



**HAL**  
open science

# Coopération UAV-UGV pour l'inventaire d'entrepôts logistiques

François Guérin, Frédéric Guinand

► **To cite this version:**

François Guérin, Frédéric Guinand. Coopération UAV-UGV pour l'inventaire d'entrepôts logistiques. Cahiers de la logistique, 2024, La robotisation dans les entrepôts logistiques (5). hal-04854373

**HAL Id: hal-04854373**

**<https://normandie-univ.hal.science/hal-04854373v1>**

Submitted on 23 Dec 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0  
International License



**La robotisation dans  
les entrepôts  
logistiques**

**PÔLE INGÉNIEUR  
LOGISTIQUE  
LE HAVRE NORMANDIE**

---

**CAHIERS DE LA  
LOGISTIQUE**



**CAHIERS DE LA  
LOGISTIQUE  
CL2024 – N° 05**

**La robotisation dans les entrepôts logistiques**

Décembre, 2024  
Copyright © 2024, ISEL



La présente publication est protégée par le code de la propriété intellectuelle et plus précisément ses articles relatifs au respect du droit d’auteur.

Les auteurs demeurent seuls responsables du contenu de leur œuvre. Ils garantissent disposer des autorisations nécessaires de la part des tierces parties titulaires de droits sur des œuvres partiellement ou globalement reproduites. Les droits moraux et patrimoniaux sur l’œuvre demeurent attachés à leurs auteurs.

Afin de faciliter le partage et l’utilisation de leur création, les auteurs autorisent les utilisateurs à :

- Télécharger et imprimer une copie de la présente publication à des fins d’études, de recherche, de diffusion de la culture scientifique et de partage des connaissances ;
- Distribuer gratuitement et sans aucune contrepartie l’URL identifiant la publication.

La présente publication, et l’URL associée ne peuvent en aucun cas être distribuées ou utilisées dans le cadre d’une activité à but lucratif ou à des fins commerciales. Aucune modification du contenu de l’œuvre n’est autorisée.

## COOPERATION UAV-UGV POUR L'INVENTAIRE D'ENTREPOTS LOGISTIQUES

François Guérin<sup>1</sup>, Frédéric Guinand<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Le Havre Normandy University GREAH - LITIS, 76600 Le Havre, France  
{francois.guerin, frederic.guinand}@univ-lehavre.fr

<sup>2</sup>Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Cardinal Stefan Wyszyński University,  
01-815 Warsaw, Poland

### RESUME

Cet article présente, à travers un projet d'innovation, l'utilisation de robots mobiles pour les opérations d'inventaire dans les entrepôts logistiques. Ces robots mobiles peuvent se déplacer de manière autonome à travers les zones de stockage pour recueillir des données (codes-barres, codes SKU, etc.) sur les produits entreposés et les transmettre directement au système de gestion d'entrepôt (WMS) via un réseau de communication. L'objectif de leur mise en œuvre est l'amélioration de la gestion logistique en apportant plus de fiabilité et en réduisant les coûts globaux des opérations d'inventaire. En effet, en utilisant des robots, ces opérations peuvent être réalisées à des heures qui n'interfèrent pas avec le fonctionnement habituel des installations logistiques. Cependant, la navigation autonome des drones peut poser des défis, car les entrepôts logistiques sont souvent des environnements dynamiques et encombrés, difficiles à équiper en instruments de guidage. Cet article propose une solution innovante pour la gestion des inventaires dans les entrepôts logistiques en utilisant des drones aériens (UAV) et terrestres (UGV). Le projet décrit a été mis en œuvre, en conditions réelles, dans un véritable entrepôt de la région havraise avec un drone aérien et un drone terrestre travaillant de manière coordonnée et coopérative. Les résultats obtenus montrent, d'une part que la solution fonctionne, et d'autre part qu'elle peut être déployée facilement sans qu'il ne soit nécessaire de pré-équiper l'entrepôt.

**MOTS CLÉS:** Robotique Mobile, Robot mobile aérien, Robot mobile terrestre, Navigation Autonome

### ABSTRACT

This article describes, through an innovation project, the use of mobile robots for inventory operations in logistics warehouses. These mobile robots (drones) can move in an autonomous way through the storage facilities to acquire data (barcodes, SKU codes, ...) about the stored products and transmit them directly to the Warehouse Management System (WMS) using a communication network. Generally, they improve logistics management by providing reliability and by reducing the global cost of inventory operations since these can be carried out at hours that do not affect the normal operation of the logistics facilities. However, autonomous navigation of drones can be challenging because logistics facilities are known to be dynamic and cluttered environments potentially difficult to instrument. This article describes an innovating solution for inventory management in logistics warehouses using UAVs and UGVs.

**KEYWORDS:** Mobile Robotics, Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Unmanned Ground Vehicle (UGV), Autonomous Navigation

## 1. Introduction

L'une des tâches les plus laborieuses dans le secteur de la logistique est la gestion des inventaires. Un inventaire consiste à compter les articles en stock en scannant les produits situés à des emplacements physiques spécifiques. Cette tâche n'apporte pas de valeur ajoutée mais doit être réalisée régulièrement (au moins une fois par an) pour vérifier que la valeur des stocks correspond bien à celle enregistrée dans le bilan comptable, ce qui est une obligation légale. L'inventaire est une tâche chronophage qui bloque les activités de l'entrepôt, mobilise d'importantes ressources humaines et matérielles, et qui peut s'avérer dangereuse lorsque les produits se trouvent à de grandes hauteurs (parfois plus de 10 mètres). Le coût élevé des opérations d'inventaire a conduit au développement de diverses solutions alternatives ((Airborne Data Collection, 2016), (Eyeseer, 2016), (The flying inventory assistant, 2016)) visant plusieurs objectifs : réduire les coûts, limiter les risques pour les personnels et limiter l'impact de l'inventaire sur les opérations courantes de l'entrepôt logistique. Parmi les solutions envisagées, certaines utilisent des véhicules aériens sans pilote (UAV) et/ou des véhicules terrestres sans pilote (UGV). Ces robots mobiles (drones) peuvent se déplacer dans les installations de stockage pour recueillir des données (codes-barres, codes SKU, etc.) sur les produits en entrepôt et les transmettre directement au système de gestion d'entrepôt (WMS) via le réseau de communication de l'entrepôt. L'utilisation des drones permet de répondre aux trois objectifs précédents. En premier lieu, ils ne nécessitent pas d'installation spécifique ou la location d'engins permettant d'accéder aux parties hautes des entrepôts. En second lieu, le nombre d'opérateurs nécessaires pour effectuer les tâches d'inventaire est nettement réduit et ces personnes ne sont pas exposées aux divers dangers inhérents aux opérations d'inventaire, celles-ci étant effectuées par les drones. En troisième lieu, en fonction de leur autonomie et des capteurs qu'ils embarquent, les drones sont en capacité d'effectuer ces opérations à des horaires qui n'interfèrent pas ou très peu avec le fonctionnement normal des installations logistiques. Enfin, ils permettent de générer des informations complémentaires à l'inventaire. Ils peuvent, par exemple, cartographier les étagères pour en déterminer les taux d'occupation. Une solution utilisant des robots a donc de sérieux atouts à faire valoir pour les tâches d'inventaire. Cependant la mise en œuvre d'une telle solution se heurte à de multiples défis. Par exemple, déterminer la position des UAV/UGV dans les installations de stockage peut poser de réels problèmes. En effet, l'environnement est souvent dynamique et encombré. Ainsi, les solutions actuelles impliquent généralement un opérateur humain pour contrôler le drone sur place ou pour définir un plan de vol via une interface homme-machine (HMI). Il est important de noter que la navigation autonome nécessite un système de positionnement en intérieur, tel que des balises (Ultra-Wide Band ou système de positionnement Wi-Fi) pour obtenir une estimation précise de la position du drone. Cette exigence technologique entraîne des coûts supplémentaires qui peuvent être significatifs. Néanmoins, bien que ces systèmes soient souvent coûteux à l'achat, ils peuvent être facilement accessibles en location sous forme de "drone-as-a-service". Cet article présente un projet innovant, le projet "DRIVELOG", développé à l'Institut Supérieur d'Études Logistiques (ISEL) de l'Université Le Havre Normandie, en partenariat avec la Région Normandie, Bolloré Logistics, Drone XTR et CIRCOE. Ce projet concerne les inventaires dans les entrepôts logistiques à l'aide de deux robots mobiles collaboratifs, un UAV et un UGV.

