



HAL
open science

Transformer le campus universitaire en laboratoire ouvert : le projet SMART-UHA

Thomas Josso-Laurain, Jonathan Ledy, Frédéric Fondement, Sébastien Bindel, Frédéric Drouhin, Françoise Simon, Michel Basset

► To cite this version:

Thomas Josso-Laurain, Jonathan Ledy, Frédéric Fondement, Sébastien Bindel, Frédéric Drouhin, et al.. Transformer le campus universitaire en laboratoire ouvert : le projet SMART-UHA. Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes, 2022, 21, pp.0001. 10.1051/j3ea/20220001 . hal-04008457

HAL Id: hal-04008457

<https://hal.science/hal-04008457>

Submitted on 28 Feb 2023

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.

Transformer le campus universitaire en laboratoire ouvert : le projet SMART-UHA

Thomas Josso-Laurain^{1*}, Jonathan Ledy¹, Frédéric Fondement¹, Sébastien Bindel¹, Frédéric Drouhin¹, Françoise Simon², Michel Basset¹

¹ *Université de Haute-Alsace, IRIMAS, Mulhouse, France*

² *Université de Haute-Alsace, CREGO, Mulhouse, France*

*Contact mail : thomas.josso-laurain@uha.fr

RESUME : Ce papier décrit la méthodologie permettant de transformer un campus universitaire en laboratoire ouvert par l'introduction de plateformes expérimentales liées aux thématiques phares de la mobilité, de l'énergie et des mutations sociétales. En particulier, ce papier s'intéressera au volet Mobilité avec la présentation du robot SMART-UHA, un robot mobile autonome tracté par énergie électrique et dont les missions sont d'assurer des livraisons de colis sur le campus, et ce en assurant la totale sécurité des usagers. L'ensemble des capteurs et actionneurs de cette plateforme sont présentés, ainsi que les architectures matérielles et logicielles permettant une navigation sûre le long du campus. L'utilisation de cette plateforme dans le cadre de la formation des futurs techniciens et ingénieurs est détaillée, illustrant l'intérêt du robot SMART-UHA comme démonstrateur du savoir-faire de l'Université de Haute-Alsace et des interactions fortes entre recherche et enseignement.

Mots clés : robotique mobile, laboratoire ouvert, réseaux de télécommunications, acceptabilité de la technologie.

1. Introduction

Depuis 2018, le projet SMART-UHA a pour objectif de créer un cadre commun et ouvert dans l'Université de Haute-Alsace (UHA - <https://www.uha.fr/fr/index.html>), une Université située dans le Haut-Rhin avec 5 campus répartis sur deux villes d'Alsace : Colmar et Mulhouse. Ce cadre de travail favorise les interactions entre les chercheurs, peu importe le domaine de recherche, en faisant circuler un robot mobile autonome et électrique sur le campus. Les données collectées seront diffusées avec une licence open-source, permettant de favoriser les interactions entre les chercheurs de l'UHA et les chercheurs d'autres institutions de recherche internationales. Ce cadre permet de transformer le campus universitaire de l'Illberg, à Mulhouse, en laboratoire ouvert (*open-lab*) : un environnement de travail unique où des prototypes de recherche évoluent parmi un public non-laborantin (étudiants) en collectant des données qui seront partagées par le biais de *datasets* libres de droit. Cet open-lab joue également le rôle de démonstrateur des récentes avancées dans les domaines d'expertise de l'Institut de

© The Author(s). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Recherche en Informatique, Mathématiques, Automatique et Signal (IRIMAS). Les champs d'applications du laboratoire sont reflétés par l'acronyme du projet : Services, Mobilités, Autonomies, Réseaux, Transports (SMART-UHA). La création du laboratoire ouvert permet de ne pas se limiter aux verrous techniques mais également d'étudier les facteurs humains, la psychologie, la gestion de l'énergie, l'analyse des habitudes des usagers, etc.

Le projet SMART-UHA est divisé en deux parties : d'un côté, la gestion de l'énergie et de l'autre, les mobilités innovantes. Ce papier se focalise sur l'aspect mobilité dont l'objectif est de déployer des véhicules automatiques guidés (AGV) naviguant en toute sécurité sur le campus universitaire. A noter qu'il s'agit bien ici d'un AGV et non d'un AMR (Autonomous Mobile Robot), car notre robot a un trajet prédéterminé et en cas d'obstacle, il s'arrête sans renégocier de trajectoire locale.

De nos jours, les AGV reçoivent un intérêt croissant, particulièrement de la communauté industrielle, pour leur capacité à transporter des biens et des personnes dans de grandes structures comme des usines manufacturières [1] ou des hôpitaux [2]. Cependant, dans ce type d'environnement logistique, les AGV naviguent principalement dans des espaces dédiés avec des contraintes spécifiques de sécurité (balises, signaux lumineux et sonores, barrières, marquages au sol, etc.) et avec un personnel professionnel (qui peut recevoir des formations et qualifications afin de fluidifier ses interactions avec le robot). Dans des environnements ouverts et publics comme les campus universitaires, les recherches dédiées aux AGV se concentrent principalement sur les verrous techniques à lever, par exemple l'interprétation de l'information visuelle issue de la caméra afin d'identifier des obstacles potentiels [3] ou encore une aide à la localisation du robot [4].

L'intérêt d'évoluer sur un campus universitaire est de pouvoir introduire les avancées en recherche dans le cadre d'enseignements. L'utilisation des plateformes concrètes de recherche est un réel atout pour enrichir l'enseignement de futurs ingénieurs [5]. Travailler sur un système cyber-physique de robotique mobile, notamment dans le cadre d'une approche par projet, a déjà montré son intérêt pédagogique pour son côté ludique [6]. C'est de plus une excellente passerelle entre enseignement et recherche afin d'initier les étudiants à des algorithmes avancés de perception, de suivi de trajectoire et de commande [7]. Le déploiement d'une flotte de robots permet également de stimuler les étudiants par la compétition [8]. Enfin, la robotique mobile étant maintenant largement popularisée partout dans le monde, cette plateforme peut également servir à la collaboration internationale et au partage d'expérience [9].

L'Ecole Nationale d'Ingénieurs Sud-Alsace (ENSISA - <https://www.ensisa.uha.fr/>) bénéficie de l'accès à la plateforme et des compétences des enseignants-chercheurs impliqués dans le projet. L'intérêt d'un projet fédérateur comme SMART-UHA est de permettre aux élèves-ingénieurs de travailler avec un système cyber-physique réel au sein d'un projet structurant et fortement partenarial.

L'ENSISA, et plus généralement l'UHA, ont entrepris une démarche d'innovation pédagogique de ses formations. Dans ce contexte, l'apprentissage par projet et par problème (APP) prend toute sa légitimité. En effet, ce mode pédagogique est basé sur un problème réel (exemple :

© The Author(s). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

programmer la livraison d'un colis par un robot autonome), sans solution immédiate et nécessitant des étapes de recherche et d'essais. Cette méthodologie, où l'enseignant devient encadrant et facilitateur, repose sur une documentation fournie permettant aux étudiants d'extraire eux-mêmes les connaissances et de les appliquer. Dans notre cas, les documentations techniques fournies par le prestataire extérieur servent de base au travail. L'accès au robot permet de rendre l'APP concret et stimule les étudiants par le rapport visuel entre leurs actions et les déplacements d'un système électromécanique.

Le tableau ci-dessous récapitule le nombre d'étudiants par filière ayant pu bénéficier du projet SMART-UHA comme plateforme d'apprentissage par problèmes au cours de leur formation (à noter que les projets sont toujours réalisés en binôme ; les stages quant à eux sont attribués à un monôme) :

Tableau 1. Récapitulatif des étudiants ayant travaillé sur SMART-UHA dans le cadre de l'APP et de l'open-lab

Année universitaire	Contexte et durée	Cursus	Sujet de travail
2018 – 2019	Projet 5 mois	3 ^{ème} année Ingénieur Informatique	Etude de faisabilité d'une application de livraison
2019 – 2020	Projet 5 mois	3 ^{ème} année Ingénieur Informatique	Système de livraison en scénario nominal
	Stage 3 mois	M1 Marketing	Etude de la perception des robots de livraison
2020 – 2021	Projet 5 mois	3 ^{ème} année Ingénieur Informatique	Industrialisation logicielle (test + CI/CD)
	Stage 10 sem.	2 ^{ème} année DUT Réseaux et Télécom.	Comparaison WiFi - LoRaWAN
	Stage 6 mois	3 ^{ème} année Ingénieur mécatronique	Evaluation des performances du robot
	Stage 6 mois	M2 Informatique	Sécurisation et interface d'administration
	Stage 6 mois	M2 Marketing	Etudes des offres commerciales de robots de service et méthodes d'évaluation de l'acceptabilité
2021 – 2022	Projet 5 mois	3 ^{ème} année Ingénieur systèmes embarqués	Intégration d'une caméra plénoptique sur le robot
	Projet 5 mois	3 ^{ème} année Ingénieur Informatique	Algorithme de scheduling
	Stage 6 mois	M2 Informatique	Refactoring et cas exceptionnels
	Projet 5 mois	M2 EEA	Affichage et mesure intelligente pour optimiser les réseaux électriques
2022 – 2023	Projet 5 mois	M2 EEA	Modélisation par identification des actionneurs du robot

Ce papier est divisé comme suit : d'abord, le projet SMART-UHA dans son ensemble est présenté ; les performances du robot autonome sont ensuite évaluées dans le cadre d'un design

© The Author(s). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

itératif ; l'intégration du robot sur le campus et le lien avec les différentes infrastructures et usagers sont ensuite présentés ; puis, les activités de livraisons autonomes du robot sont décrites ; enfin, la gestion informatisée des livraisons, des demandes et des conflits est détaillée. Une conclusion termine l'article par une discussion sur les résultats pédagogiques et scientifiques de *l'open-lab*.

