

# CIGI QUALITA MOSIM 2023

## Développement d'un prototype RFID-RTLS passif de suivi d'équipements en milieu X.0

BERRABAH, YACINE<sup>1</sup>, YGAL BENDAVID<sup>2</sup>, ROSTAMPOUR, SAMAD<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ESG UQAM

Département AOTI, 320 rue Sainte-Catherine Est, DS-3933, Montréal Qc, H2X1L7  
Bendavid.ygal@uquam.ca

<sup>2</sup> ESG UQAM

Département AOTI, 320 rue Sainte-Catherine Est, DS-3933, Montréal Qc, H2X1L7  
Berrabah.yacine@courrier.uqam.ca

<sup>3</sup>CEGEP VANIER

Département Computer Science, 821 avenue Ste-Croix, Montréal, Qc H4L 3X9, CA  
rostamps@vaniercollege.qc.ca

---

**Résumé** – Pour rester compétitives, les entreprises manufacturières doivent prendre le virage de la transformation numérique. Ce projet de recherche appliqué vise à répondre aux préoccupations des entreprises manufacturières qui explorent l'utilisation de technologies RFID-IoT (Internet des Objets) pour améliorer la gestion de leurs équipements critiques (perdus, déplacés, rangés des emplacements inappropriés et non actualisée sur le système ERP). Cela complique la planification des opérations de ces entreprises et implique une perte de productivité, en plus de nuire à la traçabilité nécessaire pour l'entretien de ces équipements critiques. Dans ce projet, nous prendrons le cas de l'entreprise GL qui gère un grand nombre de moules requis lors de la fabrication de contenants en plastique – et qui fait face à ce problème. L'objectif du projet vise l'identification, le développement et l'implantation d'un prototype de solution de localisation en temps réel (RTLS) qui mise sur les technologies IoT émergentes. Le projet pilote mené au sein d'un entrepôt multi-zones, multi-étagères de l'entreprise a permis de tester le potentiel et les limites de ces technologies RTLS soutenue par les dernières technologies RFID passives UHF – et qui se posent désormais comme un compétiteur aux technologies actives.

**Abstract** – To remain competitive, manufacturing companies must embrace digital transformation. This applied research project aims to address the concerns of manufacturing companies that are exploring the use of RFID-IoT (Internet of Things) technologies to improve the tracking and tracing of their critical equipment (lost, moved, stored in inappropriate locations and not updated on the ERP system). This issue complicates the planning of the shop floor operations and implies a loss of productivity, in addition to affecting the traceability necessary for the maintenance of these critical equipment's. In this project, we will take the case of GL, a company that manages a large number of molds required for the manufacturing of plastic containers, and that is facing this problem. The objective of the research is to identify, develop and implement a prototype real-time location solution (RTLS) that leverages emerging IoT technologies. The pilot project conducted within a multi-zone, multi-shelf warehouse of the company allowed to test the potential and the limits of these RTLS technologies supported by the latest passive UHF RFID technologies - which are now posing as a competitor to active technologies.

**Mots clés** – RFID, IoT, RTLS, géolocalisation, transformation numérique

**Keywords** – RFID, IoT, RTLS, digital transformation, manufacturing

---

## 1 INTRODUCTION-

Au cours des années 80 et 90, le secteur manufacturier du Québec se maintenait en moyenne à 20 % du total du produit intérieur brut (PIB) québécois. Toutefois à partir des années 2000, le secteur a progressivement commencé à perdre de son importance pour atteindre 14,1 % en 2012 (ISQ, 2013). Au cours de cette période, la part des emplois manufacturiers a chuté de 18,2 % en 2001 à 11,5 % en 2019 (Benessaïeh, 2020). Cette baisse absolue de l'activité manufacturière s'explique par plusieurs raisons dont la très forte concurrence de pays asiatiques qui bénéficient toujours d'une main-d'œuvre meilleur marché et d'une expertise accrue en production, ainsi qu'une forte progression des industries de services (Couture et Clarke, 2017). À ces effets combinés, notons le manque d'investissement dans les technologies par les entreprises manufacturières qui se basaient sur la faiblesse relative du dollar canadien pour rester compétitives. Pour ne rien arranger, la pandémie de la COVID-19 a eu un impact négatif majeur en 2020 dans ce secteur. En 2021, les ventes totales de biens fabriqués des manufacturiers québécois se chiffraient à près de 183G\$ (vs 153 G\$ en 2020), constituant ainsi un maillon important de l'économie canadienne. (STIQ, 2022).

Pour pallier cette faiblesse sectorielle, stimuler l'industrie manufacturière, améliorer sa productivité et soutenir sa compétitivité, le ministère de l'Économie et de l'Innovation (MEI) du Québec proposait un plan d'action en économie numérique qui soulignait clairement l'importance de se moderniser et d'embrasser les concepts de l'industrie 4.0 (MEI, 2020, p.11). Concrètement, dans le cadre de ce plan d'action et d'accompagnement des entreprises québécoises dans leur transformation numérique, le MEI a conçu un outil de diagnostic (Audit Industrie 4.0) qui permet aux entreprises manufacturières de mesurer leur *maturité numérique* et d'élaborer une planification à partir d'enjeux stratégiques et opérationnels (c. à d., autant sur la stratégie d'affaires, la stratégie numérique, que sur la gestion des processus d'affaires clients-fabrication-support).