## 2. Inventaire dans les entrepôts logistiques

### 2.1 Description du problème

Effectuer une prise de vue aérienne d'une palette sur une étagère et détecter les informations associées (codes-barres, codes SKU) nécessite une estimation précise de la position du drone (UAV) par rapport à l'étagère à inventorier. Compte tenu du coût et des difficultés d'installation d'un système de positionnement en intérieur (balises Ultra-Wide Band (UWB), Positionnement Wi-Fi (WPS), etc.) dans un entrepôt logistique, la solution développée dans le cadre du projet DRIVELOG (Figure 1) consiste à combiner un véhicule aérien sans pilote (UAV) avec un véhicule terrestre sans pilote (UGV) (Harik, 2016).

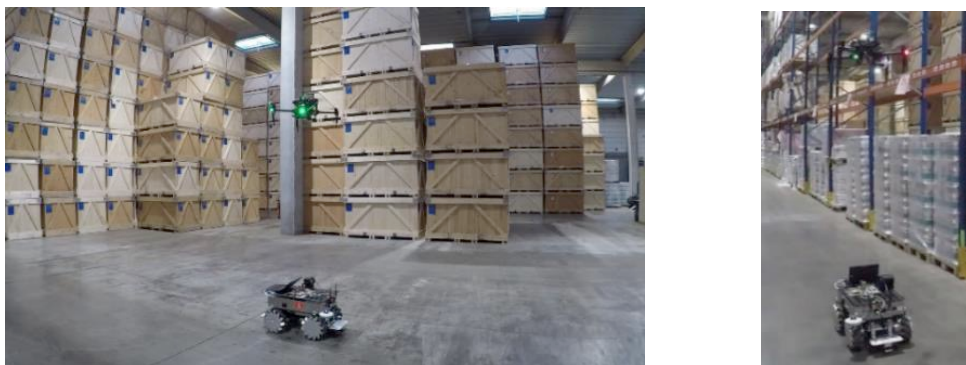


Figure 1 – Collaboration UAV/UGV pour les inventaires en entrepôts logistiques

Après s'être positionné correctement devant une colonne de palettes, l'UGV transmet au drone l'ordre de scanner les informations placées sur chaque palette (en montant ou descendant selon la colonne). Lors de ce mouvement vertical, l'objectif principal est de déterminer si chaque emplacement est vide ou (partiellement) rempli et d'identifier les codes-barres présents sur les palettes (Harik et al., 2016).

### 2.2 Navigation autonome du robot terrestre

La navigation autonome de l'UGV repose principalement sur ses capteurs extéroceptifs (odométrie, lidars, etc.). Ceux-ci permettent à l'UGV de se déplacer au milieu de l'allée tout en restant parallèle aux étagères (Figure 1). Pour détecter la position des colonnes de palettes à inventorier, un capteur de couleur industriel (Sensor Instruments SPECTRO-3-1000-COF) a été installé sur l'UGV. Ce capteur de couleur détecte (après une phase d'apprentissage) la couleur spécifique d'une étiquette placée sur la structure (poteaux) de l'étagère (Figure 2). Le capteur de couleur délivre une information binaire (codée sur cinq bits) par couleur apprise.

La reconnaissance se fait en quelques millisecondes, et l'information fournie par le capteur de couleur peut être utilisée directement par l'UGV sans traitement informatique complexe, ce qui permet de respecter le fonctionnement en temps réel du système. Une interface a été conçue pour transmettre les informations binaires à un module Arduino Mega 2560, sur lequel la bibliothèque "Rosserial" (<http://wiki.ros.org/rosserial>) a été installée. Les messages du capteur de couleur sont publiés (sous forme de "publisher") dans ROS (Robot Operating System (ROS, 2007)) et utilisés par l'UGV (en tant que "subscriber") durant la phase de navigation. Cette information permet à l'UGV de repérer le début (en rouge) et la fin (en vert) de l'allée, ainsi que

chaque poteau (en jaune) devant lesquels il marque une pause (Figures 2 et 3). Sur les étagères logistiques, une alvéole (délimitée par deux poteaux) contient quatre colonnes de palettes. Après avoir détecté un poteau rouge ou jaune et s'être arrêté devant, l'UGV avance par étapes régulières (environ 80 cm) pour atteindre les colonnes de palettes à inventorier. Pour ce faire, il utilise les données d'odométrie publiées ("publisher") dans ROS par l'unité de mesure inertielle (IMU) et les encodeurs incrémentaux installés sur chaque roue. Afin de rester parallèle aux étagères pendant son déplacement, l'UGV utilise ses deux lidars "Hokuyo UST-10LX" (Figure 4) installés à l'avant et à l'arrière. Ces lidars ont une résolution de 1080 incréments sur 270° et une portée maximale de 30 mètres.

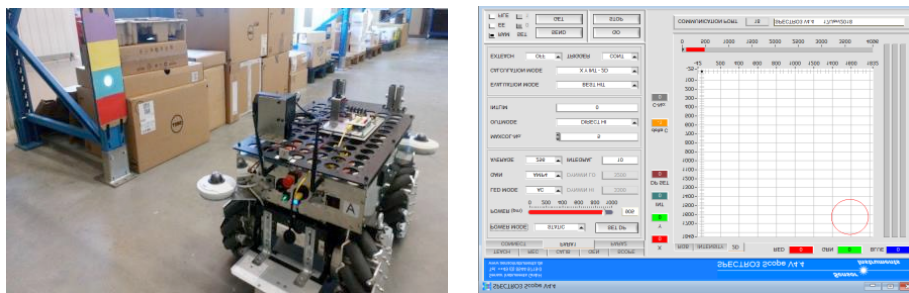


Figure 2 – Le capteur de couleur SPECTRO-3-1000-COF et son logiciel d'apprentissage

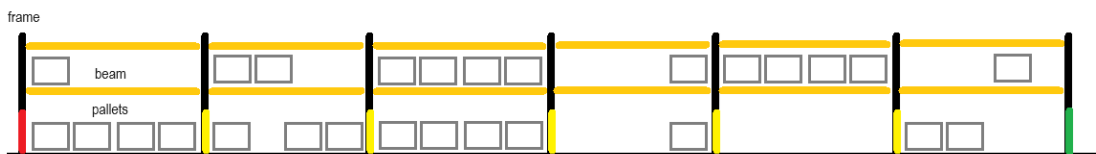


Figure 3 – Identification avec des repères de couleur

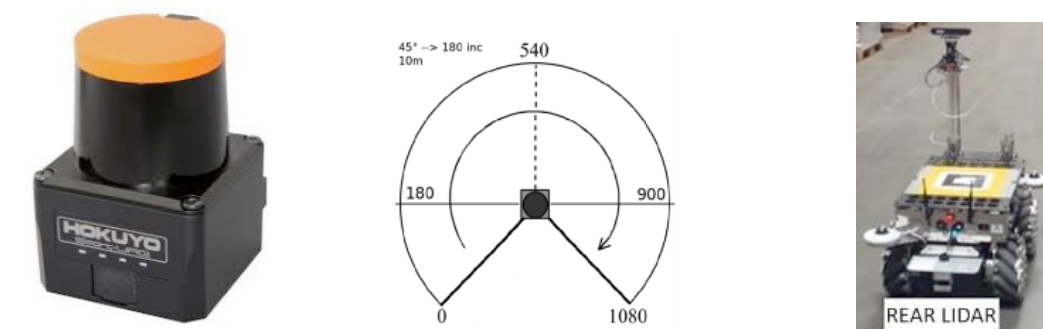


Figure 4 - Lidars « Hokuyo UST-10LX »