2. Le projet SMART-UHA

2.1. Contexte du projet

Le projet SMART-UHA a été créé afin de favoriser et d'amplifier les connexions entre enseignants, enseignants-chercheurs et étudiants venant de formations et de laboratoires pluridisciplinaires (sciences humaines et sciences exactes). Ce projet concerne l'ensemble de l'Université de Haute-Alsace, incluant quatre de ses cinq campus répartis sur les deux villes (Mulhouse et Colmar) incluant tous les domaines d'enseignements et de recherches associés, des aspects juridiques aux réseaux de neurones, des sciences de la traduction (traduction de manuels) jusqu'aux études des comportements des consommateurs.

Le projet SMART-UHA est porté par l'institut de recherche IRIMAS (<https://www.irimas.uha.fr/>), par le département Automatique-Signal-Image (ASI). L'intégration de nouvelles plateformes sur le campus a pour but de démontrer le savoir-faire scientifique des équipes : traitements d'images et d'optiques, traitements d'informations issues de réseaux de capteurs (*smart grids*, ECG, etc.), automatique et mécanique au service de la mobilité nouvelle (automobile, aéronautique...). De nombreux travaux à fort potentiel via des démonstrateurs sont menés. C'est cette recherche, à la fois fondamentale et applicative, qui est au cœur du projet SMART-UHA. Les chercheurs travaillent sur des sujets variés ; l'objectif du projet SMART-UHA est de rassembler ces chercheurs autour des points communs et de leurs intérêts scientifiques.

Ce projet permet de rassembler les équipes de recherche de l'IRIMAS, notamment en fédérant autour du département ASI les départements Informatique et Mathématiques et leurs travaux de recherche concernés par le projet : optimisation algorithmique, optimisation mono/multi-objectifs, traitement de données par intelligence artificielle hybride, nouvelles technologies de communication sans-fil, etc.

Le projet a reçu un soutien financier des institutions publiques à hauteur de 600 000 euros divisés entre les deux volets du projet : le volet Energie et le volet Mobilité.

Le volet Mobilité a reçu 350 000 euros du budget initial afin de concevoir conjointement avec des entreprises spécialisées, un robot autonome naviguant en toute sécurité sur le campus parmi les étudiants et les personnels de l'UHA. Ce robot permet de connecter les activités de recherche du laboratoire dans les domaines de la mobilité autonome [10], [11], des véhicules électriques et des communications véhiculaires [12]. Ce volet Mobilité et ses plateformes associées seront détaillées tout au long de ce papier.

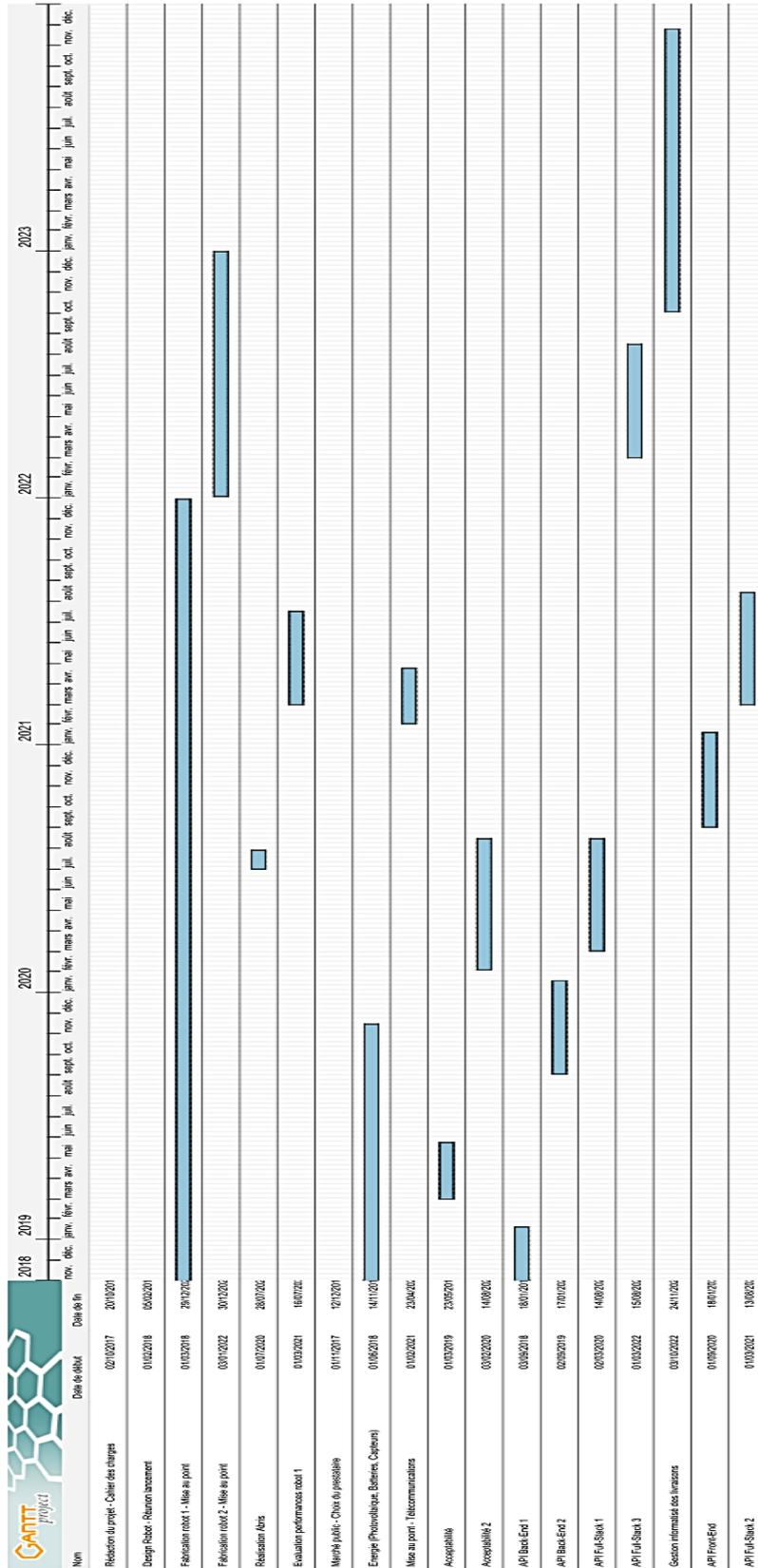
© The Author(s). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Le volet Energie a reçu 250 000 euros de budget pour installer des panneaux solaires et des systèmes de collecte de données intégrant le courant, la tension, la puissance, les conditions météorologiques, etc. Ces données vont être mises à disposition de la communauté scientifique de l'UHA. Ces grandes quantités de données permettront, par exemple, d'utiliser des algorithmes d'intelligence artificielle afin d'analyser l'énergie produite dans le but de mesurer la qualité du réseau (les harmoniques) permettant ainsi de déterminer les problèmes introduits par les énergies renouvelables. L'équipement du projet est mutualisé avec d'autres projets européens comme les projets INTERREG SMI porté par l'IRIMAS et INTERREG RES_TMO porté par l'Université de Fribourg [13], [14].

2.2. Gestion de projet

Le projet SMART-UHA est un projet soutenu par divers acteurs publiques et industriels nécessitant une gestion détaillée et échelonnée. Dans le cadre de leur intervention sur le projet SMART-UHA, les étudiants en APP ont pu intégrer le consortium du projet et découvrir des compétences transversales de travail d'équipe, de gestion de projet et de communication professionnelle.