Cela dit, si d'un point de vue stratégique, l'adoption d'une démarche de transformation numérique oblige ainsi les entreprises à une réflexion importante sur leurs modèles d'affaires et leurs modes de gestion (Affogbolo *et al.*, 2020), dans la pratique, bien des entreprises abordent le X.0 (Schafer, 2017) par la résolution de problèmes opérationnels. C'est souvent un premier projet qui constitue une porte d'entrée pour nombre d'entreprises québécoises dont la motivation initiale est reliée à un problème d'affaires pratique. C'est le cas de l'entreprise focale de ce projet qui fait face à une perte de productivité reliée au manque de visibilité en temps réel sur la localisation de ses équipements critiques ; ce qui a un impact direct sur la planification et la gestion de sa production.

Bien qu'il s'agisse d'une problématique assez usuelle et qu'il existe désormais un portefeuille important de solutions de localisation interne en temps réel (*indoor Real Time Location Systems* - RTLS) qui permettent le suivi en (*tracking*) et de traçabilité (*tracing*), il n'est pas aisé de sélectionner la plus adaptée à un cas d'utilisation spécifique. En fait, actuellement, la plupart des solutions RTLS misent sur des technologies de géolocalisation compétitrices qui utilisent des transpondeurs (ou tags) « actifs » (c. à d. qui nécessitent des batteries pour alimenter les dispositifs de localisation des items). Or, dans le cas de gestion d'équipements dormants (utilisés sur une base sporadique puis entreposés sur de longues périodes), ce type de

solution qui exige un entretien/remplacement de batteries des tags n'est pas souhaitable.

Toutefois, l'émergence de nouvelles solutions de géolocalisation en temps réel qui reposent sur des technologies d'identification par fréquence radio (RFID) « passives » ont pénétré le marché (c. à d. qui ne nécessitent pas des batteries pour alimenter les tags apposés pour localiser les items) et se présentent désormais en concurrence directe aux solutions « actives » établies comme le « standard dominant » (Utterback, 1996). Ainsi, plusieurs acteurs ont misé sur ces technologies et proposé des lecteurs RFID RTLS – tels que *Impinj* en 2014 (2D x, y), *RFControls* en 2017 et *Zebra* en 2020-21 (3D x, y,z). Bien que la performance se soit améliorée au cours des dernières années, l'adoption de ces systèmes est encore très limitée, la littérature académique sur les RTLS passives est rare, incomplète ou non actualisée, et les études sur le sujet sont surtout fournies par les vendeurs de ces mêmes solutions; ce qui remet en question la neutralité des résultats. Par ailleurs, de récentes revues bibliographiques rappellent que les recherches dans le domaine de l'Internet des objets/IoT dans le secteur de la logistique et la gestion des chaînes d'approvisionnement ont surtout mis l'emphase sur les technologies RFID passives pour des applications de suivi en temps réel (*tracking & monitoring*) (Katoch, 2022 ; Casella *et al.*, 2022), laissant le volet RTLS passif peu ou pas couvert. Cela soulève toutefois plusieurs questions quant au design le plus approprié pour la gestion des équipements (infrastructure physique et logicielle), et à la performance réelle vs celle publicisée par les vendeurs sur le marché.

L'objectif de ce projet de recherche est donc de développer et de tester un prototype de solution de localisation en temps réel qui mise sur les technologies RFID passives.

Dans la section 2, nous présentons l'entreprise focale de cette étude. L'entreprise GL constitue le terrain de recherche dans lequel nous avons ancré notre problématique. Dans la section 3 nous explorons le rôle central des technologies IoT utilisées dans la mise en place d'applications innovantes dans l'industrie X.0; particulièrement les solutions RTLS visées dans cette étude. Dans la section 4, nous proposons ainsi une analyse comparative synthétique actualisée des technologies RTLS, afin de refléter les dernières tendances industrielles. Dans la section 5, nous présenterons la méthodologie de la recherche en *design science* suivie pour développer notre artefact (le prototype de solution) de ce projet de recherche. Le design de notre prototype est élaboré dans la section 6 où nous présentons l'infrastructure physique et logicielle. Finalement, dans la section 7, nous présentons les conclusions du projet pilote.

## 2 CONTEXTE DU PROJET ET OBJECTIFS

### 2.1 L'entreprise Focale de l'étude

L'entreprise GL, une entreprise manufacturière spécialisée dans la fabrication d'emballages et de contenants pour les produits alimentaires. Le manque de visibilité en temps réel sur la localisation de centaines d'équipements critiques (plus spécifiquement ses moules utilisés pour la fabrication de contenant en plastique) impacte directement la planification des opérations, l'obligeant à un réordonnement de la production. Comme l'entreposage des moules peut durer des mois, voire des années, avant qu'il ne soit remonté sur une presse pour la fabrication de la gamme associée, le problème n'est pas tout de suite notifié et survient lors d'une

planification de production. Généralement, après chaque utilisation, le moule est mis dans une caisse en bois puis entreposé dans l'entrepôt jusqu'à la prochaine réutilisation.

Bien que l'emplacement du moule soit noté dans le système (en scannant son code à barres ainsi que la localisation) la fiabilité de l'information est parfois compromise. Il arrive par exemple que la localisation physique de ces moules ne soit pas actualisée dans le système ERP (moules déplacés sans notification, rangés dans des emplacements inappropriés, empruntés sans être notifiés, etc.). Toutefois, vu le grand nombre de moules et la taille de l'entrepôt multizones, multi-rangées, multi-étagères, la recherche d'un moule spécifique peut prendre plusieurs heures à plusieurs jours -parfois sans être trouvé. De ce fait, la recherche d'un moule créait des pertes de temps importantes et mobilise des employés dans une activité sans valeur ajoutée, cause des retards de production, laissant ainsi les machines inactives et réduisant considérablement la productivité. Lorsqu'un moule n'est pas retrouvé, cela implique aussi des coûts de réusinage pour un nouveau moule.

