées et inclusives.

En conclusion, ce projet de système de navigation intelligent pour les non-voyants et les malvoyants ouvre la voie à un futur où la mobilité est véritablement universelle. En poursuivant l'innovation et en améliorant ces technologies, nous pouvons espérer créer une société plus inclusive, où chaque individu, quelle que soit sa condition, peut jouir d'une autonomie accrue et participer pleinement à la vie sociale. Les perspectives d'évolution dans ce domaine sont vastes et prometteuses, offrant des opportunités pour une amélioration continue de la qualité de vie des personnes ayant des déficiences visuelles.

Annexe A: Business Model Canvas

Business Model Canvas		Réalisé pour: Lunav	Réalisé par: L'équipe Lunav	Date: 04/06/2024	Version: 1.0
Partenaires clés	Activités clés	Position de valeur	Relation clients	Segments clients	
<ul style="list-style-type: none"> - Fournisseur de matériel. - Association de non voyants et mal voyantes - Direction de la santé et de la population. - Direction d'action sociale. - Partenaires de distribution et de vente (marché en ligne). 	<ul style="list-style-type: none"> - Programmation et développement. - Conception et production. - Marketing et vente. - Support client. - Gestion des partenariats. - Le suivi. 		<ul style="list-style-type: none"> - Lunettes (Lunav) d'aide aux personnes non voyantes et mal voyantes. 		
	Ressources clés		Canaux de distribution		
	<ul style="list-style-type: none"> - Ressources humaines. - Composantes matériels avancées. - Programmes informatiques et logiciels. - Parapharmaceutique. 		<ul style="list-style-type: none"> - Plateforme. - Boutique. - Cartes visites. - Flyers. - Compagne publicitaire. - Compagne Emailing. - Evenements et expositions. 		
Structure de coûts			Sources de revenus		
<ul style="list-style-type: none"> - Coût fixes: locale. - Coût variables: maintenance, frais d'expertise. - Coût de fabrication. - Marketing et ventes. - Dépenses administratives. - Coût de distribution. - Frais de licence. 			<ul style="list-style-type: none"> - Vente de produit et accessoires d'accompagnement payantes. - Services d'abonnement (maintenance annuels ou mensuels). 		

Annexe B: Business Plan

Notre projet est intitulé Lunav, il offre un système de navigation intelligent conçu pour aider les non-voyants et les mal voyants, ‘Lu’ signifie lunette et ‘nav’ signifie navigation.

Tableau 4-Conception lunette

Les composants	Quantité	Prix unitaire	Prix Total
CPU	10	13 370,00 .ج.د	133 700,00 .ج.د
Cadre Smart Glasses	10	2 700,00 .ج.د	27 000,00 .ج.د
Raspberry Pi Camera module V3	10	3 380,00 .ج.د	33 800,00 .ج.د
VL53L0X TOF Distance Sensor	10	1 350,00 .ج.د	13 500,00 .ج.د
NVIDIA Jetso nano / raspberry	10	13 370,00 .ج.د	133 700,00 .ج.د
Small Speakers	10	1 350,00 .ج.د	13 500,00 .ج.د
USB Microphone	10	680,00 .ج.د	6 800,00 .ج.د
2000mAh Lithium polymer Battery	10	1 350,00 .ج.د	13 500,00 .ج.د
PowerBoost 1000C	10	2 050,00 .ج.د	20 500,00 .ج.د
Capacitive Touch Sensor Module	10	680,00 .ج.د	6 800,00 .ج.د
64GB MicroSD Card	10	2 050,00 .ج.د	20 500,00 .ج.د
GPS Module for Jetson Nano	10	3 380,00 .ج.د	33 800,00 .ج.د
Wi-Fi and Bluetooth USB Adapter	10	1 350,00 .ج.د	13 500,00 .ج.د