Le projet était orchestré en plusieurs livrables attribués à différents acteurs, que ce soit pour l'installation des panneaux solaires, la construction de l'abri à robot ou encore la conception et la validation in-situ des robots livreurs autonomes. La répartition temporelle des tâches est représentée par le diagramme de GANTT sur la page suivante, du début du projet initial en 2018 jusqu'à l'extension financée par les Fonds Européens de Développement Régional (FEDER) s'achevant fin 2023.



© The Author(s). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

2.3. Cas d'usage du volet Mobilité

Le volet Mobilité a pour but de doter le campus Illberg de l'Université de Haute-Alsace d'un robot mobile autonome circulant en toute liberté sur le campus afin de collecter une grande quantité de données accessible aux chercheurs de tous les campus. Le robot autonome doit réaliser des tâches à la demande des utilisateurs ainsi que des routines quotidiennes en dehors du cadre expérimental. La mission du robot est de livrer des colis et des lettres aux différents bâtiments le long du campus. Plusieurs trajectoires ont été définies afin de couvrir 90% du campus de l'Illberg de l'Université de Haute-Alsace, soit 1,25 km². Les 10 % restants correspondent à des espaces inaccessibles au robot.



Figure 1. Campus Illberg de l'Université de Haute-Alsace et l'ensemble des trajectoires possibles pour le robot (superposées à une vue de Google Maps® en 2018)

Ces trajectoires permettent aux utilisateurs des différents bâtiments du campus Illberg d'appeler le robot, de placer un colis/une lettre dans le robot et de l'envoyer vers le destinataire.

3. Evaluation des performances du robot SMART-UHA

3.1. Présentation de la plateforme

La plateforme a été conçue conjointement par l'IRIMAS et des acteurs industriels, Kompaï Robotics¹ et Shark Robotics². Les chercheurs d'IRIMAS spécialisés en mobilité autonome

¹ <https://kompairobotics.com/fr/>

² <https://www.shark-robotics.com/>

© The Author(s). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

(respectivement, J. Ledy, T. Josso-Laurain et M. Basset), en réseaux de télécommunications (S. Bindel et F. Drouhin) et en informatique (F. Fondement) ont établi les spécifications nécessaires à la navigation autonome sûre et sécurisée de la plateforme sur le campus. A partir de ces contraintes et caractéristiques, les deux entreprises ont construit le robot. De plus, la forme et l'aspect du robot ont également été effectués en co-design par le laboratoire CREGO (Centre de Recherche en Gestion des Organisations représenté par F. Simon) et les partenaires industriels afin que le robot puisse avoir une image anthropomorphique. Par conséquent, les angles ont été adoucis en courbes, le robot imite le corps humain avec un tronc et son « visage » est composé d'un écran où des yeux et une bouche peuvent être affichés. La Figure 2 montre le résultat final de ce robot v1.



Figure 2. Robot SMART-UHA v1 (anthropomorphique) ; photo datée du 20-10-2020

3.1.1. Capteurs

Le suivi de trajectoire s'effectue à partir de la position actuelle du robot mesurée par un GPS NOVATEL situé sur le dessus du robot et relié aux différentes constellations de satellite (BAIDOU – Chine ; GALILEO – Europe ; GLONASS – Russie ; GNSS - USA). En complément de cet équipement, et afin d'améliorer la précision de la localisation, une seconde antenne NOVATEL est installée sur le toit de l'ENSISA, bâtiment le plus haut du campus Illberg. Ainsi, la localisation du robot s'effectue par triangulation différentielle afin d'obtenir une précision centimétrique permettant une navigation maîtrisée le long des trajectoires définies sur le campus universitaire.

A partir des points GPS, des trajectoires sont construites : il s'agit de tronçons linéaires reliant deux points de coordonnées 3D (x,y,z). Pour les trajets courbes, un algorithme développé par le prestataire permet de relier deux points par une courbure respectant à la fois les contraintes

© The Author(s). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

géographiques et environnementales du campus (route, prairie, arbres...) et les contraintes électromécaniques des robots (garantissant la stabilité dans les déplacements)

Le robot est capable de naviguer en toute sécurité dans un environnement avec une grande densité de population grâce aux différents capteurs extéroceptifs qui l'équipent. Un télémètre laser 3D LiDAR (*Light Detection and Ranging*) VLP-16 Velodyne est situé sur le dessus du robot, lui permettant de détecter des obstacles dans un rayon de 50 m. L'installation laser est complétée avec un scanner laser 2D SICK LMS-511 localisé sous le « tronc » du robot et capable de percevoir des obstacles situés au-devant du robot avec une portée de 100 m.

5 caméras sont installées sur le robot pour enregistrer l'environnement sous forme d'informations RGB : 2 caméras Fisheye ELP Sony IMX322 à la fois à l'avant et à l'arrière, 2 caméras de profondeur REALSENSE D435 également à l'avant et à l'arrière, et 1 caméra infrarouge TERARANGER pour détecter les obstacles dans des environnements sombres.

8 capteurs ultrason I2CXL-MaxSonar complètent la configuration hardware et permettent de détecter un obstacle dans une zone de proximité immédiate avec le robot et ainsi effectuer un arrêt afin d'assurer la sécurité des personnes. Finalement, des pare-chocs souples constituent un ultime niveau de détection d'obstacle en générant un arrêt d'urgence en cas de contact physique. La Figure 3 résume la position des différents capteurs permettant au robot de percevoir son environnement de manière fiable et complète.

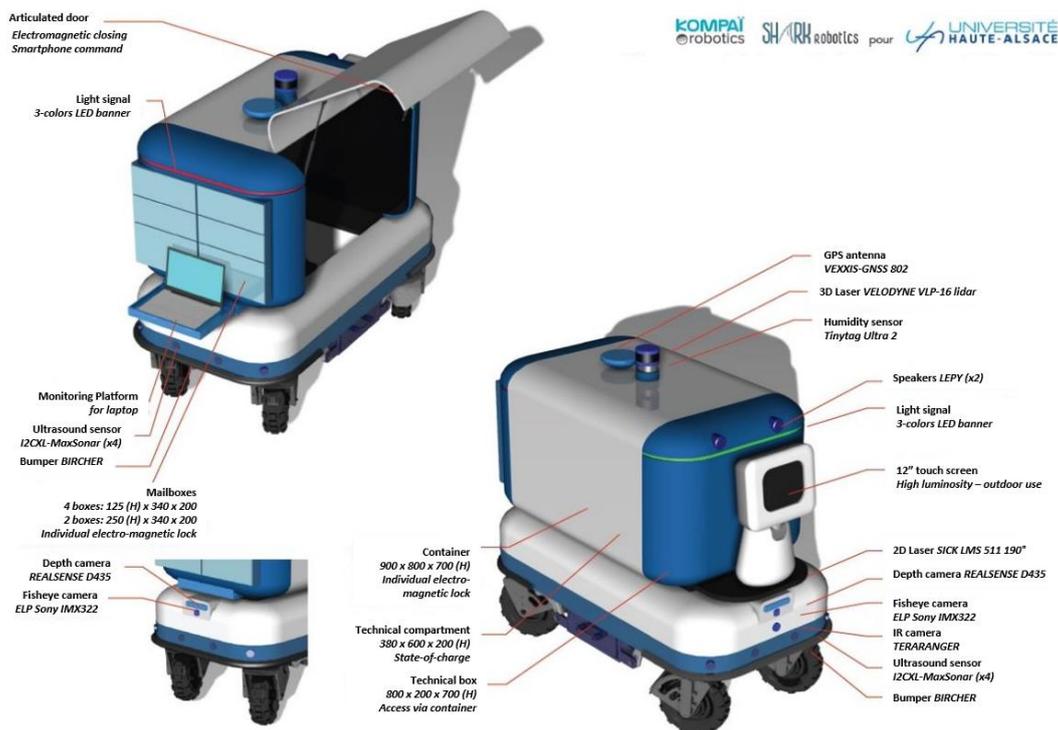


Figure 3. Robot autonome SMART-UHA : capteurs

© The Author(s). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

3.1.2. Actionneurs

La traction de l'ensemble du robot est assurée par quatre moteurs électriques BLDC-108 de la marque Golden Motor. Le moteur dispose d'une puissance de 48V, 1500W avec un courant nominal de 37A pour une vitesse de rotation de 3122 tr/min. Le couple délivré pour permettre la traction est de 4.7Nm. Ce moteur électrique fonctionne avec un réducteur R1/10.66 et un variateur Roboteq FBL2360 avec deux canaux : 40A en continu, 60A maximum.