## 2.2 Objectif spécifique du projet

Pour répondre à cette problématique et assurer une visibilité sur ces équipements critiques, une solution de géolocalisation indoor «passive» est donc envisagée. Étant donné le contexte défini, le choix d'une telle solution doit prendre en considération plusieurs critères : (i) demander un entretien minimal des tags, car ces moules peuvent être entreposés pendant plusieurs mois à plusieurs années avant d'être réutilisés (ii) tenir compte de la structure imposante des moules en métal et de leurs manipulations en entrepôt et dans les machines (iii) assurer une détection des moules partout dans les zones de l'entrepôt équipé d'étagères en métal hautes de 15 m (iv) être déployée dans d'autres cas d'utilisations possibles dans le futur – notamment pour le suivi de la production.

L'objectif de ce projet de recherche est donc de développer et de tester un prototype de solution de localisation en temps réel des équipements critiques (p. ex., moule) en misant sur les dernières technologies de localisation RFID passives disponibles sur le marché qui puisse (a) être déployé dans de grands entrepôts multi étagères (b) minimiser la gestion de la maintenance (c) minimiser la complexité d'implantation et (d) être ensuite déployé pour suivre la gestion de la production.

## 3 REVUE DE LITTÉRATURE

### 3.1 Industrie 4.0 vers 5.0

Comme le rappellent, à juste titre (Garms, *et al.*, 2019) dans un rapport de McKinsey qui cite les meilleures pratiques d'entreprises qui ont amorcé une démarche 4.0 «*Succeeding in Industry 4.0 asks for (far) more than deploying new IT tools; it requires no less than a techenabled organizational transformation of operations*». Cette démarche de transformation numérique se caractérise par l'automatisation et par une intégration de nouvelles technologies à la chaîne de valeur de l'entreprise (MEI, 2020), permettant d'interconnecter et de synchroniser les différents systèmes de l'usine (STIQ, 2021). Le concept d'industrie 4.0 désigne ainsi le recours aux diverses technologies numériques pour rendre les activités de la chaîne de valeur plus performantes (Kambel *et al.*, 2018), mieux adaptées aux besoins de plus en plus personnalisés des clients, et plus agiles pour faire face aux aléas du marché. Ce concept a évolué avec la proposition de celui d'industrie 5.0 (Commission européenne, 2021) reprenant d'abord le volet technologique du 4.0, mais en recentrant l'approche sur 3

pilliers : (a) l'agilité et la résilience des entreprises aux processus soutenus par des technologies de pointe (b) l'humain au cœur de la démarche d'innovation et de compétitivité avec le développement de compétences et (c) le volet environnemental avec des pratiques de gestions durables et une réelle prise en compte du cycle de vie des produits.

### 3.2 l'IoT dans le portfolio des technologies de l'industrie X.0

l'IoT fait partie de l'écosystème technologique de soutien à l'agilité et la résilience des entreprises. L'IoT représente une un écosystème technologique où «chaque objet physique (vivant ou non) est équipé de technologies lui permettant de communiquer, automatiquement, en temps réel, avec son environnement (physique et logiciel) pour gérer ses propres transactions» (Bendavid *et al.*, 2021). Depuis les 20 dernières années, la recherche sur le sujet a augmenté de manière significative (Wang *et al.*, 2021) dans tous les milieux d'affaires, dont le milieu industriel où l'acronyme IIoT (Industrial IoT) est utilisé pour décrire ces technologies de soutien aux opérations (Behrendt *et al.*, 2021; Garms *et al.*, 2019). L'interaction permise par les technologies IoT entre le monde physique et le monde virtuel a ouvert l'exploration des jumeaux numériques (ou *digital twin*) dans quel cas, les entités physiques ont des contreparties numériques qui sont actualisées avec des données en temps réel (Jiang *et al.*, 2021 ; Liu *et al.*, 2020) tout au long de leurs cycles de vie.

La Figure 1 présente l'infrastructure d'une solution IdO dérivée de différents modèles proposés dans la littérature (adapté de Bendavid *et al.*, 2022).

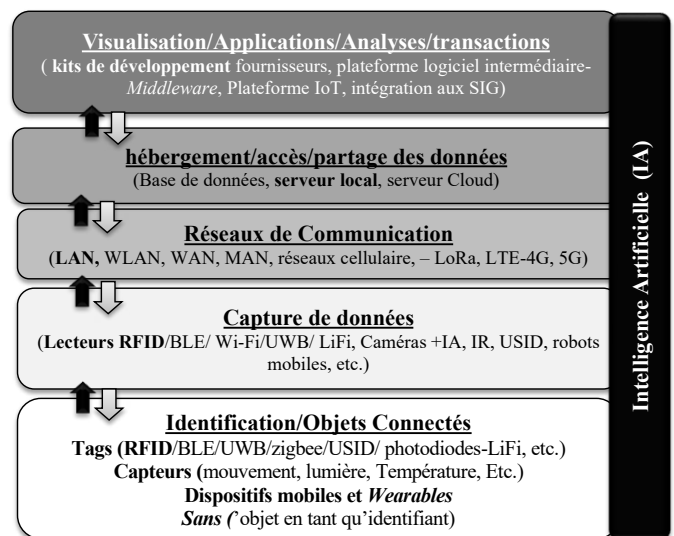


Figure 1. Infrastructure IOT

Ce modèle permet de comprendre que la mise en place d'une solution IoT requiert la co-évolution des nombreuses couches technologiques multi-protocoles, multi-standards multi-fréquence pour (a) l'identification et la connectivité des objets (b) la capture de données/objets en temps réel par des lecteurs respectifs (c) les réseaux de communications sans fil (d) les plateformes de stockage de données locales, ou hébergées (e) les plateformes logicielles de visualisation, d'analyse et les modules l'intégration aux systèmes de gestion intégrés (SIG). Au cours de la dernière décennie, les avancées dans le domaine de l'IA aux permis aux solutions basées sur la reconnaissance par la vision de faire partie de ce portefeuille, dans quel cas, l'objet constitue l'identifiant (reconnu par des algorithmes). L'IA est aussi utilisé dans les autres couches de l'infrastructure IdO, pour améliorer la performance du réseau de communication et la gestion de bases de données, mais surtout