Tableau 5–Personnels Lunav

Les employés	Nombre des employés	Salaire mensuel
Technicien supérieur (en informatique)	2	33 000,00 .ج.د
Technicien supérieur (en électronique)	2	33 000,00 .ج.د
Infographe	1	33 000,00 .ج.د
Magasinier	1	29 000,00 .ج.د
Agent de sécurité	2	25 000,00 .ج.د
Femme de ménage	1	25 000,00 .ج.د
Comptable	1	32 000,00 .ج.د

Tableau 6–Les besoins de lunav

Les besoins	Quantité	Prix unitaire	Prix total
Local (12 mois location)	1	720 000,00 .د.ج.	720 000,00 .د.ج.
PCs gamer	4	120 000,00 .د.ج.	480 000,00 .د.ج.
PCs	2	60 000,00 .د.ج.	120 000,00 .د.ج.
Serveur Hb	1	65 000,00 .د.ج.	65 000,00 .د.ج.
Bureau	4	40 000,00 .د.ج.	160 000,00 .د.ج.
Chaise Bureau	4	40 000,00 .د.ج.	160 000,00 .د.ج.
Chaise	10	10 000,00 .د.ج.	100 000,00 .د.ج.
Voiture de service	1	2 500 000,00 .د.ج.	2 500 000,00 .د.ج.
Accessoire de bureau	/	35 000,00 .د.ج.	35 000,00 .د.ج.
Imprimante multifonction	1	40 000,00 .د.ج.	40 000,00 .د.ج.
Imprimante numérique	1	550 000,00 .د.ج.	550 000,00 .د.ج.
Imprimante 3D (Anisoprint Composer A4)	1	1 800 000,00 .د.ج.	1 800 000,00 .د.ج.
Table de réunion	1	70 000,00 .د.ج.	70 000,00 .د.ج.
Climatiseur 12	2	85 000,00 .د.ج.	170 000,00 .د.ج.
Climatiseur 8	1	69 400,00 .د.ج.	69 400,00 .د.ج.
Les étagères	7m	20 000,00 .د.ج.	20 000,00 .د.ج.
Table de travail	1	60 000,00 .د.ج.	60 000,00 .د.ج.
Les onduleurs	1	50 000,00 .د.ج.	50 000,00 .د.ج.
Groupe électrogène	1	30 000,00 .د.ج.	30 000,00 .د.ج.
Armoire métallique	1	26 000,00 .د.ج.	26 000,00 .د.ج.
Caméra de surveillance	6	10 000,00 .د.ج.	60 000,00 .د.ج.

Bibliographie

Livres et monographies :

- [2] Nasserddine, G., & Amal, A. (2023). Artificial Intelligence in Navigation Systems. In Handbook of Research on AI Methods and Applications in Computer Engineering (pp. 86-107). IGI Global.
- [4] Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). Apprentissage profond. MIT Press.
- [22] Bishop, C. M. (2006). Pattern recognition and machine learning. Springer google schola, 2, 1122-1128.
- [24] LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. Nature, 521(7553), 436-444.
- [49] Siciliano, B., Khatib, O., & Kröger, T. (Éds.). (2008). Manuel de robotique Springer (Vol. 200). Berlin: Springer.

Articles :

- [1] Papin, É. (2019). Apports de l'intelligence artificielle aux systèmes navals. Revue Défense Nationale, (6), 123-127.
- [8] El Sanharawi, M., & Naudet, F. (2013). Comprendre la régression logistique. Journal français d'ophtalmologie, 36(8), 710-715.
- [9] Rakotomalala, R. (2005). Arbres de décision. Revue Modulad, 33, 163-187.
- [11] Francoeur, D. (2010). Machines à vecteurs de support-une introduction. Cahiers de Mathématique de l'Université de Sherbrooke, 1, 7-25.
- [12] Barigou, F., Atmani, B., Bouziane, Y., & Barigou, N. (2013). Accélération de la méthode des K plus proches voisins pour la catégorisation de textes. In EGC (Vol. 2013, pp. 241-246).
- [13] Govender, P., & Sivakumar, V. (2020). Application of k-means and hierarchical clustering techniques for analysis of air pollution: A review (1980–2019). Atmospheric pollution research, 11(1), 40-56.