Un algorithme a été conçu pour reconstruire des murs virtuels à partir des impacts des lidars causés par les palettes placées au sol (Figure 5), en tenant compte des contraintes de stockage. Cet algorithme est basé sur la transformée de Hough (Hough, 1959), habituellement utilisée en traitement d'images pour extraire des lignes (Duda et al., 1972). Après avoir déterminé la matrice d'accumulation à partir des impacts du lidar, nous avons retenu les valeurs de cette matrice dépassant un certain seuil (Figure 6) et avons calculé pour chacune d'elles les paramètres de la ligne correspondante (Figure 7). Parmi toutes les lignes droites obtenues, seules sont retenues celles qui passent à droite et à gauche de

l'UGV et dont l'espacement correspond à la largeur de l'allée, avec une tolérance de 10 % (ces vérifications sont effectuées par rapport à l'axe latéral (y) de l'UGV). Pour chaque paire de lignes, nous calculons ensuite le déterminant (1) des vecteurs associés et le nombre d'impacts lidar ( $N_{IMP}$ ) situés entre elles, puis nous calculons le critère  $J$  (2). La paire de lignes retenue pour la navigation est celle pour laquelle le critère  $J$  est minimal (Figure 8).

$$\det(\vec{V}_1, \vec{V}_2) = xd_1 \cdot yd_2 - xd_2 \cdot yd_1 \quad (1)$$

$$J = \frac{(1+N_{imp}) * (1 + |\det(\vec{V}_1, \vec{V}_2)|)}{Acc1 + Acc2} \quad (2)$$

Les résultats pour le cas sélectionné (Figure 8) sont présentés ci-dessous. Ils sont générés dès que les messages du lidar sont publiés ("publisher") dans ROS (toutes les 70 ms).

Nombre total de lignes : 166 - Impacts entre lignes :  $N_{IMP} = 101$

Déterminant :  $\det = 0.021362305$  – Critère :  $J = 1.2113832$

Lignes sélectionnées : ligne 59 →  $Acc1 = 42$  - ligne 108 →  $Acc2 = 44$

Les erreurs de positionnement (3) de l'UGV (axe y) peuvent être estimées par rapport au rack situé à gauche, au rack situé à droite ou au centre de l'allée :

$$e_y = dy_l - d_{ref} \quad / \quad e_y = d_{ref} - dy_r \quad / \quad e_y = dy_r - dy_l \quad (3)$$

L'erreur d'orientation (4) de l'UGV (axe z) par rapport aux racks est donnée par :

$$e_\theta = \theta_z - \theta_{ref} \quad \text{with} \quad \theta_z = \tan^{-1} \frac{xd_1}{yd_1} \quad (4)$$

La distance et l'orientation de référence sont respectivement  $d_{ref}(1,5 \text{ m})$  et  $\theta_{ref}(0^\circ)$ .

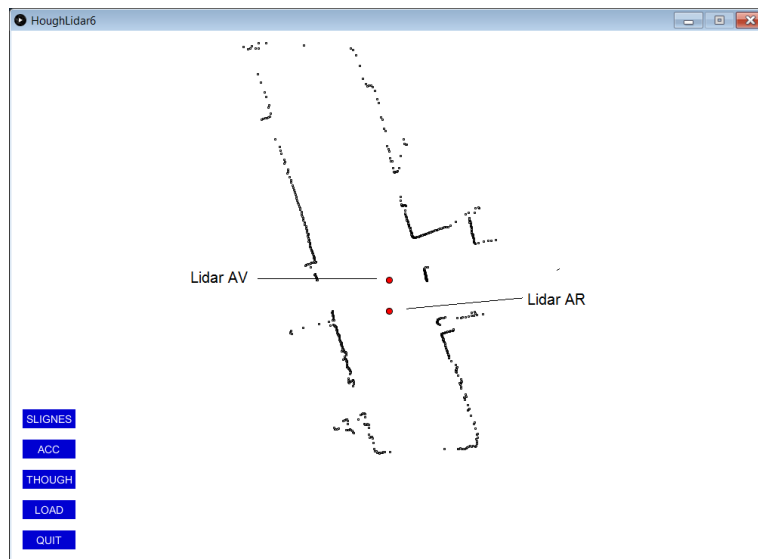


Figure 5 – Impacts des Lidars



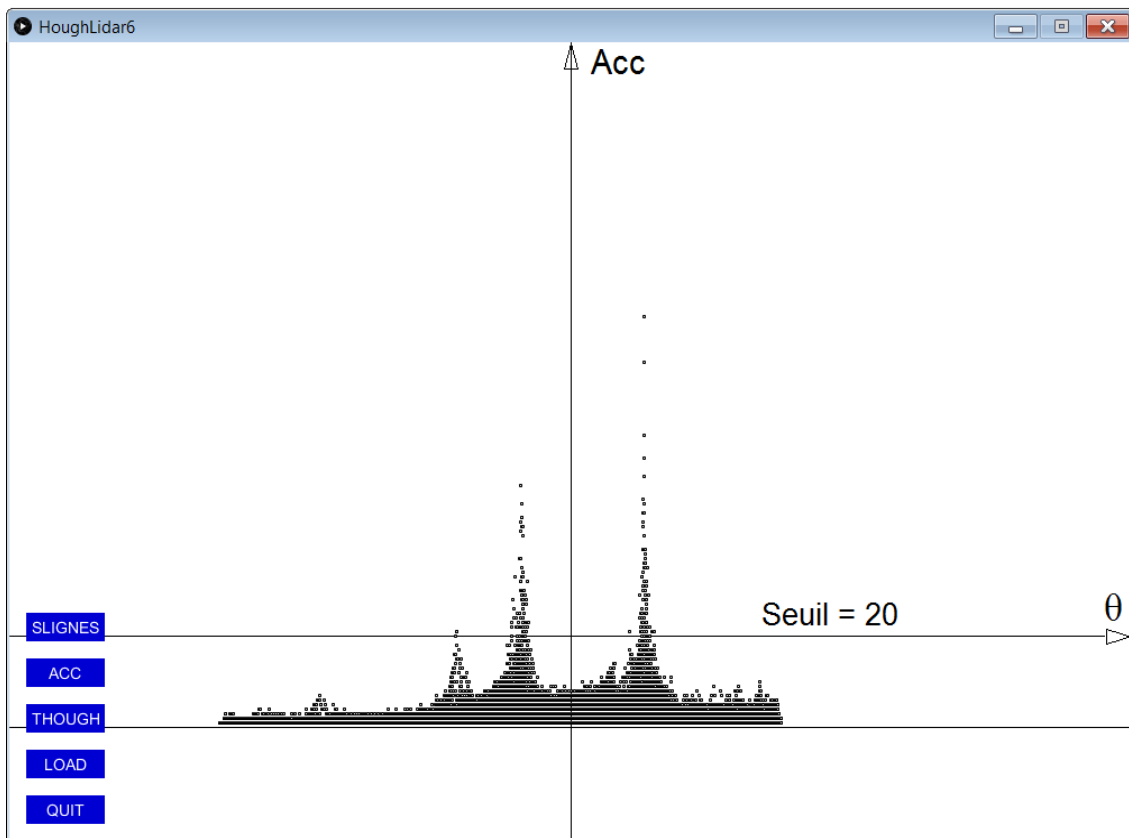
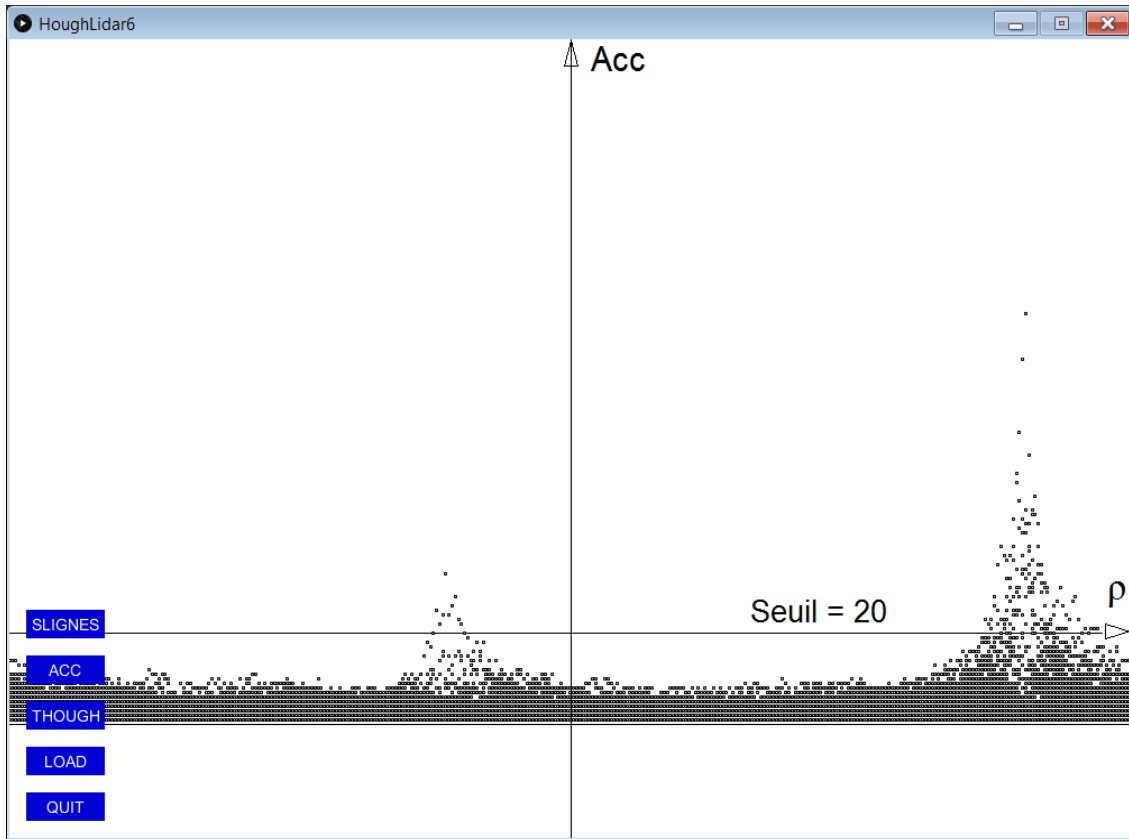