pour l'analyse de données massives et le soutien à la prise de décision dans divers systèmes de gestion.

### 3.3 Acteurs du RTLS

Dans le cadre de cette recherche, comme nous nous intéressons aux solutions RTLS, dans les couches d'identification et de capture des données de l'infrastructure IoT. Ces fonctions de localisation sont désormais essentielles au sein de « l'usine intelligente » (Ghadge *et al.*, 2020) et les innovations des technologies IoT facilitent la mise en place de tels systèmes (p. ex. Halawa *et al.*, 2020) offert par divers fournisseurs technologiques. Dans le rapport de Gartner intitulé « Magic Quadrant for Indoor Location Services, Global » (Zimmerman et Zimmermann, 2022), nous retrouvons plusieurs joueurs établis. Chacun mise sur l'une des différentes technologies évoquées dans la Figure 2. Plusieurs technologies IoT sont utilisées dans le domaine de la localisation interne. Toutefois, la littérature académique s'est peu intéressée au design et au développement des solutions de localisations qui mise sur les technologies passives (Ghadge *et al.*, 2020).

Figure 1: Magic Quadrant for Indoor Location Services, Global



Figure 2. Magic quadrant des principaux acteurs RTLS

Certaines études préconisent le design de telles solutions (Newman-Casey, 2020), mais ces dernières reposent souvent sur la multiplication de lecteurs fixes plutôt que sur des lecteurs passifs RTLS.

### 3.4 Solutions RTLS : le portefeuille des options

Actuellement, la plupart des solutions RTLS misent sur des technologies actives, établies ou émergentes.

On note d'abord les solutions RTLS basées sur le **WIFI** (*Wireless Fidelity*) où l'ajout d'antennes, de dispositifs de détection de proximité (*exciters*) et le recours à des algorithmes efficaces permet d'obtenir une précision de localisation. Dans ce secteur, nous retrouvons différents vendeurs établis tels qu'*Aruba*, ou *Stanley Healthcare*.

Les RTLS basés sur le **Bluetooth low energy (BLE)** ont aussi beaucoup évolué. La plupart des solutions de localisation existantes basées sur le BLE reposent sur la puissance du signal reçu (*RSSI pour Received Strength Signal*), ce qui limite la précision de la localisation à 4-5 mètres. Dans ce secteur, nous retrouvons différents vendeurs établis tels que *HID Global* ou *Minew*. Il est intéressant de constater que certains

vendeurs exploitent d'autres techniques pour la localisation via BLE dont *Quuppa* qui mise sur le BLE/AoA (*Angle of arrival*) et qui offrent une précision de location de quelques cm.

Une des technologies les plus utilisées en RTLS repose sur le **Ultra Wide Band (UWB)**, moins sensible aux interférences d'autres signaux et qui peut pénétrer divers matériaux. Cette technologie qui permet une précision de localisation de 10-25 cm a été identifiée par certains auteurs comme étant une des plus performantes pour la localisation en entrepôt (Halawa *et al.*, 2020; Zafari *et al.* 2019). Pour améliorer la précision de localisation, plusieurs types d'algorithmes de triangulation sont utilisés, basés sur le *Time of Arrival -TOA*, *Time Difference of Arrival- TDOA*, et plus récemment le *Time of flight-TOF*. Dans ce secteur, nous retrouvons différents vendeurs établis tels que *Zebra* et sa solution de localisation « *MotionWork* », *Sewio*, *Juniper*, ou *Ubisense*. Comme les autres technologies, l'UWB évolue. À ce titre l'organisation de standardisation allemande Omlox et l'alliance UWB ont commencé à collaborer pour la création d'une norme ouverte pour l'UWB et d'autres technologies basées sur le système de localisation en temps réel (Swedberg, 2021). Plus intéressant encore, on voit que la technologie se démocratise avec l'introduction par Samsung de téléphones équipés de cette technologie tel que reporté par Stone (2021), ouvrant la voie à la localisation de dispositifs non contrôlés.