Chaque roue est équipée de deux moteurs brushless et de réducteurs. Leur direction est réalisée par un second moteur électrique EC100 de Transtecno. Les caractéristiques techniques sont les suivantes : 24V pour 100W avec une vitesse nominale de 3000 tr/min. Un réducteur Transtecno CMB02 est ajouté au moteur avec un ratio R1/72.5 permettant de délivrer un couple de 22.5Nm avec un courant nominal de 6A et jusqu'à 31.17Nm avec un courant de pic de 8.4A. Un variateur Roboteq SDC2160 est intégré dans le panel d'actionneurs, avec deux canaux : 10A continu, 20A maximum.

Enfin, chaque roue est équipée d'un frein pilotable Intorq BFK457-12(ATF03) produisant un couple de freinage de 32Nm capable d'arrêter complètement le robot en cas d'urgence.

3.1.3. Architecture matérielle

L'architecture matérielle du robot a été conçue pour séparer la perception et le contrôle à la fois virtuellement et physiquement. Ceci permet de garantir une exécution des commandes d'urgence dans un délai respectant les contraintes critiques de temps-réel, et ce, sans dégrader la qualité de l'information perçue par les différents capteurs hétérogènes.

La tâche de perception, appelée « couche haute », est implémentée sur un ordinateur BOXER-6839. Le contrôle des moteurs électriques et des freins commandables est réalisé par une carte EMTRION appelée « couche basse ». L'acquisition des données perçues par les capteurs passe par l'environnement ROS embarqué sur le ordinateur BOXER. Des systèmes de switch Ethernet assurent la connexion entre les capteurs et les cartes embarquées. Une passerelle UP² est installée pour que le robot puisse communiquer via Internet (voir Fig. 4).

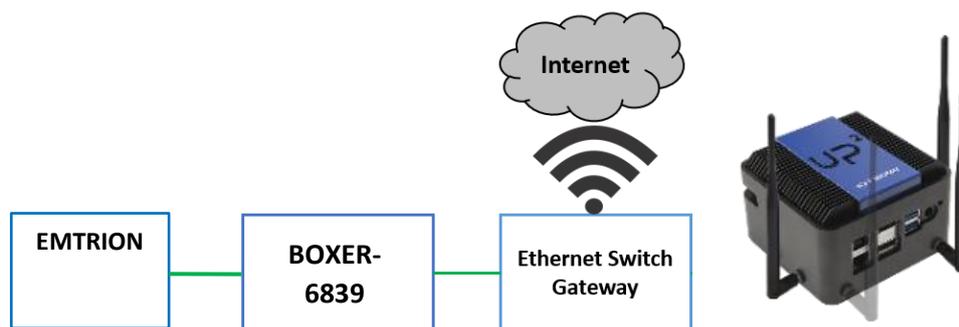


Figure 4. Robot autonome SMART-UHA : architecture hardware et passerelle UP²

© The Author(s). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

3.2. Evaluation quantifiée du fonctionnement

Suite à la réception du robot construit par le prestataire, l'UHA a assuré la phase de mise au point et de réglage des différentes fonctionnalités implémentées dans l'AGV. Le grand nombre d'essais menés a permis d'établir une base statistique des problèmes les plus fréquemment rencontrés afin d'apporter les corrections nécessaires, soit matérielles, soit logicielles. Les essais ont également été utilisés afin de caractériser le comportement statique et dynamique du système, de définir les limites des actionneurs et d'évaluer la fiabilité des capteurs. Grâce à une analyse méthodique du volume et du flux de données présents lors du fonctionnement du robot, les différentes saturations logicielles et pertes d'informations ont pu être identifiées. En outre, le lien entre le Volet Energie et les capacités électriques de la batterie a été étudié et validé.

Parmi les différentes expérimentations réalisées, celle datée du 29 juin 2021 est présentée ci-après. Durant ces essais, le robot a fonctionné en mode autonome sur le campus Illberg entre 09h02 et 15h47, soit 6h45 de fonctionnement avec une phase de recharge durant la période de mi-journée. Le robot a effectué plusieurs missions de livraison :

- Livraison 1 : ENSISA – Learning Center
- Livraison 2 : Learning Center – ENSISA
- Livraison 3 : ENSISA – Pyramide
- Livraison 4 : Pyramide – ENSCMu
- Livraison 5 : ENSCMu – ENSISA

L'ensemble des trajectoires réalisées est représenté sur la figure 5.



Figure 5. Trajectoires (en rouge) du robot durant les essais du 29-06-2021 de 09 :02 :08 à 15 :47 :26

Durant ces trajectoires, l'ensemble des données issues des organes du robot a été collectée via le *middleware* ROS. L'étude des ROSbags et des fichiers de logs des actionneurs permet entre autres de vérifier :

© The Author(s). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1) La complétude du système de perception embarqué sur le robot

Compte tenu de la quantité d'information et du débit restreint des calculateurs embarqués, seuls certains topics ROS ont été choisis pour l'acquisition, et ce durant la totalité d'un essai. La figure 6 présente les capteurs et actionneurs sélectionnés durant les essais du 29 Juin 2021. Les informations visuelles des caméras (RealSense, FishEye) ainsi que des informations de profondeur (télémètre laser) permettent au robot de percevoir l'ensemble de son environnement dans un voisinage proche et ainsi détecter les obstacles.

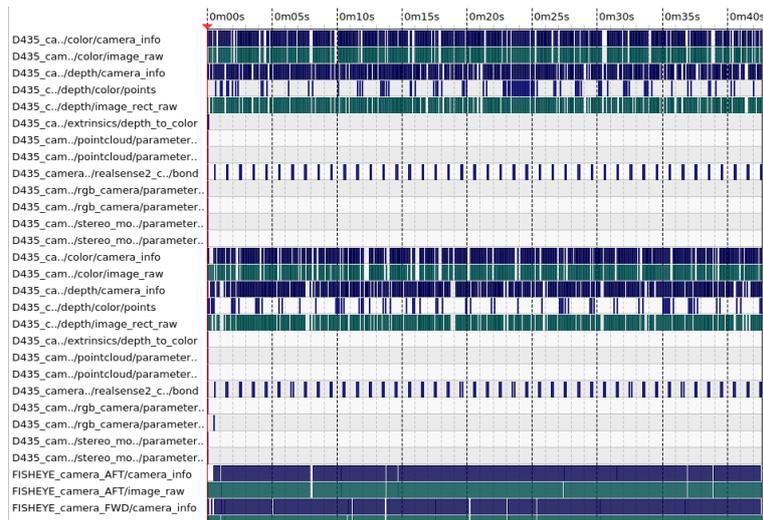


Figure 6. Topics enregistrés dans le ROSbag

2) L'efficacité de la recharge de la batterie

La Figure 7 présente l'évolution de la tension de la batterie (décharge et charge) en fonction du temps de l'expérimentation. Cette courbe concerne principalement la fin de l'essai, avec le retour depuis l'ENSCMu (bas de la colline) jusqu'à l'ENSISA (haut de la colline) suivi d'une recharge.

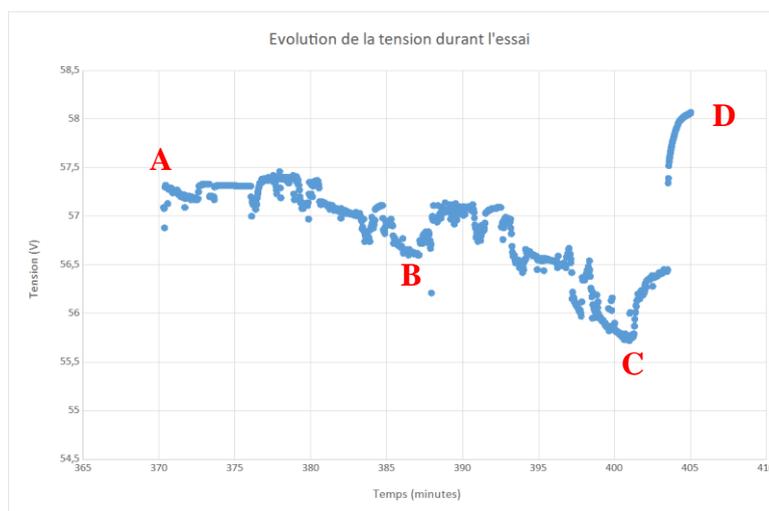


Figure 7. Evolution de la tension de la batterie durant l'essai du 29-06-2021 entre les minutes 370 et 405 (fin de l'essai)

© The Author(s). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Un pic de tension est constaté au démarrage de la manœuvre à la minute 370 (point A). Ensuite la tension se stabilise autour de 57 V, puis elle diminue entre la minute 380 et la minute 387 lors de la montée à mi-parcours (B). On retrouve une tension de 57 V au centre du campus, puis la tension chute drastiquement à moins de 56 V dans la montée de 20% qui mène à l'ENSISA (C). Finalement, le robot termine son parcours en allant se recharger et la tension monte à 58 V (D).