Figure 6 – Matrice d'accumulation /  $\text{Acc}=f(\rho)$  -  $\text{Acc}=f(\theta)$

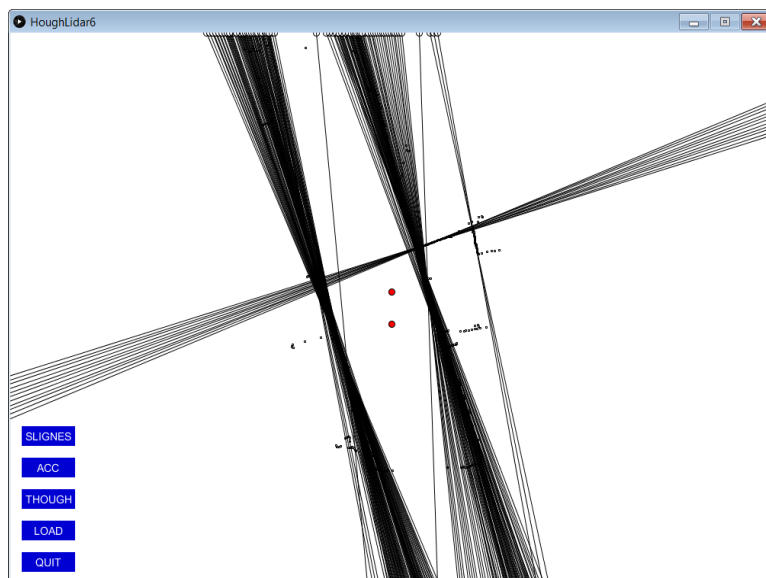


Figure 7 - Lignes obtenues avec la Transformée de Hough

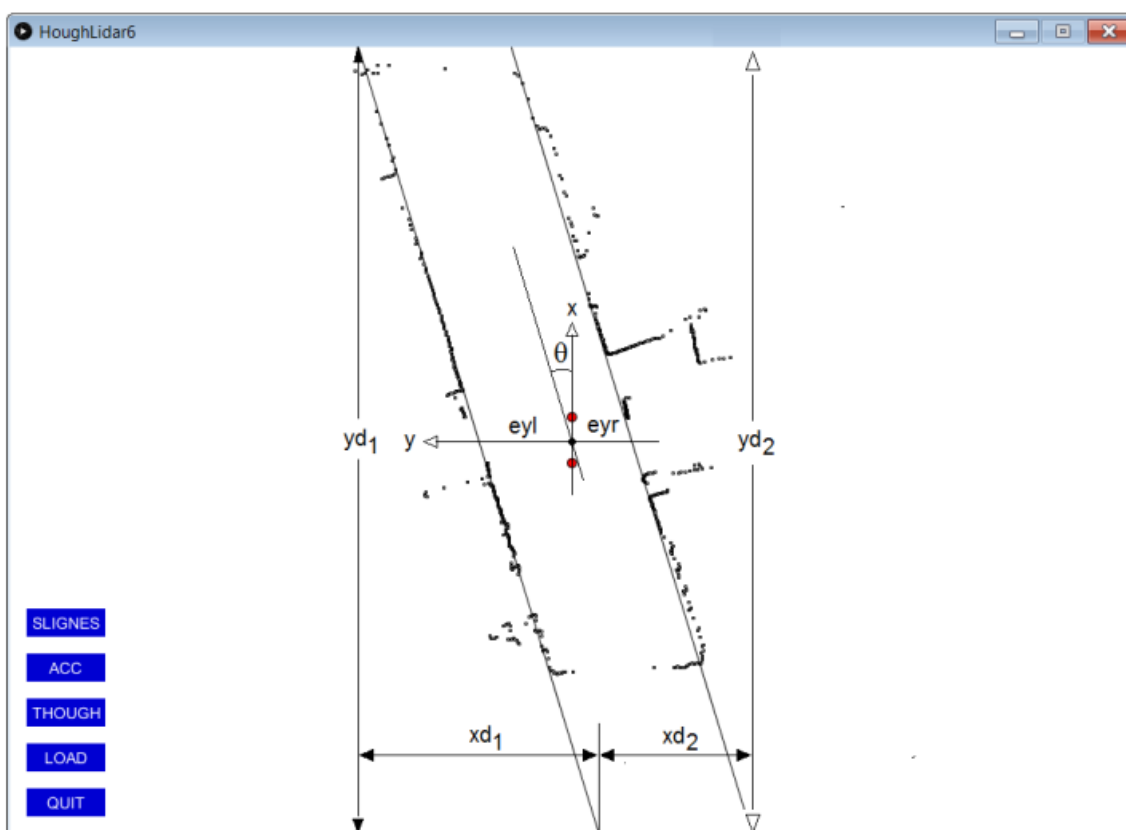


Figure 8 – Lignes sélectionnées et erreurs de positionnement

La loi de commande non linéaire (5) de l'UGV est donnée par :

$$\dot{e}_y = f(e_y, \cos(e_\theta), V_Y, D_Y) = -(\tau_v \cdot \dot{v} + v) \quad \dot{e}_\theta = f(e_\theta, R_z, \theta_z) = -(\tau_r \cdot \dot{r} + r) \quad (5)$$

$V_Y$  et  $R_Z$  sont respectivement les vitesses latérales et angulaires maximales souhaitées.  $D_Y$  et  $\theta_Z$  sont respectivement la distance et l'orientation à partir desquelles l'UGV atteint la vitesse maximale. Les constantes de temps  $\tau_r$  et  $\tau_v$  permettent des accélérations et décélérations progressives. La fonction  $f$  introduit une saturation et garantit un mouvement à vitesse constante et contrôlée lorsque l'erreur est importante. Elle est définie comme suit (6) :

$$f(eps, Vm, Dm) = \begin{cases} -Vm & \text{if } eps < -Dm \\ \frac{Vm}{Dm} \cdot eps & \text{if } -Dm \leq eps \leq +Dm \\ +Vm & \text{if } eps > +Dm \end{cases} \quad (6)$$

Remarque : une fonction « sigmoïde » peut également être utilisée.