Les technologies de détection par ultrasons (**USID-Ultrasonic Identification**) permettent une localisation intérieure fiable et d'une précision de l'ordre du centimètre, avec un rendement énergétique très intéressant qui minimise la maintenance des tags. Ces technologies sont robustes et simples à déployer. Toutefois, contrairement aux signaux à fréquences radio, la vitesse du son varie considérablement lorsque l'humidité et la température changent, affectant la performance du signal. L'ajout de dispositifs de capture des données ambiantes (thermomètre) et le recours à des algorithmes complexes de traitement du signal peuvent alors filtrer le « bruit ambiant » susceptible de dégrader la précision de la localisation. *Sonitor* est un des leaders sur le marché. L'entreprise offre désormais la possibilité de géolocaliser des dispositifs mobiles (smart phones) équipés iOS, Android ou Windows. La communication par lumière visible (**LiFi – Light Fidelity**) est une technologie émergente pour le transfert de données à grande vitesse. Les techniques de localisation basées sur la lumière visible utilisent des capteurs de lumière pour mesurer la position et la direction des émetteurs de LED. L'avantage de la localisation basée sur la lumière visible est sa grande précision. Cependant, une limitation fondamentale est que la ligne de vue entre la LED et le capteur est nécessaire pour une localisation précise. Des entreprises comme *LifiNeo* combinent la précision de localisation par *Lifi* et la communication par Bluetooth. La géolocalisation par les technologies qui fonctionnent par **ZigBee** vise les réseaux personnels à faible coût, avec une faible consommation d'énergie et un faible débit de données. Cette technologie qui a connu de meilleurs jours lors de la sortie des premiers systèmes RTLS a perdu de sa compétitivité. Les technologies **RFID actives** se déclinent sous plusieurs bandes de fréquences et souffrent ainsi de plusieurs limitations découlant de la normalisation des fréquences de fonctionnement et de la nécessité d'une infrastructure supplémentaire pour permettre la localisation. (Oguntala *et al.* 2018). Pour ce qui est de la précision de localisation, plusieurs tags RFID actifs qui fonctionnent sur différentes bandes de fréquence (ex. 433 Mhz- comme *GuardRFID*, 915 Mhz) sont offerts en mode

hybrides. Ils sont ainsi équipés de dispositifs tels que des capteurs infra rouges (IR) de capteurs de basses fréquences (aussi appelés exciteurs) ou de capteurs à ultra-sons qui permettent d'identifier instantanément un tag avec une grande précision dans une zone spécifique.

#### 4 ÉMERGENCE DES RTLS BASÉS SUR LA RFID PASSIVE

Dans le cas des RTLS qui misent sur les technologies RFID passives (tags qui ne comportent pas de batterie et sont activés par les ondes électromagnétiques émises par les antennes) la localisation des tags est possible par le recours à des antennes de type *phased array* (multi faisceaux) qui balayent une zone. Actuellement, le portfolio de lecteurs RFID passifs est composé de trois familles principales. Le cas *Impinj* (un des leaders sur marché) est très représentatif de cette évolution. Nous retrouvons des lecteurs fixes de type checkpoint (ex. portail) qui détectent la présence d'un objet tagué à la suite du passage de celui-ci lorsqu'il est dans le champ de radiation des antennes du lecteur. Nous retrouvons ensuite des lecteurs de type checkpoint+ détection de mouvement (ex. portail directionnel). Ces lecteurs sont équipés d'au moins deux antennes qui détectent (a) la présence d'un objet tagué (a) la direction de passage de l'objet tagué. Finalement, les premiers lecteurs RTLS passifs ont fait leur apparition en 2014 - dont le *xArray* de *Impinj*. Si ce lecteur offre la possibilité de géolocaliser un objet tagué avec des coordonnées précises (x, y), plus récemment, d'autres lecteurs RTLS passifs permettent d'obtenir ses coordonnées en 3D (x, y, z) comme ceux de *RF Controls (Smart Antena)*, ou de *Zebra (Zebra ART 7000)* introduit sur le marché en 2019. Dans la littérature professionnelle (magazine spécialisés), quelques cas RTLS passifs sont présentés, notamment dans le secteur de la vente au détail pour des entreprises qui ont adopté le lecteur *xArray* de *Impinj* pour le suivi de vêtements dans différentes zones du magasin. Le cas d'implantation de nouvelle génération de RTLS passif est plus rare. Swedberg (2019) documente par exemple le cas de RTV Engineering qui a collaboré avec *RF Controls* pour identifier et localiser en temps réel l'emplacement des bacs empilés sur deux rangées de racks métalliques se faisant face dans une allée. Le déploiement de cinq unités d'antenne CS-445B de *RF Controls*, à une hauteur d'environ 32 pieds a permis de couvrir une allée de 100 pieds, et y localiser l'emplacement des tags avec une précision 10 pouces. Le déploiement de ce type de systèmes RTLS passifs dans des environnements à hauts plafonds (entrepôts, usines), le fait que la couverture de zone est de plus en plus large par antenne, une alimentation POE qui facilite l'installation, une connectivité Wifi vers les serveurs, des SDK fournis pour faciliter l'intégration avec les systèmes en place, et surtout une performance accrue contribuent à susciter de l'intérêt pour ces solutions.

##### 4.1 Analyse synthèse des options de localisation en temps réel

Il existe plusieurs analyses comparatives de solutions RTLS, autant dans la littérature académique que dans la littérature professionnelle, mais peu très peu d'entre elles mentionnent les RTLS passifs. Rappelons en effet la littérature académique sur les RTLS passives est rare, incomplète ou non actualisée, et les études sur le sujet sont surtout fournies par les vendeurs de ces mêmes solutions (sous forme de *white papers*); ce qui remet en question la neutralité des résultats. En effet, sur leurs sites respectifs, chaque vendeur privilégiera sa technologie et la positionnera comme « la meilleure ». Par exemple, *Quuppa* préconise le BLE AoA développé pour des applications de géolocalisation (Quuppa, 2023). Dans l'analyse comparative

des technologies RTLS, le BLE AoA est positionné comme la technologie offre la « meilleure » précision de localisation (*Accuracy* 0.1-1m), une latence immédiate (*real time*) une faible consommation d'énergie (*tag power consumption*), etc. (p.ex. Sewio, 2020 ; Quuppa, 2023)