Ces essais ont confirmé les estimations concernant l'autonomie de la batterie : 4h à vide et 1h20 en pleine charge (100kg).

3.3. Amélioration et design itératif : SMART-UHA V2

Le projet SMART-UHA est engagé dans un processus de design itératif et d'amélioration continue. Le projet a été réalisé en deux phases : une phase initiale de 2018 à 2020 et une phase II financée par les instances FEDER et réalisée de 2020 à 2022. Cette deuxième phase a permis l'acquisition d'un second robot (figure 8) ayant un design différent du premier, non anthropomorphique. En outre, ce second robot comporte les mêmes fonctionnalités que la v1 mais dispose de tous les correctifs matériels et logiciels identifiés durant la phase d'évaluation quantitative précédemment mentionnée.



Figure 8. Photo des deux robots (V2 à gauche, V1 à droite) ; photo datée du 10-10-2022

La particularité de ce second robot est de disposer d'un système mécanique à l'avant (remplaçant l'écran) pour fixer d'autres capteurs ; ainsi, des études ont été menées avec des chercheurs d'IRIMAS spécialisés en nouvelles technologies de vision afin d'évaluer la faisabilité de l'intégration d'une caméra plénoptique sur le robot SMART-UHA. Cela permet

© The Author(s). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

notamment d'obtenir un dataset d'images réelles et non conventionnelles *in-situ* dans des situations inédites (interactions avec des étudiants, etc.).

Grâce à ce robot supplémentaire, l'open-lab est capable de fournir de vastes quantités de données pour les chercheurs travaillant sur la gestion de flottes, l'optimisation des livraisons et les communications véhiculaires.

De plus, avec l'augmentation du nombre de systèmes autonomes naviguant dans les zones publiques, la question légale de la responsabilité en cas d'accident est soulevée et portée à l'étude des chercheurs en sciences juridiques.

Enfin, la dualité anthropomorphique/non-anthropomorphique permet de réaliser ces études quantitatives en sciences comportementales concernant l'attitude des usagers en situation d'interaction avec l'un ou l'autre des robots. Cette étude permet notamment de mettre en lumière la perception positive ou négative des consommateurs à l'égard d'un message porté par le robot selon son aspect anthropomorphique. Des résultats de l'étude sont présentés dans la section suivante.

4. Lien avec les infrastructures et les usagers du campus

4.1. Interactions avec l'infrastructure énergétique

Les batteries du robot sont rechargées via la station de recharge, située dans le garage du robot. La connexion est réalisée par un connecteur mobile, permettant de pallier à des incertitudes sur la position du robot. Ce connecteur est placé à 50cm du sol. La procédure d'amarrage est entièrement automatisée. Afin de compenser le manque de signal GPS dans le garage, le robot autonome peut naviguer sur de courtes distances en utilisant une odométrie basée sur le lidar afin de détecter la station et d'effectuer un amarrage sûr, précis et efficace. Deux modes de chargement sont alors disponibles, en fonction de la situation : normal et rapide.

La charge normale dure 40 minutes pour recharger l'intégralité de la batterie. De plus, ce mode de recharge permet de préserver la santé électrochimique et ainsi prolonger la durée de vie de la batterie. La charge rapide permet de recharger 80% de la capacité totale en 15 minutes, mais au détriment de la durée de vie. En effet, la charge rapide diminue le nombre de cycles de charge maximum admissibles par les composés chimiques dans les cellules.

La partie dédiée à la gestion énergétique au sein du projet a pour objectif d'équiper les bâtiments de l'UHA avec des panneaux photovoltaïques complétés par un système de mesure haute-performance et non-intrusif. Les panneaux ont été installés sur le toit des bâtiments, avec une puissance totale de 6kWC répartie en 3kWC orientés Est et 3kWC orientés Ouest. L'énergie électrique produite est stockée dans un rack de 8 batteries de 20kWh couplé avec un onduleur intelligent permettant ainsi une gestion optimale de l'énergie circulant dans les batteries du rack.

Le système de mesure est composé de plusieurs capteurs afin de suivre l'évolution de la production, du stockage et de la consommation de l'énergie électrique ainsi que d'autres

© The Author(s). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

informations, notamment atmosphériques, grâce à une station de mesures météorologiques. Le système est complété par un système de mesure haute-performance Dewesoft SIRIUS R2DB : ce système autonome permet d'analyser des micro-paramètres électriques et construire des bases de données exploitables par des algorithmes d'intelligence artificielle grâce à une acquisition très haute fréquence (jusqu'à 1MHz par voie – 32 voies analogiques, 18 bus CAN).

La station de recharge du robot est directement connectée au système photovoltaïque précédemment mentionné. Cette configuration contribue à transformer le campus en laboratoire ouvert pour le management de l'énergie, avec un site de production d'énergie via les panneaux photovoltaïques avec des batteries fixes pour le stockage. Le robot peut être considéré comme une batterie mobile. Dans le cadre de l'APP et de l'open-lab, plusieurs étudiants ont pu travailler en projet sur des algorithmes d'optimisation des réseaux électriques instrumentés intelligents.

4.2. Interactions avec l'infrastructure de télécommunications

La passerelle UP² fournit plusieurs technologies de communication, respectivement les connexions Wi-Fi, LoRaWAN et 4G, la technologie SigFox n'étant pas disponible. Pour l'instant, la technologie 4G est à l'étude sur simulateur et n'est pas déployée sur le robot. Concernant le Wi-Fi et le LoRaWAN, des tests expérimentaux ont été menés afin de valider l'efficacité de telles technologies de communication pour émettre des données issues du robot circulant le long du campus.

Concernant le projet SMART-UHA, puisque le robot se déplace le long du campus parmi les piétons, il est crucial d'avoir un retour périodique sur ses états de fonctionnement et d'envoyer rapidement des commandes afin d'assurer la sécurité à chaque instant ainsi qu'un fonctionnement nominal. Une architecture réseau combinant les deux technologies permet de répondre à cette problématique. Les deux systèmes opèrent à différentes fréquences.

En effet, d'après l'étude menée et résumée dans le Tableau 2 [15]–[17], le LoRaWAN dispose d'un débit de transmission suffisant pour émettre des informations textuelles basiques (selon les paramètres régionaux, en France, la bande passante est de 125 kHz) et sa large couverture rend le déploiement de passerelles LoRa sur le campus bien plus facile qu'une couverture réseau Wi-Fi où des routeurs seront nécessaires pour agrandir la portée. De plus, grâce à la faible consommation d'énergie et la grande portée du LoRaWAN, il est possible pour le robot de communiquer sa position même dans des situations dégradées (sortie de la couverture du campus, faible batterie, etc.). Dans ce cas, la technologie Wi-Fi sera utilisée quand le trafic réseau permet de transmettre un flux d'informations important, par exemple des données vidéos issues de la caméra frontale.

Tableau 2. Comparaison des performances des technologies Wi-Fi / LoRa

Paramètres	Technologies	
	Wi-Fi	LoRa
Standard	IEEE 802.11 ac/ad/a/b/g/n	LoRaWAN R1.0
Bande de fréquence	2.4 – 60 GHz	868/900 MHz
Débit de données	1 – 6.75 Gb/s	0.3 – 50 kb/s
Portée de transmission	20 – 200m	Environ 30 km
Consommation d'énergie	High	Low

4.3. Interactions avec les usagers et acceptabilité de la technologie

Ancrée dans le paradigme de l'expérience du consommateur, l'étude des interactions entre le robot autonome et les piétons vise à comprendre comment la marche du robot, en particulier sa gestion des obstacles et sa vitesse, crée des émotions négatives et des sentiments d'insécurité ou d'ennui chez les piétons. Dans ce contexte, l'utilisation de la voix en tant qu'attribut du robot est susceptible de modérer ces effets. Plus largement, le projet de recherche vise à estimer un modèle des déterminants des perceptions d'intrusion de l'espace public résultant des mouvements du robot autonome. Cette étude met en évidence les effets de l'aspect humain du robot, confirmant l'hypothèse que plus le robot est anthropomorphisé, plus il est accepté par les utilisateurs et la société [18]–[21].