### 2.3 Navigation autonome du robot aérien

Pendant les phases de montée et de descente (Figure 1), le drone (UAV) reste en position de "Hover" (vol stationnaire) par rapport à l'UGV en utilisant un asservissement visuel intégrant deux émetteurs infrarouges codés (mode pulsé) installés sur l'UAV, et une caméra infrarouge placée sur l'UGV. Cette technique permet de déterminer la position et l'orientation de l'UAV dans le repère de l'UGV, quelle que soit la distance (portée de 15 m, supérieure à la hauteur des étagères en entrepôt) et les conditions d'éclairage (souvent variables dans les entrepôts). L'asservissement visuel repose sur une "Sensor Bar" (comparable à celle de la console de jeu Wii) installée sous le drone (Figure 9) et une caméra infrarouge placée sur l'UGV. Cette dernière comprend deux groupes de 14 LEDs infrarouges (Vishay TSAL6100) émettant en mode pulsé (5 kHz). Une entrée "Enable" peut être contrôlée par une sortie logique de l'ordinateur embarqué (DJI Manifold) sur l'UAV (DJI Matrice 100) pour éteindre la "Sensor Bar" lorsqu'elle n'est pas nécessaire (économie de la batterie).



Figure 9 - « Sensor Bar » (PCB) installée sur l'UAV (DJI Matrice 100)

Les dimensions de la carte PCB correspondent à celles du drone (Matrice 100) pour permettre une fixation facile. Les LED infrarouges choisies fonctionnent en mode pulsé (5 kHz) pour améliorer la puissance et la portée. La caméra infrarouge est commercialisée par la société DFrobot (RB-Dfr-553) et fournit, via un bus de communication I2C, les coordonnées (x, y) de quatre cibles infrarouges dans le plan de l'image. Une phase de calibration a été réalisée (Figure 10) pour établir la correspondance entre les déplacements (en mètres) et les projections (en pixels) dans le plan de l'image (Guérin, 2004). Pour cela, la "Sensor Bar" a été placée à différentes distances de la caméra infrarouge (2m, 4,5m et 7m) puis déplacée horizontalement le long des axes x et y.

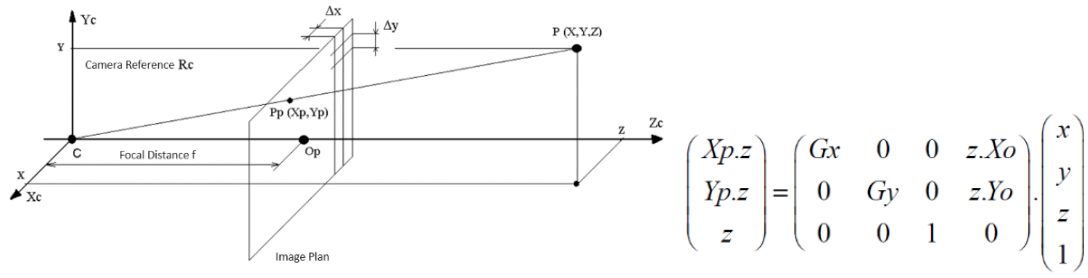


Figure 10 – Phase de calibration

Le maintien du drone en position de vol stationnaire est réalisé par asservissement visuel 2D ((Hutchinson et al., 1996), (Chaumette et al., 2016), (Guérin et al., 2013)). L'objectif est de garder le centre de la "Sensor Bar" (on suppose que son point de référence coïncide avec celui de l'UAV) au centre du plan de l'image de la caméra (on suppose que le point de référence de la caméra coïncide avec celui de l'UGV). Les erreurs de positionnement  $e_x$ ,  $e_y$  et  $e_\theta$  sont présentées ci-dessous (Figure 11).

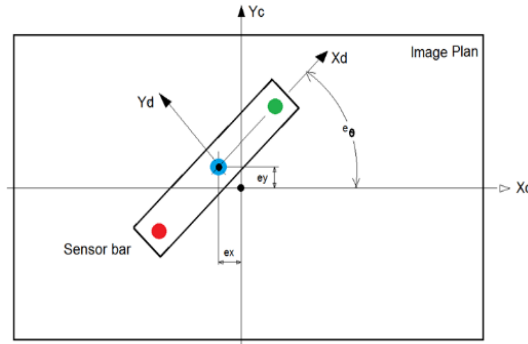


Figure 11 - Erreurs de positionnement dans le plan image

La loi de commande non linéaire (7) de l'UAV est la suivante :

$$\begin{aligned} \dot{e}_x &= f(e_x, V_X, D_X) = -(\tau_u \cdot \dot{u} + u) & \dot{e}_y &= f(e_y, V_Y, D_Y) = -(\tau_v \cdot \dot{v} + v) \\ \dot{e}_z &= f(e_z, V_Z, D_Z) = -(\tau_v \cdot \dot{v} + v) & \dot{e}_\theta &= f(e_\theta, R_Z, \theta_Z) = -(\tau_r \cdot \dot{r} + r) \end{aligned} \quad (7)$$

$V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$  et  $R_z$  sont respectivement les vitesses maximales linéaires, latérales, verticales et angulaires souhaitées.  $D_x$ ,  $D_y$ ,  $D_z$  et  $\theta_z$  sont respectivement les distances et l'orientation à partir desquelles le drone atteint sa vitesse maximale. Les constantes de temps  $\tau_r$ ,  $\tau_y$  et  $\tau_x$  permettent des accélérations et décélérations progressives. La fonction  $f$  introduit une saturation et garantit un mouvement à vitesse constante et contrôlée lorsque l'erreur est importante. Elle est définie comme suit (8) :

$$f(eps, Vm, Dm) = \begin{cases} -Vm & \text{if } eps < -Dm \\ \frac{Vm}{Dm} \cdot eps & \text{if } -Dm \leq eps \leq +Dm \\ +Vm & \text{if } eps > +Dm \end{cases} \quad (8)$$

Remarque : une fonction « sigmoïde » peut également être utilisée.

Il est intéressant de noter qu'une estimation de l'altitude peut être obtenue en mesurant la distance entre les deux cibles (en rouge et vert dans la Figure 10). Cette estimation peut compléter les informations fournies par l'altimètre (peu fiables en intérieur) ou par le système "guidance" de DJI (DJI, 2006). Cette approximation est acceptable car le drone se déplace principalement de haut en bas pour ses opérations, en restant "à plat", c'est-à-dire sans inclinaison (tangage ou roulis). De plus, la valeur d'altitude est générée en continu, ce qui permet d'atténuer d'éventuelles perturbations. Par exemple, si l'altitude passe de 2,50 m à 4,30 m puis revient à 2,54 m, un traitement logiciel simple peut corriger cette incohérence. Lors de déplacements horizontaux, il peut y avoir un léger tangage et roulis, mais dans ces conditions, l'altitude n'est pas utilisée pour l'inventaire. En résumé, l'influence du roulis et du tangage est faible ( $<10^\circ$ ) et compatible avec le diagramme de rayonnement des LED infrarouges (directivité).