##### 4.2 Analyse synthèse des options RTLS

Bendavid (2016) propose une analyse synthèse des RTLS utilisés dans le secteur de la santé – mettant de l'avant l'évolution constante de ces systèmes. Pour identifier le système le plus approprié en fonction des exigences du cas, il propose un tableau de questions sur (a) les fonctionnalités désirées de la solution RTLS (b) les spécifications techniques qui en découlent (c) les exigences de projet. Parmi les paramètres qui servent de base de comparaison, on note: (i) la *couverture* : le système couvrira-t-il toute la zone? (ii) la *latence* : quelle est la réactivité du système? (iii) la *fiabilité et la précision* : si les données transmises sont-elles consistantes dans le temps (mêmes x,y,z), et la précision de localisation répond-elle aux exigences du projet? (iv) *les interférences* : perturbation par des signaux? (v) *l'évolutivité* : le système est-il capable d'absorber des charges supplémentaires? (vi) la *performance* et les capacités des tags à prendre en charge les exigences du processus prévu? (vii) *l'ergonomie* : la solution est-elle facile à installer et à utiliser? (viii) *le coût total de possession (TCO)* incluant l'infrastructure de base et les coûts de maintenance. Pour les tags actifs, bien que la durée de vie des batteries s'est améliorée, cela reste un problème important dans notre cas d'application.

Pancham (2017) qui s'intéresse aussi au RTLS dans le milieu hospitalier, adopteur précoce de ce type de technologies, met l'emphase sur la taille des tags qui peut être, dans plusieurs cas un critère pertinent – comme c'est le cas de petits équipements ou encore du personnel et des nourrissons dans les hôpitaux. Sakpere (2017) reprend plusieurs critères de sélection comme le coût, la précision de localisation ou l'évolutivité. En revanche ce dernier prend en compte les techniques de localisation utilisées (Triangulation, Trilatération, empreinte radio, etc.), ainsi que les algorithmes utilisés (*TOA, TDOA, RSSI, etc.*). Il considère aussi le critère de la sécurité qui n'est pas souvent pris en considération dans les études RTLS. Zafari (2019) reprend certains de ces critères de performance, mais se concentre surtout sur le rayon d'action étendu des solutions; ce qui l'amène à regarder des technologies comme Lora et SigFox qui sont surtout utiles en extérieur (détection et localisation de véhicules dans des stationnements, animaux dans des fermes), utilisent très peu d'énergie – réduisant ainsi la maintenance des tags. Halawa *et al.* (2020) quant à eux limitent le choix des technologies RTLS aux UWB, RFID, Wifi, et Vision. Ces derniers intègrent formellement les systèmes reconnaissance d'objets par la vision. Parmi les critères de comparaison, notons entre autres le critère de « 3D location » qui semble désormais possible avec diverses solutions. Leur analyse des technologies RFID est toutefois limitée, car ils amalgament tous les types de technologies RFID dans une méga catégorie. Finalement, Ahmed *et al.* (2020) précisent les types de technologies RFID (active vs passive) et détaillent encore plus certains critères. Ils séparent par exemple le coût de la solution en deux catégories : coûts d'installation et coûts des tags; un critère important surtout si le nombre d'articles à suivre est très important. Ils séparent aussi la consommation d'énergie (faible, moyenne, haute) de la durée de vie de la batterie. Leur analyse n'est toutefois pas à jour, car ils sous-estiment la possibilité de localisation par les dernières technologies RFID passives.

Nous remarquons que les analyses comparatives des technologies RTLS font un amalgame entre différentes technologies qui ont évoluées au cours des dernières années. Par exemple, aujourd'hui les technologies de location par Bluetooth se déclinent sous BLE *AoA*, BLE *TDOA*, BLE *RSSI*. De la même manière, pour les technologies RFID passives, les études mettent dans la même catégorie des solutions RFID de type checkpoint vs des solutions RTLS équipées d'antenne multi faisceaux. Il y a donc un besoin d'actualisation et de validation des catégories de technologies RTLS dans les revues de littérature académiques et professionnelles. À partir des analyses préalables nous proposons donc une matrice comparative actualisée des différentes technologies (Tableau 1) où nous résumons les différentes technologies utilisées dans les solutions RTLS que nous comparons en fonction de critères jugés pertinents pour notre cas.

#### 4.3 Critères clés retenus pour notre prototype RTLS passif

Parmi les critères retenus dans notre cas d'application RTLS, et qui justifient la pertinence d'une solution basée sur les technologies passives nous retenons (a) la *durée de vie des batteries*, car les moules peuvent être entreposés pendant de longues périodes avant d'être réutilisés (b) la *précision de localisation* de l'ordre d'un mètre qui est suffisante pour retracer un moule sur étagère (c) la *portée de lecture* requise de 15-20 mètres du sol (d) la localisation en 3 D pour identifier des moules sur des rangs d'étagères multi-étages (e) la *complexité d'installation* où nous voulons minimiser le câblage et la possibilité de miser sur des lecteurs RFID alimentés par POE (Power over Ethernet) avec la possibilité de relayer l'information capturée via le WIFI (f) *l'évolutivité du système* en vue de déployer dans d'autres zones et/ou articles à localiser (g) *le coût total* de la solution incluant les coûts d'acquisition, d'installation et les coûts de maintenance- dans quel cas, les solutions RFID-RTLS passives se démarquent par des tags à faibles coûts et entretien nul. Par ailleurs, les possibilités offertes par les nouveaux lecteurs RTLS installés dans les hauts plafonds permettent de couvrir de grandes surfaces (30-40 mètres de diamètre par lecteur), minimisant ainsi le nombre de lecteurs à déployer.