L'étude de ses interactions a été menée dans le cadre d'un projet (APP) lors de stages de Marketing. Lors de ces recherches, une enquête a été élaborée pour recueillir sur le campus de Mulhouse auprès des étudiants et du personnel leurs perceptions du robot. Une enquête à plus grande échelle a également été réalisée sur la perception des robots de livraisons utilisés par la grande distribution, à l'aide de vidéos de ce type de véhicules. Il en ressort les documents suivants :

- Une revue de littérature sur le traitement des robots de services à destination du grand public dans la recherche marketing ;
- Une veille managériale sur l'état de l'offre en matière de robots de service ainsi que l'identification des laboratoires et partenaires industriels/institutionnels intéressés par la question des robots de services.

Ces recherches ont permis au CREGO et à l'IRIMAS d'étudier l'acceptation par la société, et notamment les usagers du campus, d'un robot autonome circulant sans assistance. Ces travaux se poursuivent avec le second robot qui est moins anthropomorphique, permettant ainsi d'établir des conclusions reliant l'aspect du robot et son acceptation.

5. Gestion informatisée des livraisons

5.1. Application Programming Interface (API)

Une carte du campus a été téléchargée dans le robot autonome. Cette carte est constituée d'une liste de points de passages (*waypoints*) reliés par des chemins continus permettant au robot d'atteindre n'importe quel *waypoint* sur demande. Un API haut-niveau http est accessible à

© The Author(s). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

distance par une passerelle (voir Figure 4), ce qui rend possible de contrôler les états et comportements du robot. Ces commandes permettent d’avoir un contrôle par exemple sur l’état des boîtes aux lettres (ouvertes, fermées, verrouillées, déverrouillées), la position du robot et la prochaine destination à atteindre.

Le système de livraison permet à un utilisateur de programmer une livraison d’un endroit donné sur le campus où le robot doit recevoir le colis, jusqu’à un autre utilisateur à un autre endroit où le destinataire recevra le colis du robot.

Les utilisateurs ne peuvent évidemment pas accéder directement à l’API interne des robots. La sécurité doit également être renforcée pour éviter qu’un colis ne soit accessible à un utilisateur non désiré. Cela requiert un système logiciel intermédiaire qui va enregistrer les demandes de livraison, générer un planning coordonné et optimisé, et contrôler les robots le long de la trajectoire planifiée. Des notifications sont émises à la fois à l’envoyeur et au destinataire pour qu’ils puissent suivre la progression de la livraison et savoir quand le robot est disponible pour le dépôt / le retrait du colis.

De plus, il est possible qu’un grand nombre de requêtes de livraisons soient émises en même temps. La gestion des demandes multiples est orchestrée par un *complex scheduler* à deux niveaux : un premier niveau « historique » basé sur une pile FIFO, et un deuxième niveau « géographique » basé sur un calcul de distance euclidienne.

Exemple : en cas de 4 demandes A, B, C et D (historiquement ordonnées), le robot va commencer par traiter la demande la plus ancienne (A). Si, le long de cette trajectoire, d’autres demandes peuvent être satisfaites, alors elles le sont. Cet exemple est illustré par le schéma suivant :

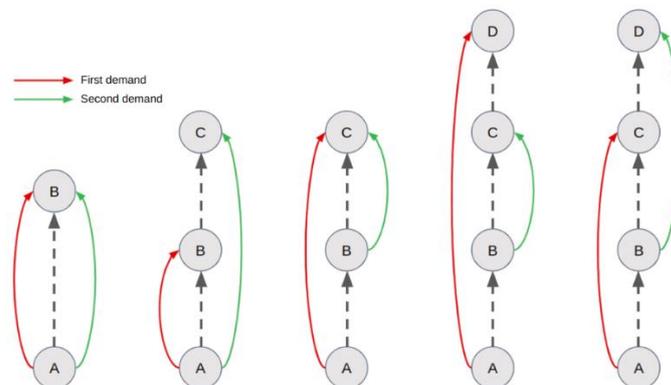


Figure 9. Cas d’usage pris en charge par le scheduler

Le système a été développé comme une application Web, écrite en Node.js avec une base de données MongoDB, et un front-end s’appuyant sur le framework React. Un simulateur a été développé, connecté au même API que les vrais robots, afin d’aider à l’implémentation et à l’automatisation de tests. L’architecture complète est résumée en Figure 10.

© The Author(s). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

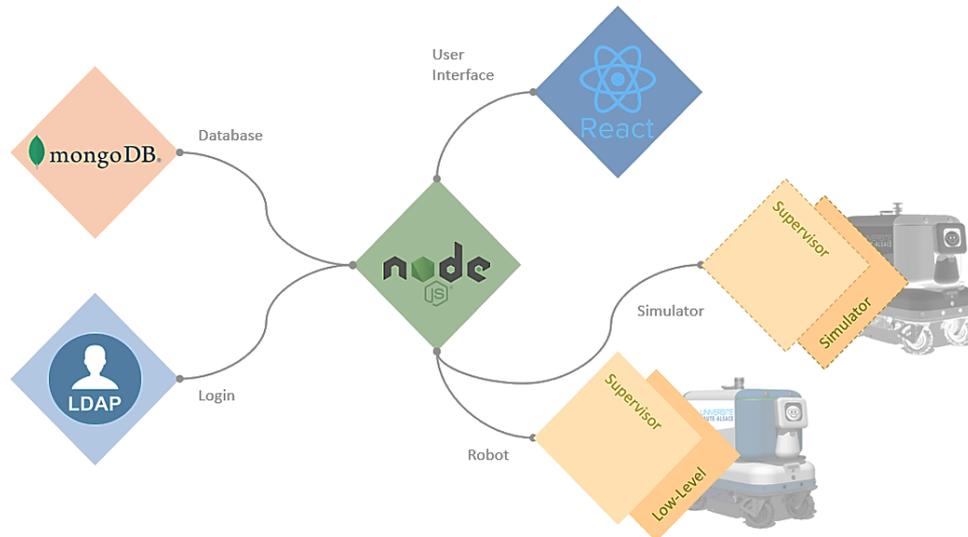


Figure 10. Architecture API

Si la partie mécanique et les algorithmes de navigation ont été réalisés par les prestataires, la gestion de la livraison par l'API et l'application Web ont été entièrement conçues par des étudiants dans le cadre d'approches par projet et par problème. De 2018 à 2021, 11 étudiants en spécialité Informatique ont travaillé sur la réalisation de l'architecture logicielle nécessaire au bon fonctionnement de la livraison de colis. Celle-ci comprenait notamment une application Web comme décrite précédemment, mais aussi un serveur associé à une base de données pour faire le lien entre l'application et le robot. Un travail de sécurisation ainsi que d'industrialisation ont été réalisés afin de la durcir et de garantir les bonnes pratiques pour les développements futurs. Il s'agit également de prévoir et d'implémenter le comportement à adopter pour les différents cas aux limites (erreurs d'utilisation, pannes, etc.). Le système de planification a également été adapté pour passer d'un robot de distribution unique à une flotte. Des comportements additionnels sont encore à l'étude, comme l'entrée et la sortie d'un bâtiment, et la consolidation des multiples cas limites.

Le turnover important et les impératifs de qualité et de sécurité obligent à appliquer rigoureusement les techniques d'ingénierie logicielle telles que la gestion de conflit, le *code versioning* et la gestion de branches, le test unitaire, le test d'intégration, l'intégration continue et le déploiement, ou encore la validation via une plateforme de *staging*. Appliquer ce genre de techniques avancées de gestion logicielle quotidiennement a été une réelle opportunité pour les étudiants ainsi qu'un cadre d'application permettant de mieux comprendre l'intérêt de ces méthodes. Le projet SMART-UHA permet également aux étudiants d'avoir une contribution réelle sur un projet à long-terme, offrant un contexte industriel au sein d'un laboratoire de recherche : *retro engineering*, transmission de connaissances, réunions avec des prestataires, etc. Cela leur permet de travailler à temps-plein sur un système, de le comprendre et de chercher à l'améliorer, en sachant que leur contribution persistera dans le temps et sera utile et utilisée par les futurs utilisateurs. Finalement, le contrôle d'un système physique comme le robot est une vraie originalité professionnelle pour les étudiants en informatique, dont les cours orientés

© The Author(s). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

logiciels ne leur permettent que rarement de voir et contrôler un système cyber-physique avec les programmes qu'ils développent.

5.2. Front-end Homme-Machine

Le front-end Homme-Machine fournit une interface pour que l'utilisateur puisse renseigner de manière intuitive un certain nombre d'informations : les bâtiments de l'expéditeur et du destinataire, le type de paquet (colis, lettre) ainsi que les options de planification. L'interface informera l'expéditeur et le destinataire par une notification mail via le réseau universitaire. Un exemple de l'interface Homme-Machine est présenté en Figure 11.