## 2.4 Automatisation de l'opération d'inventaire

Pour réaliser l'opération d'inventaire, il est nécessaire d'établir un dialogue entre l'UGV et l'UAV afin de coordonner les mouvements, d'effectuer les ajustements finaux (par rapport aux étagères) et d'organiser les actions (décollage, atterrissage, position en vol stationnaire, etc.). Cette automatisation repose sur deux machines d'état (une pour chaque robot mobile) qui communiquent entre elles (Figures 12 et 13) via des messages ROS (ROS, 2007) comme indiqué dans la Figure 14.

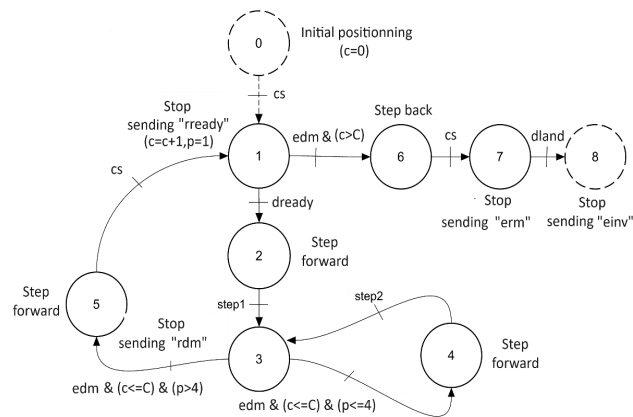


Figure 12 - Machine d'état de l'UGV

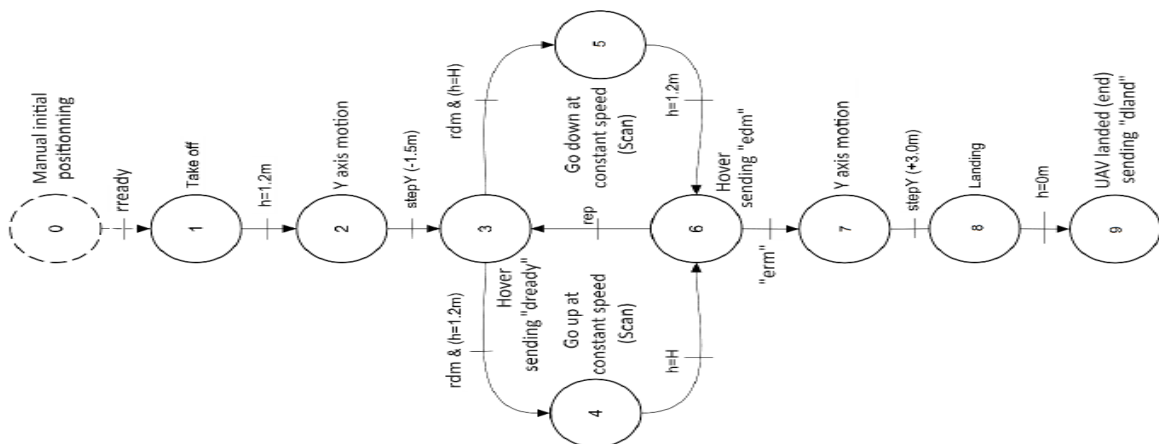


Figure 13 - Machine d'état de l'UAV

<p>Liste des messages ROS échangés :</p> <p>UGV→UAV:  « rready »: UGV prêt  « rdm »: Demande de mission UAV  « erm »: Fin de mission UGV  « einv »: Fin de l'inventaire</p> <p>UAV→UGV:  « dready »: UAV prêt  « dland »: UAV atterrissage  « edm »: Fin de mission UAV</p>	<p>Transitions:</p> <p>UGV:  « cs »: Capteur de couleur  « step1 »: Poteau palette 1  « step2 »: Entre palettes  « p »: palettes – « c »: alvéole  « C »: Nombre maximum d'alvéole</p> <p>UAV:  « stepY »: Mouvement axe Y</p>
---	--

Figure 14 – Liste des messages ROS échangés et transitions

L'approche « Système à Evénements Discrets » (SED) offre une grande flexibilité et permet de nombreux scénarios. La solution adoptée consiste à réaliser l'inventaire par colonnes en lisant les codes-barres lorsque le drone monte et/ou descend. Il est également possible de modifier les machines d'état pour réaliser l'inventaire en temps réel sans modifications logicielles majeures. Les deux options peuvent être programmées afin de laisser à l'opérateur le choix selon la configuration et les besoins de l'entrepôt. Le dialogue entre les deux robots mobiles peut facilement se faire via un réseau WIFI ou Bluetooth. La présence de l'UGV est également utile pour le rechargement éventuel des batteries de l'UAV (système de charge filaire (Elistair, 2014)) et pour le stockage des informations d'inventaire. De plus, contrairement à l'UAV, l'UGV est doté d'un système informatique embarqué puissant capable d'héberger un serveur web pour une supervision à distance via un navigateur classique (Firefox, par exemple). Les deux systèmes à événements discrets ont été modélisés par des réseaux de Petri et l'ensemble de l'opération d'inventaire a pu être simulé avec le logiciel Matlab/Simulink (Figures 15a et 15b).