- [15] Gómez Ruiz, M. Á., de Almeida, I. M., & Pérez Fernández, R. (2023). Application of Machine Learning Techniques to the Maritime Industry. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(9), 1820.
- [16] Leon, L., Wendt, H., Tourneret, J. Y., & Abry, P. (2022). Estimation du paramètre de multifractalité: régression linéaire, maximum de vraisemblance ou inférence Bayésienne? *Proc. GRETSI, Nancy*, (001-0323), 1293-1296.
- [17] Moïse, M. K., Eloge, K. M., Florence, K. M., Gilbert, P. N., Jean, M. S., & Paul, P. M. J. (2022). Perceptions des agriculteurs sur la culture de chia (*Salvia hispanica* L.) en ville de Butembo: Essai d'application du modèle de régression logistique. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 36(2), 468-492.
- [18] Portoleau, T., Artigues, C., & Guillaume, R. (2020, February). Arbres de décision robustes pour l'ordonnancement proactif/réactif sous incertitude. In *21ème Congrès annuel de la Société française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision (ROADEF 2020)*.
- [19] Audemard, G., Bellart, S., Bounia, L., Koriche, F., Lagniez, J. M., & Marquis, P. (2022). Les raisons majoritaires: des explications abductives pour les forêts aléatoires. *Extraction et Gestion des Connaissances: EGC'2022*, 38.
- [20] Mohammadi, M., Rashid, T. A., Karim, S. H. T., Aldalwie, A. H. M., Tho, Q. T., Bidaki, M., ... & Hosseinzadeh, M. (2021). A comprehensive survey and taxonomy of the SVM-based intrusion detection systems. *Journal of Network and Computer Applications*, 178, 102983.
- [21] Zhang, S., & Li, J. (2021). KNN classification with one-step computation. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 35(3), 2711-2723.
- [23] Jolliffe, I. T. (2003). Principal component analysis. *Technometrics*, 45(3), 276.
- [25] Richard, V., Loison, R., Gillard, R., Legay, H., & Romier, M. (2017, May). Modélisation de cellules de réseaux réflecteurs par réseaux de neurones artificiels. In *JNM2017*.
- [26] Lacharme, G., Cardot, H., Lenté, C., & Monmarché, N. (2022, February). Optimisation d'hyperparamètres appliquée aux réseaux de neurones convolutifs (CNN). In *23ème congrès annuel de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision*.
- [28] Sherstinsky, A. (2020). Fundamentals of recurrent neural network (RNN) and long short-term memory (LSTM) network. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 404, 132306

- [29] Guarino, G., Samet, A., & Cavallucci, D. (2022). Réseau antagoniste génératif pour la fouille des contradictions TRIZ dans les brevets. *Extraction et Gestion des Connaissances: EGC'2022*, 38.
- [30] Gangloff, H., Pham, M. T., Courtrai, L., & Lefèvre, S. (2022, July). Autoencodeurs variationnels à registre de vecteurs pour la détection d'anomalies. In *RFIAP 2022- (Congrès Reconnaissance des Formes, Image, Apprentissage et Perception)*.
- [31] Crochepierre, L., Marot, A., Barbesant, V., Donnot, B., & Boudjeloud-Assala, L. (2019). Utilisation de réseau de neurones siamois en clustering: application aux événements du réseau électrique français. *Société Francophone de Classification (SFC) Actes des 26èmes Rencontres*, 111.
- [32] Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., & Polosukhin, I. (2017). Attention is all you need. *Advances in neural information processing systems*, 30, I.
- [33] Zhang, J., et al. "Deep learning for healthcare: Review, opportunities and challenges." *Briefings in bioinformatics* 19.6 (2018): 1236-1246.
- [34] Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. "Imagenet classification with deep convolutional neural networks." *Advances in neural information processing systems* 25 (2012): 1097-1105.
- [35] Mikolov, T., et al. "Recurrent neural network based language model." *Eleventh Annual Conference of the International Speech Communication Association*. 2010.
- [36] Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. "Long short-term memory." *Neural computation* 9.8 (1997): 1735-1780.
- [37] Goodfellow, I., et al. "Generative adversarial nets." *Advances in neural information processing systems* 27 (2014).
- [38] Hinton, G. E., & Salakhutdinov, R. R. "Reducing the dimensionality of data with neural networks." *Science* 313.5786 (2006): 504-507.
- [39] Bromley, J., et al. "Signature verification using a " siamese" time delay neural network." *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence* 7.04 (1993): 669-688
- [40] Vaswani, A., et al. "Attention is all you need." *Advances in neural information processing systems* 30 (2017).