The screenshot shows the 'Delivery Campus Illberg' user interface. At the top, there are language selection buttons for 'fr' and 'en'. Below the title, there are navigation buttons for 'Home', 'Profile', 'Admin' (highlighted in yellow), and 'Logout'. The main section is titled 'Packages delivery form' and contains a form with the following fields:

- Origin: ENSCMu (dropdown menu)
- Destination: FLSH (dropdown menu)
- Receiver: frederic.fondement@uha.fr (dropdown menu)
- Size: Colis (dropdown menu)
- Date and Time of delivery: 02/01/2022 5:22 PM (text input)

At the bottom of the form, there are two buttons: a green 'Send' button and a grey 'Cancel' button.

Figure 11. Interface de livraison de paquet (vue utilisateur)

The screenshot shows the 'Delivery Campus Illberg' administrator interface. At the top, there are language selection buttons for 'fr' and 'en'. Below the title, there are navigation buttons for 'Home', 'Profile', 'Admin' (highlighted in yellow), and 'Logout'. The main section is titled 'Demands' and shows a table of delivery demands. The table has the following columns:

- Name: Alpha
- Availability: Ready
- Supervisor: at ENSISA_I_4
- Localization: X: 130.95225846834353, Y: 95.56870093017068, T: 0.45983474323403734
- Doors: A 2x2 grid of door icons, each with a lock symbol.
- Last update: 06/01/2022, 17:38:30
- Planning: []

Below the table, there are various control buttons for each demand, including 'Dock', 'Undock', 'Restart Supervisor', 'Reach', 'Acknowledge', 'Reset', and 'Reset GPS'.

Figure 12. Interface de livraison de paquet (vue administrateur)

© The Author(s). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Durant toute la procédure de livraison effectuée par le robot, les administrateurs peuvent avoir accès aux états du robot, particulièrement l'état physique (position, état de charge de la batterie, statut GPS, vitesse des moteurs), les capteurs (images RGB des caméras frontales) et l'avancement de la mission de livraison (état des boîtes aux lettres et autres). Un affichage du panneau d'administration est présenté en Figure 12.

Comme mentionné dans la section 4.2., la quantité de données à transmettre à l'administrateur en temps-réel est trop importante pour être supportée par la technologie LoRaWAN. Par conséquent, ces données sont actuellement transmises par la technologie Wi-Fi.

5.3. Sécurité

Le logiciel de livraison précédemment détaillé est sécurisé par un cluster Kubernetes de l'Université. Cependant, ce n'est pas le cas de la passerelle qui est visible, donc accessible, pour quiconque serait connecté à l'infrastructure réseau de l'Université. Par conséquent, un système de sécurité réseau doit être implémenté sur la passerelle pour que seul le logiciel de gestion de livraison puisse s'y connecter.

Le système de sécurité choisi est basé sur le logiciel open-source Nginx configuré par les chercheurs de l'IRIMAS. L'architecture de déploiement est détaillée en Figure 13. Pour accéder au robot via la procédure Nginx, il faut réaliser une authentification par certificat TLS (un certificat serveur pour la passerelle en tant que telle et un certificat client pour accéder à la passerelle). La dernière sécurité réseau est un pare-feu qui bloque toute requête externe sans qu'il y ait eu d'autorisation d'accès de la passerelle.

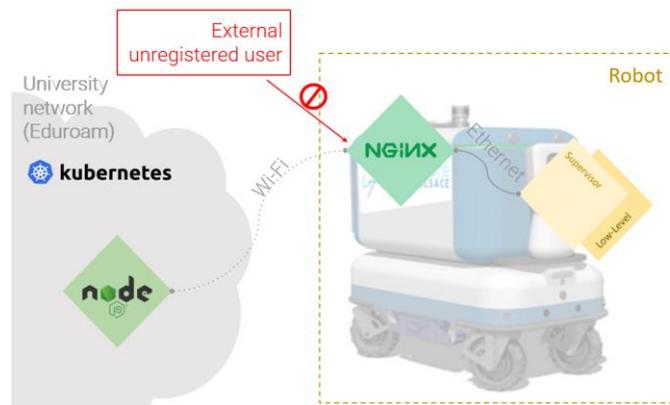


Figure 13. Système de sécurité réseau

6. Conclusion et discussion

Ce papier a présenté le projet SMART-UHA. Le volet « Mobilité » a été développé avec la présentation de la plateforme AGV. Ce robot mobile a été conçu afin de pouvoir naviguer en toute sécurité le long du campus de l'Université. Le projet a permis des interactions entre les composantes de formations et les laboratoires de recherche quelles que soient leurs disciplines. Cette situation de laboratoire ouvert génère des données uniques comme par exemple les

© The Author(s). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

interactions des usagers avec ce robot autonome sans biais induit par la présence d'un chercheur observateur et d'un cadre de travail expérimental.

La sécurité du robot est assurée par une architecture matérielle incluant un système de perception haut-niveau ainsi qu'un système de contrôle bas-niveau. Il est équipé de plusieurs capteurs (lidars, caméras, etc.). Le choix de la technologie de connexion réseau a été discutée dans la mesure où le robot est équipé à la fois de technologie Wi-Fi et LoRaWAN pour la communication véhiculaire. La solution proposée est d'utiliser le Wi-Fi pour ses performances et son débit de transmission pour envoyer continuellement de l'information à l'administrateur. La technologie LoRaWAN est utilisée comme « balise de secours » en cas de situations dangereuses et imprévues.

Le robot navigue sur le campus afin d'assurer des missions de livraison de colis. L'architecture réseau a été sécurisée afin que seul un utilisateur autorisé et reconnu puisse accéder au robot pour recevoir une livraison. Un focus a été fait sur le système de cybersécurité pour éviter le piratage de ce système cyber-physique.

Grâce au projet SMART-UHA, l'Université de Haute-Alsace s'est dotée de plateformes de recherche uniques sur lesquelles les différentes formations prennent appui afin d'illustrer par des projets expérimentaux les notions théoriques enseignées. Cette stratégie démontre l'efficacité du projet pour favoriser l'approche par projets et par problèmes. En tout, ce sont 7 projets étudiants de niveau BAC+5, 1 stage de DUT, 1 stage de BAC+4 et 4 stages de BAC+5 qui ont pu s'intégrer dans le tissu fédérateur créé autour de SMART-UHA. Les étudiants ont ainsi appliqué des compétences techniques (marketing, data science, télécommunications, cybersécurité) ainsi que des compétences transversales qui leurs seront utiles pour leur insertion dans le monde socio-économique : gestion de projet, dialogue avec des prestataires de service, livrables et respect d'échéances, etc.

L'approche par projets permettant à des étudiants de travailler sur ce système concret a permis le recrutement d'un stagiaire en tant qu'ingénieur d'étude, démontrant la pérennisation du dispositif et l'intérêt du projet dans un cursus professionnel.

La prochaine étape est la mise à disposition de la base de données dans le cadre des sciences ouvertes « open-data » afin d'amorcer des collaborations internationales sur la mobilité autonome et la gestion d'énergie intelligence. Enfin, le laboratoire ouvert a été pensé pour évoluer en fonction des besoins de la communauté scientifique, incluant d'autres instituts ainsi que tout type de partenaires (industriels, collectivités, etc.).

7. Remerciements

Les auteurs voudraient remercier la région Grand-Est, le SGARE, la M2A, l'UHA et le FEDER pour leurs soutiens financiers. Nous voudrions également remercier toutes les personnes qui ont été impliquées dans le projet (étudiants bénéficiant de l'APP marqués d'un astérisque*) : Jean-Luc Bischoff, Quentin Boerlen*, Guillaume Caux*, Sophie Delplace*, Ayoub El Moutaouakkil*, Virginie Fiesinger, Olivier Haeberlé, Lhassane Idoumghar,

© The Author(s). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Mohammed Amine Ihsane*, Hamza Kebouri*, Baptiste Leclerc*, Sofiane Lhiyat*, Youssef Loudiyi*, Djaffar Ould-Abdeslam, Jimmy Rampanana*, Baptiste Saint-Arnoult*, Erwan Soria*, Julien Weissenberger*. Nous remercions chaleureusement Kompaï Robotics pour leur support technique. Ce papier a été réalisé dans le cadre du projet COALA (AAP UHA). Finalement, nous remercions le Pr. Apollonios de Rhodes et T. Burton *et al.* pour leur contribution sémantique à la dénomination des robots.