## 5 MÉTHODOLOGIES DE LA RECHERCHE

Dans le cadre de cette recherche, nous avons adopté la méthodologie du « Design Science » utilisée dans le cadre des projets en système d'information, orientés sur la résolution de problèmes pratiques par le design et le développement d'un artefact. Cette méthode propose plusieurs étapes présentées à la Figure 3 (Peffer et al., 2007).

Compte tenu de la portée du projet pilote, nous avons limité la démarche aux quatre premières étapes de la méthodologie. L'identification de la problématique et la définition des objectifs de notre solution ayant été présentées en amont de cet article, les prochaines sections porteront sur la conception de l'artefact et enfin la démonstration de la solution.

## 6 DESIGN DE LA SOLUTION RTLS

Lors de la conception-design et développement de la solution de localisation (phase 2 et 3) il s'agissait d'abord de déterminer les fonctionnalités souhaitées du système RTLS : (a) s'authentifier (b) créer-modifier un article (c) localiser un article (d) actualiser la localisation d'un article (e) afficher la localisation. Cela implique de calculer l'emplacement d'un article (x,y,z) et de convertir ces données spatiales en données utiles pour les employés (rangée, étage).

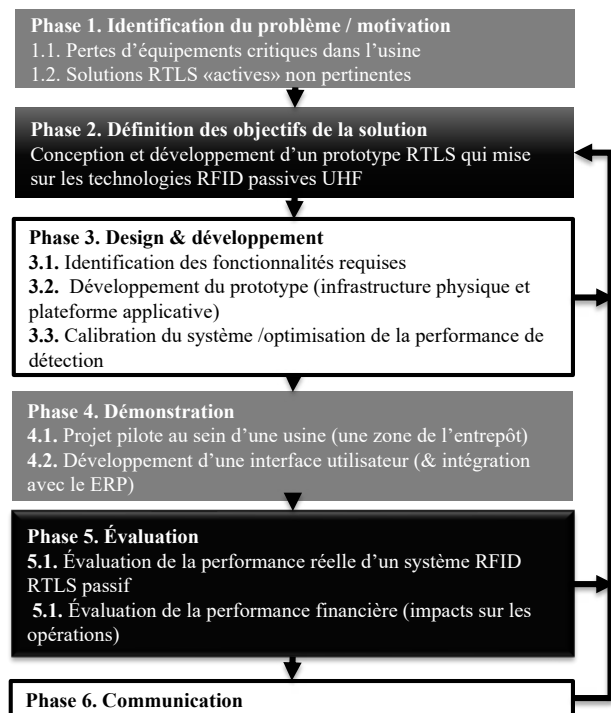


Figure 3. Approche de recherche

### 6.1 Infrastructure RTLS

L'infrastructure IoT (Figure 1) qui a permis de réaliser le prototype RTLS est d'abord composée d'une infrastructure physique de capture des données qui mise sur le lecteur *ATR 7000* de Zebra équipé d'antennes multifaisceaux RF qui couvre une zone à 360 degrés, spécifiquement conçus pour les applications de géolocalisation. Étant donné l'infrastructure Zebra déjà installée dans l'usine focale, et la familiarité des employés avec les produits de cette entreprise, nous avons opté pour l'*ATR 7000* (vs le lecteur de *RF Controls* tout aussi performant). Pour l'identification des caisses et moules, divers tags ont été testés. Pour les caisses, nous avons retenu le modèle *ZBR4000* de Zebra et le *M-Crown* (on-metal tag) de Tag Factory pour les moules (Figure 4).



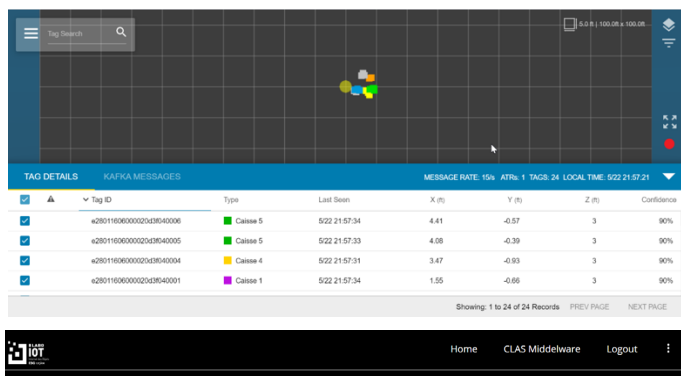
Figure 4. Divers tags testés sur moules/boîtes

Une fois les données capturées, elles sont transférées via réseau de communication local LAN. L'hébergement des données se fait sur une base de données SQL pour sauvegarder le dernier emplacement de chaque équipement et les différentes entités de notre solution (SGBD *SQLight* inclut dans l'environnement *Django* pour le prototype vs *MySQL* ou *PostgreSQL* plus robustes pour un déploiement). Pour l'infrastructure logicielle/couche applicative, l'exploitation des kits de développements (Software) proposés par le fournisseur a permis de capturer les données et de les visualiser.