[47] Smith, J., & Johnson, A. (2023). The Role of IoT in Modern Navigation Systems. Journal of Navigation Technology, 15(2), 245-263.

Rapports techniques:

[3] Organisation mondiale de la Santé. (2021). Plan d'action mondial pour la sécurité des patients 2021-2030 : vers l'élimination des préjudices évitables dans les soins de santé. Organisation mondiale de la Santé.

[7] Guyader, A. (2011). Régression linéaire. Université Rennes, 2, 60-61.

[14] Saporta, G., & Niang, N. (2003). Analyse en composantes principales. Analyse des données.

[41] Kretschmann, L., Zacharias, M., Klöver, S., & Hensel, T. (2022). Machine Learning in Maritime Logistics.

Thèses :

[10] Scornet, E. (2015). Apprentissage et forêts aléatoires (Doctoral dissertation, Paris 6).

[27] Valentin, N. O. Ë. L. (2022). Séries temporelles et réseaux de neurones récurrents. Ecole normale supérieure Parisaclay.

[42] Braquelaire, T. D. I. A. TRAITEMENT D'IMAGE.

[43] Merabet, N., & Mahlia, M. (2011). Recherche d'images par le contenu (Doctoral dissertation, Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen).

[45] Solis Montero, A. (2010). Towards Feature Detection based on Morphology of Objects on Image (Doctoral dissertation, University of Ottawa (Canada)).

Documents Web :

[6] Oracle, 2024, <https://www.oracle.com/>, Consulté le 09/03/2024.

[5] IBM, 2020, <https://www.ibm.com/>, Consulté le 09/03/2024

[44] researchgate, 2024, www.researchgate.net/, Consulté le 09/03/2024.

[46] Alibaba Cloud, 2024, www.alibabacloud.com/, Consulté le 11/03/2024.

[48] Raspberry Pi Foundation, 2022, <https://www.raspberrypi.org/>, Consulté le 28/3/2024.

- [50] Lektor, 2024, <https://www.elektor.com/>, Consulté le 30/03/2024.
- [51] Sick, 2024, <https://www.sick.com/>, Consulté le 30/03/2024.
- [52] Verisure, 2019, <https://www.verisure.fr/>, Consulté le 30/03/2024.
- [53] Yoctopuce, 2020 , <https://www.yoctopuce.com/>, Consulté 30/03/2024.
- [54] LexTronic, 2022, <https://www.lextronic.fr/>, Consulté le 31/03/2024.
- [55] Echzeero, 2023, <https://techzeero.com/gps-receiver-module>, Consulté le 31/03/2024.
- [56] Dzduino, 2021, <https://www.dzduino.com/>, consulté le 31/03/2024.
- [57] LexTronic, 2022, <https://www.lextronic.fr/>, Consulté le 31/03/2024.
- [58] Youpilab, 2024, <https://youpilab.com/>, Consulté le 31/04/2024.
- [59] DigiKey, 2020, <https://www.digikey.com/>, Consulté le 30/03/2024.
- [60] Sick, 2024, <https://www.sick.com/>, Consulté le 30/03/2024.
- [61] Mdpi, 2024, <https://www.mdpi.com/>, Consulté le 04/04/2024.
- [62] Python.org, 2024, <https://www.python.org>, Consulté le 08/04/2024.
- [63] Visual code studio, 2024, <https://code.visualstudio.com/>, Consulté le 10/04/2024.
- [64] Ultralytics, 2024, <https://docs.ultralytics.com/>, Consulté le 10/04/2024.