Références bibliographiques

- [1] P. Beinschob, M. Meyer, C. Reinke, V. Digani, C. Secchi, and L. Sabattini, “Semi-automated map creation for fast deployment of AGV fleets in modern logistics,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 87, pp. 281–295, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.robot.2016.10.018.
- [2] S. Benzidia, B. Ageron, O. Bentahar, and J. Husson, “Investigating automation and AGV in healthcare logistics: a case study based approach,” *International Journal of Logistics Research and Applications*, vol. 22, no. 3, pp. 273–293, May 2019, doi: 10.1080/13675567.2018.1518414.
- [3] Y. Wang, R. Li, Q. Qi, and X. Su, “An improved one-stage detector for vehicle and pedestrian detection on campus AGV,” in *2021 IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics (ISR)*, Mar. 2021, pp. 322–325. doi: 10.1109/ISR50024.2021.9419572.
- [4] C. Wei, S. Shang, T. Wu, and H. Fu, “Partial Static Objects Based Scan Registration on the Campus,” in *Pattern Recognition*, Berlin, Heidelberg, 2014, pp. 371–380. doi: 10.1007/978-3-662-45646-0_38.
- [5] R. Orjuela, J.-C. Peruchetti, and M. Basset, “Trois prototypes de véhicules pour faire rouler les enseignements à l’ENSISA : un retour d’expérience,” *J3eA*, vol. 14, p. 1001, 2015, doi: 10.1051/j3ea/2015001.
- [6] J.-L. Dillenseger, P. Hamon, G. Caverot, and C. Toumoulin, “Do students dream of moving robots ou L’enseignement de la robotique mobile en Licence professionnelle en Mécatronique,” *J3eA*, vol. 15, p. 0001, 2016, doi: 10.1051/j3ea/2016001.
- [7] R. Guyonneau and F. Mercier, “IstiABot ou la Conception d’un Robot Libre pour l’Éducation et la Recherche,” *J3eA*, vol. 20, p. 0002, 2021, doi: 10.1051/j3ea/20210002.
- [8] C. Vloebergh, D. Grenier, P. Fisette, C. Eugène, and J.-D. Legat, “Intégration d’une compétition de robotique au sein du cursus de formation en mécatronique,” *J3eA*, vol. 5, p. 019, 2006, doi: 10.1051/j3ea:2006049.
- [9] D. Grenier *et al.*, “Apprentissage par projet autour d’un robot mobile : partage d’expériences entre l’Europe et le Maroc,” *J3eA*, vol. 7, p. 1028, 2008, doi: 10.1051/j3ea:2008027.
- [10] H. Laghmara *et al.*, “Obstacle Avoidance, Path Planning and Control for Autonomous Vehicles,” in *2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Paris, France, 2019, pp. 529–534. Accessed: Aug. 22, 2019. [Online]. Available: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02153577>
- [11] D. Vieira, R. Orjuela, M. Spisser, and M. Basset, “Longitudinal Vehicle Control based on Off-road Tire Model for Soft Soil Applications,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 54, no. 10, pp. 304–309, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.ifacol.2021.10.180.
- [12] S. Bourebia *et al.*, “A belief function-based forecasting link breakage indicator for VANETs,” *Wireless Netw*, Mar. 2019, doi: 10.1007/s11276-019-01973-0.

© The Author(s). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

- [13] B. Canaan, B. Colicchio, and D. Ould Abdeslam, “Microgrid Cyber-Security: Review and Challenges toward Resilience,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 16, Art. no. 16, Jan. 2020, doi: 10.3390/app10165649.
- [14] A. Haffaf, F. Lakdja, D. Ould Abdeslam, and R. Meziane, “Monitoring, measured and simulated performance analysis of a 2.4 kWp grid-connected PV system installed on the Mulhouse campus, France,” *Energy for Sustainable Development*, vol. 62, pp. 44–55, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.esd.2021.03.006.
- [15] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, and W. Townsley, “A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things,” *Sensors*, vol. 16, no. 9, p. 1466, Sep. 2016, doi: 10.3390/s16091466.
- [16] G. Klimiashvili, C. Tapparello, and W. Heinzelman, “LoRa vs. WiFi Ad Hoc: A Performance Analysis and Comparison,” in *2020 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, Feb. 2020, pp. 654–660. doi: 10.1109/ICNC47757.2020.9049724.
- [17] R. Liang, L. Zhao, and P. Wang, “Performance Evaluations of LoRa Wireless Communication in Building Environments,” *Sensors*, vol. 20, p. 3828, Jul. 2020, doi: 10.3390/s20143828.
- [18] F. Eyssel, F. Hegel, G. Horstmann, and C. Wagner, “Anthropomorphic inferences from emotional nonverbal cues: A case study,” in *19th International Symposium in Robot and Human Interactive Communication*, Sep. 2010, pp. 646–651. doi: 10.1109/ROMAN.2010.5598687.
- [19] A. Goudey and G. Bonnin, “Must smart objects look human? Study of the impact of anthropomorphism on the acceptance of companion robots,” *Recherche et Applications en Marketing (English Edition)*, vol. 31, no. 2, pp. 2–20, Jun. 2016, doi: 10.1177/2051570716643961.
- [20] P. C. Verhoef *et al.*, “Consumer Connectivity in a Complex, Technology-enabled, and Mobile-oriented World with Smart Products,” *Journal of Interactive Marketing*, vol. 40, no. 1, pp. 1–8, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.intmar.2017.06.001.
- [21] J. Wu, J. Chen, and W. Dou, “The Internet of Things and interaction style: the effect of smart interaction on brand attachment,” *Journal of Marketing Management*, vol. 33, no. 1–2, pp. 61–75, Jan. 2017, doi: 10.1080/0267257X.2016.1233132.

BIOGRAPHIE DES AUTEURS

Thomas Josso-Laurain : a reçu sa thèse en 2017 de l’Université de Valenciennes. Depuis 2018, il est Maître de conférences à l’Université de Haute-Alsace, il effectue sa recherche à l’IRIMAS et son enseignement à l’école d’ingénieurs ENSISA. Ses intérêts scientifiques regroupent la mobilité, les mustéolidés et les véhicules autonomes avec des approches par fusion de données et intelligence artificielle.

Jonathan Ledy : est Ingénieur de Recherche depuis 2017 à l’institut IRIMAS. Il est docteur de l’Université de Poitiers depuis 2012 et ses thématiques de recherche vont des réseaux véhiculaires à l’identification d’artefacts MTG Double Masters en passant par la robotique mobile.

Frédéric Fondement : est maître de conférences à l’Université de Haute-Alsace. Il enseigne essentiellement dans la spécialité Informatique et Réseau de l’ENSISA, où le projet SMART-

© The Author(s). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

UHA lui a permis de co-encadrer plusieurs projets et stages relatifs à son domaine d'enseignement. Il a reçu son diplôme d'ingénieur de cette même école, son doctorat de l'EPFL, et ses domaines d'intérêt couvrent le génie logiciel et les architectures distribuées.

Sébastien Bindel : a reçu sa thèse en 2016 de l'Université de Bordeaux, France. Depuis 2017, il est Maître de conférences à l'Université de Haute-Alsace, au département Réseaux et Télécommunications de l'IUT de Colmar. Ses intérêts scientifiques sont au croisement de la théorie et de la pratique avec un focus sur les réseaux mobiles sans-fil.

Frédéric Drouhin : est Maître de conférences à l'Université de Haute-Alsace en Réseaux et Télécommunications. Il a travaillé pour le CERN sur l'acquisition des données basés sur des systèmes réels de 1995 à 2010. Depuis 2011, il travaille sur les réseaux ad-hoc inter véhiculaires principalement via des protocoles basés sur les informations Xlayer.

Françoise Simon : est une Professeur de Marketing à l'Université de Haute-Alsace. Après avoir travaillé en industrie, elle a obtenu sa thèse en 2005. Sa recherche se focalise sur l'acceptation de la technologie, le marketing et la communication relationnels, avec un intérêt particulier pour les effets des investissements des marques sur le comportement du consommateur. Ses recherches ont été publiées, entre autres, dans *International Journal of Research in Marketing*, *Marketing Letters*, *Journal of Business Research*, *European Journal of Marketing*, and *Psychology & Marketing*.

Michel Basset : a obtenu sa thèse en 1991 en automatique et traitement du signal à l'Université de Haute-Alsace. Nommé Maître de conférences en 1992 au sein de la même université, il est depuis 2005 Professeur. Il réalise sa recherche à l'institut IRIMAS et assure la direction de l'équipe de recherche ASI/MIAM. Il enseigne à l'école d'ingénieurs ENSISA (Mulhouse). Ses intérêts scientifiques incluent la modélisation expérimentale de systèmes non-linéaires et notamment la dynamique véhicule, ainsi que les commandes avancées (robuste, MPC, FTC) appliquées à la mobilité terrestre et aux véhicules autonomes.