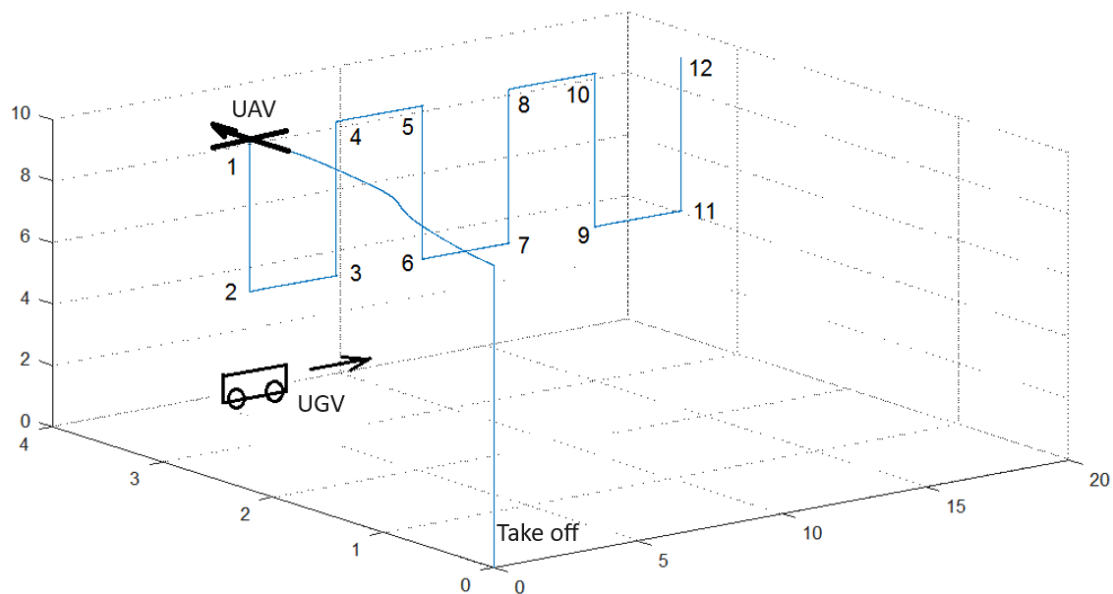


Figure 15a – Résultats de simulation

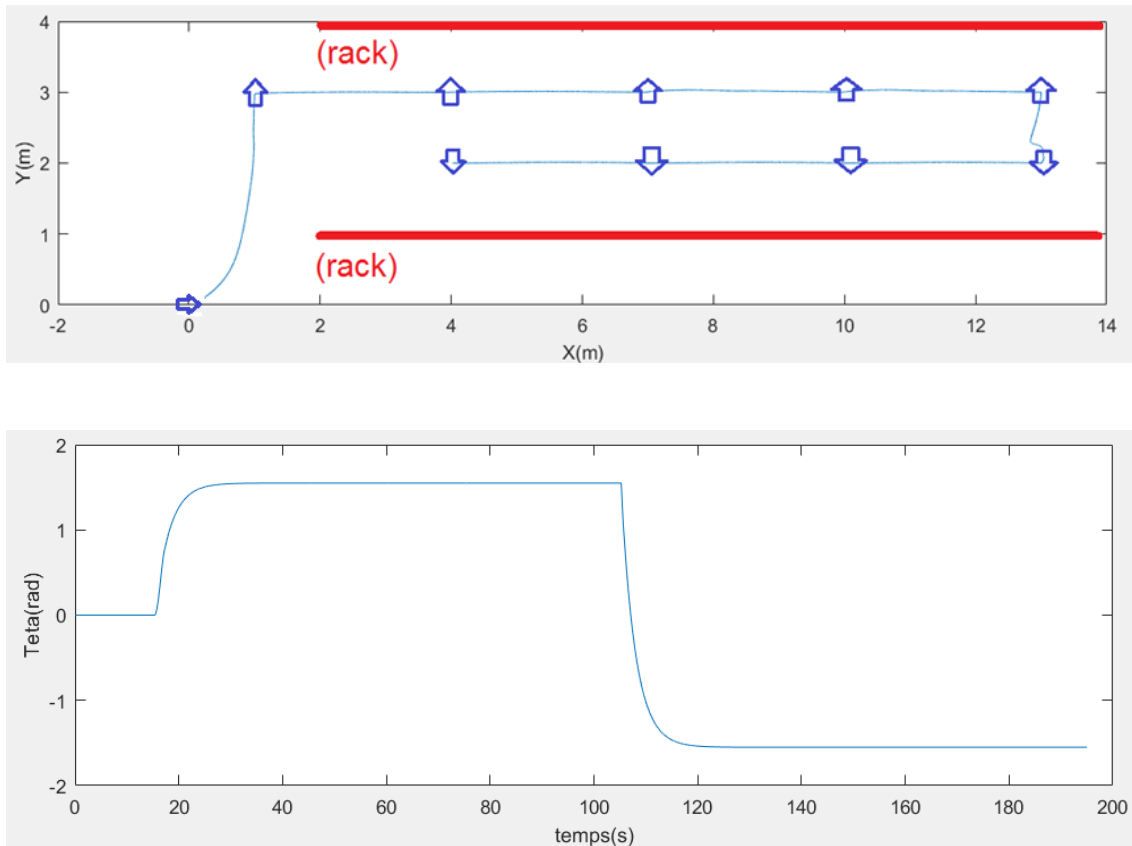


Figure 15b – Résultats de simulation

## 2.5 Acquisition des données d'inventaire

### 2.5.1 Fonctionnement général du système d'acquisition

Le système conçu pour l'acquisition des données se compose de deux smartphones équipés du système d'exploitation Android et d'une carte SIM (Figure 16). L'un des appareils joue le rôle de superviseur et l'autre celui de lecteur. L'opération d'acquisition des données peut être décrite par le diagramme suivant :

- a) Le superviseur reçoit un signal indiquant que l'opération d'inventaire doit commencer (ce signal est optionnel, l'opération peut aussi être lancée manuellement depuis le superviseur).
- b) Le superviseur se connecte au réseau WIFI.
- c) Le superviseur communique les informations de connexion au lecteur.
- d) Le lecteur se connecte au réseau WIFI.
- e) Le lecteur initie la communication directe avec le superviseur.
- f) Le lecteur écoute les robots mobiles pour obtenir des informations de positionnement.
- g) Le lecteur indique au superviseur qu'il est prêt.
- h) Le superviseur demande le démarrage de l'opération d'inventaire sur le lecteur.
- i) Le lecteur effectue le traitement des images et extrait les codes-barres (Figure 17).
- j) Le lecteur associe le(s) code(s)-barres extrait(s) avec un horodatage et des informations de positionnement (si disponibles).

- k) Le superviseur reçoit les données du lecteur et les traite.
- l) Les trois dernières opérations sont effectuées jusqu'à ce que le superviseur reçoive un signal de fin d'inventaire.
- m) Le superviseur informe le lecteur de la fin de l'inventaire.

#### 2.5.2 Description des fonctionnalités du superviseur

- a) Piloter à distance et contrôler le lecteur.
- b) Connexion au réseau de l'entreprise ou, à défaut, à un autre point d'accès WIFI.
- c) Communication des informations de connexion au lecteur (via SMS) et des informations de connexion du superviseur (adresse IP, port de communication pour la lecture).
- d) Envoi de l'ordre de démarrer la lecture des codes-barres.
- e) Réception des informations du lecteur.
- f) Connexion au WMS (Système de Gestion d'Entrepôt) de l'entreprise.
- g) Reconstruction virtuelle de l'entrepôt (Figure 18) à partir :
  - des informations des codes-barres augmentées d'un horodatage et d'informations de positionnement.
  - des informations du WMS.
  - de la gestion des communications par SMS avec un ensemble de téléphones autorisés ou via l'utilisation d'un code.

#### 2.5.3 Description des fonctionnalités du lecteur

- a) Gestion de la communication par SMS (uniquement avec le superviseur).
- b) Acquisition et analyse des images pour extraire les codes-barres.
- c) Obtention des informations de positionnement de l'UGV.
- d) Communication des informations (codes-barres couplés avec un horodatage et des informations de positionnement) au superviseur via le réseau WIFI.

#### 2.5.4 Contraintes logicielles

L'application Android se présente sous la forme d'un fichier APK. Sa version actuelle est fonctionnelle à partir de l'API 23 (Android Marshmallow) et pour les versions suivantes, représentant en mai 2020 environ 85 % des téléphones actuellement utilisés. L'application sera donc compatible avec toutes les nouvelles versions du système Android à venir. En termes de matériel, les téléphones utilisés pour les tests sont des Samsung Galaxy S8 commerciaux. Les principales caractéristiques importantes pour le bon fonctionnement de l'application sont :

- a) Qualité et performance du processeur. Nos appareils sont équipés d'un processeur Exynos 8895 à 8 cœurs. Cette caractéristique permet l'exécution simultanée de plusieurs méthodes indépendantes et augmente donc considérablement la performance de l'application.
- b) Quantité de mémoire vive (RAM). Nos appareils disposent de 4 Go de RAM. Cette mémoire permet à l'application de résider entièrement en RAM et de garder dans cette même mémoire les données nécessaires au traitement des images.
- c) Qualité et performance du capteur photo. Le capteur utilisé a une définition de 12 Mpx. Un bon capteur photo permet d'augmenter le ratio distance de prise de vue / taille du



code-barres et offre plus de flexibilité dans l'utilisation et la portée des codes-barres pouvant être extraits.

- d) Capacité de la batterie. Nos appareils sont équipés d'une batterie de 3000 mAh, permettant une journée complète (12 heures) d'utilisation pour l'inventaire sans rechargement.

Ces appareils peuvent être remplacés par d'autres ayant des caractéristiques équivalentes ou supérieures en termes de performance. L'application est entièrement indépendante de la marque des appareils.

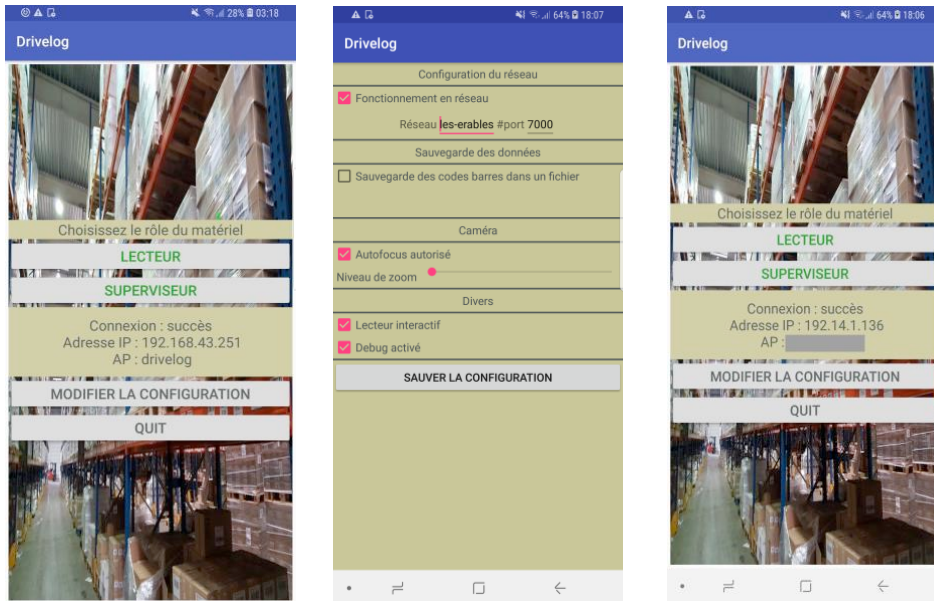


Figure 16 – Application Android pour l'acquisition de données

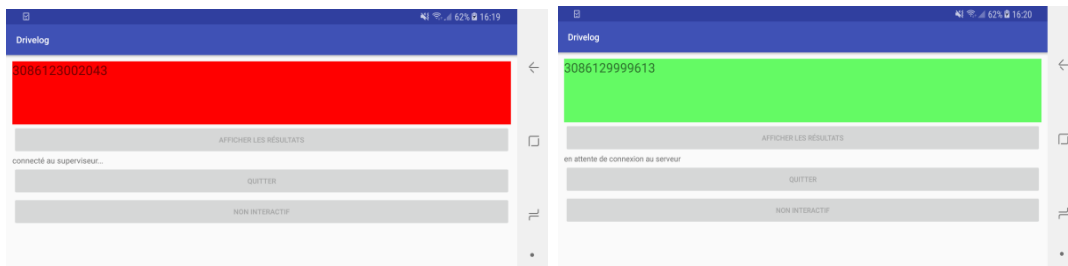


Figure 17 – Acquisition de données



Figure 18 – Reconstruction virtuelle de l'entrepôt

### 3. Conclusion

Cet article présente un projet innovant pour la gestion des inventaires dans les entrepôts logistiques. L'opération d'inventaire soulève de nombreux problèmes, à la fois en termes de coût, de sécurité des personnes et de perturbation du fonctionnement de l'entrepôt. La solution présentée répond à l'ensemble de ces questions en mettant en œuvre des robots mobiles aériens (UAV) et terrestres (UGV) sans pilote. Des expérimentations ont été menées en conditions réelles sur un site de la région havraise et ont montré la faisabilité du prototype que nous avons développé. Nous avons montré en particulier que le système proposé résout le problème de la géolocalisation intérieure en combinant la navigation autonome et les Systèmes à Événements Discrets (DES) pour coordonner les actions entre l'UAV et l'UGV. Le système, constitué des deux drones, peut ainsi naviguer de manière autonome à travers l'entrepôt. Par ailleurs, couplé à un dispositif composé de deux smartphones connectés, il permet également de collecter des données sur les produits stockés (telles que des codes-barres et des codes SKU), et de transmettre ces informations directement au système de gestion d'entrepôt (WMS) via un réseau de communication. Un aspect important de cette solution est la possibilité de l'étendre en utilisant plusieurs UAV et UGV, tous gérés par un superviseur global qui attribue les tâches. Cette configuration, qui repose sur l'utilisation de balises Ultra Wide Band (UWB), vise à optimiser les opérations d'inventaire dans les entrepôts. Elle a déjà été étudiée par les auteurs (Guinand et al., 2021) dans des recherches précédentes et consiste à mettre en œuvre un superviseur global pour l'allocation de tâches.

### Références

- Airborne Data Collection (2016). <http://dronescan.co/>. Consulté 2018.
- Chaumette, F., Hutchinson, S., and Corke, P. (2016). Visual Servoing. In Handbook of Robotics, 2nd edition, O. Khatib B. Siciliano (ed.), pp. 841-866, Springer, 2016.
- DJI (2006). <https://www.dji.com/fr/guidance>. Consulté 2016.
- Duda, R. O., and Hart, P. E. (1972). Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures. *Comm. ACM*, vol. 15, p. 11-15.
- Elistair (2014). <https://elistair.com/>. Consulté 2017.
- Eyeseer (2016). The drone allowing to automate inventory in warehouses. <http://www.hardis-group.com>. Consulté 2018.
- Guérin, F. (2004). Commande conjuguée d'un robot mobile, modélisation dynamique et vision artificielle. Thèse de doctorat de l'université du Havre. EUE – ISBN 978-613-1-54896-3, 2004.
- Guérin, F., Fabri, S. G., and Bugeja, M. K. (2013). Double exponential smoothing for predictive vision based target tracking of a wheeled mobile robot. In *52nd IEEE Conference on Decision and Control*, Firenze, Italy, 2013, pp. 3535-3540.
- Guinand, F., Guérin, F., and Petitprez, E. (2021). UAV-UGV Multi-Robot System for Warehouse Inventory. In *13th International Conference on Computational Collective Intelligence*, Rhodes, Greece, 29 sept - 1 oct 2021.

Harik, E. H. C. (2016). Commande et coordination d'une flotte de robots mobiles terrestres et aériens pour la surveillance et l'alerte. Thèse de doctorat, Université du Havre.

Harik, E. H. C., Guérin, F., Guinand, F., Brethé, J. F., and Pelvillain, H. (2016). Towards An Autonomous Warehouse Inventory Scheme. In IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (IEEE SSCI 2016), Athens, Greece, December 6-9, 2016.

Hough, P.V.C. (1959). Machine Analysis of Bubble Chamber Pictures. In Proc. Int. Conf. High Energy Accelerators and Instrumentation, p. 554-558.

Hutchinson, S., Hager, G., and Corke, P. (1996). A tutorial on visual servo control. In IEEE. Trans. on Robotics and Automation, 12(5): p. 651-670, October 1996.

ROS (2007). <https://www.ros.org/> . Consulté 2015.

The flying inventory assistant (2016). <http://www.fraunhofer.de>. Consulté 2018.

## Biographie des auteurs



Dr François Guérin a obtenu son Master (2000), son Doctorat (2004) et son Habilitation à Diriger des Recherches (2015) en Automatique et Robotique à l'Université Le Havre Normandie. Il exerce en tant que Maître de Conférences HDR à l'Université Le Havre Normandie, au sein de l'Institut Supérieur d'Etudes Logistiques (ISEL) et du Groupe de Recherche en Electrotechnique et Automatique (GREAH). Ses enseignements concernent l'Electronique (IoT), l'Automatique et la Robotique et ses recherches portent sur la commande avancée, appliquée à la robotique mobile terrestre et aérienne. En 2021, il a créé au Havre (76) le Centre d'Innovation Drones de Normandie (CIDN) et a rejoint en 2022, le 61ème Régiment d'Artillerie de l'Armée de Terre basé à Chaumont (52) en tant qu'officier réserviste.



Pr Frédéric Guinand a obtenu son master et son doctorat en informatique à l'Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG, aujourd'hui Grenoble Institut de Technologie) en France en 1991 et 1995, respectivement. Après ses études universitaires, le Pr Guinand s'est dirigé vers l'industrie numérique, acquérant une précieuse expérience en tant qu'ingénieur dans une start-up en 1996. Par la suite, il a obtenu une bourse postdoctorale INRIA, menant des recherches à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL - Suisse). Fin 1997, il a rejoint l'Université Le Havre Normandie en tant que professeur assistant et a été nommé Professeur des Universités en 2005. Ses intérêts de recherche couvrent un large éventail de sujets, notamment les graphes dynamiques, les réseaux complexes, l'informatique distribuée, mobile et inspirée de la nature, et la robotique collective. Il est également Professeur invité à la Faculté de mathématiques et de sciences naturelles de l'Université Cardinal Stefan Wyszyński de Varsovie en Pologne.