**Tableau 1. Analyse comparative actualisée des RTLS**

	RFID passif UHF		RFID actif	UWB	BLE (RSSI)	BLE (AoA, TdoA)	WIFI	Ultrasons (USID)	Lumière (LiFi)
	RTLS	Check-point							
Consommation d'énergie	Nul (tag passif)		Haute	Très Haute	Faible	Faible	Haute	Faible	Faible
Durée de vie des batteries	Illimité (pas de batteries)		3 – 5 ans	< 2 ans	2-5 ans	2-5 ans	< 3 ans	< 2 ans	Faible
Précision	Moins de 1 m	Zone	1 m	< 30 cm	2 m – 3 m	<1m	~ 3 m	< 20cm	< 30 cm
Latence	Immédiate		Beacon x secondes					Immédiat	
Portée de lecture / couverture de zone	Jusqu'à 25 m (omni directionnel)	12-15 m	Jusqu'à 600 m	Jusqu'à 300 m	Jusqu'à 100 m	20 m	Jusqu'à 100 m	Jusqu'à 100 m	Max 15-20 mètres
Localisation 3D	2D & 3D précise (+ deux antennes)	Non	Précise	Précise	Non	Pas précise	Pas précise	Précise	Non
Complexité d'installation	Faible-Moyenne (lecteurs PoE)	Faible	Haute	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne (infrastructure complémentaire requise)	Moyenne	Faible
Évolutivité	Simple	Simple	Moyenne	Moyenne	Simple	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Simple
Coût total (TCO)	\$ Infra.		\$\$\$ Infra.	\$\$\$ Infra.	\$ Infra.	\$ Infra.	\$ Infra.	\$ Infra.	\$ Infra.
	\$ Opérations		\$ Op.	\$ Op.	\$ Op.	\$ Op.	\$ Op.	\$ Op.	\$ Op.
Meilleurs avantages	Pas de maintenance sur les tags, hauteur de l'installation des lecteurs		Précision possible, largement déployée, sécurité	Haute précision	Standard établi, largement déployé	Haute précision de localisation. Standard établi	Standard établi, largement déployé	Haute précision, robustesse	Précision de localisation, sécurité
Limites importantes	Portée limitée	Manque de précision, interférences	\$\$\$ - multistandard	Interférences (métal)	Interférences, faible précision	Interférences	Interférences, faible précision	Interférences,	Ligne de visée requise. Pas de standards
	Ne passe pas à travers les murs, interférences								

Nous avons d'abord utilisé le middleware CLAS (*Configuration & Location Analytics Software*) fourni par le fournisseur Zebra sous License, et hébergée sur une machine virtuelle Linux (avec système d'exploitation Ubuntu) sur un serveur local. Ce logiciel permet de gérer les lecteurs et interpréter les données recueillies par celui-ci et visualiser la localisation des tags sur le plancher. Nous avons ensuite développé une application RTLS (*back end*) avec le langage de programmation Python afin de récupérer les données brutes provenant de CLAS (coordonnées x, y, z) afin de les convertir en informations plus compréhensible et intuitive pour les utilisateurs finaux (c.-à-d., convertis en code emplacement). Une interface web (*front end*) développée avec les langages web (HTML et CSS) a enfin permis de visualiser les données fournies par la couche application (Figure 5).

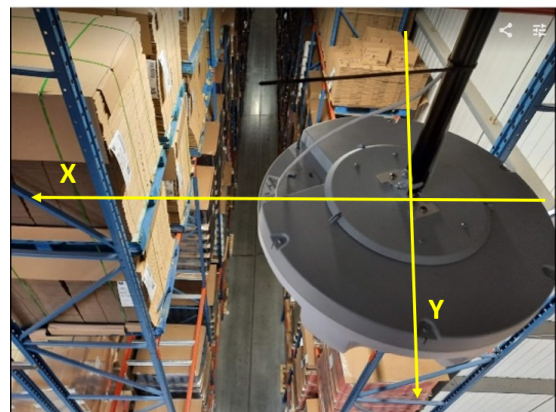


**Figure 5. Interface CLAS et logiciel RTLS**

### 6.2 Test du prototype RTLS

Pour tester notre prototype de solution, nous avons conduit un

projet pilote au sein de l'entrepôt de l'entreprise focale. (Figure 6).



**Figure 6. Installation du lecteur RTLS passif**

Une zone spécifique de l'entrepôt où les équipements sont entreposés a été sélectionnée pour y installer le lecteur ATR7000. Ce dernier a été fixé au plafond afin de couvrir toute la zone et localiser les équipements tagués. Nous avons alors pu tester tous les paramètres de performance, comme (a) la distance de lecture (b) la fiabilité de lecture (c) la précision de localisation (d) la localisation en 3D.

## 7 RÉSULTATS ET CONCLUSION

Le projet pilote a permis de déterminer que la portée de ce lecteur passif RTLS pouvait atteindre une distance réelle supérieure à 20 mètres de rayon (au-delà des spécifications du vendeur) – suggérant que la portée d'un lecteur pourrait couvrir 40 de circonférence sur un espace ouvert (avec un lecteur à 15m du sol). Pour ce qui est de la précision de localisation, nous avons constaté que les coordonnées absolues renvoyées par le middleware CLAS ne reflétaient pas la réalité. Toutefois, la position relative renvoyée d'un tag par rapport au lecteur et des autres tags était toujours correcte. La valeur renvoyée était stable et ne changeait pas à chaque lecture – assurant ainsi une fiabilité du système. Cela nous a permis d'obtenir un emplacement assez précis des moules dans notre portail RTLS, en identifiant clairement une colonne d'emplacement, mais sans pouvoir avoir fournir l'étage. En fait, le fait d'avoir uniquement un seul lecteur a limité les performances de localisation possibles (vs combinaison de deux lecteurs, tel que préconisé par le fournisseur). Cette tactique aurait aussi permis d'obtenir une meilleure couverture et détecter les moules dans les angles morts constatés durant notre projet pilote. Toutefois, les limites budgétaires du projet, et le manque de disponibilité de tels lecteurs sur ce marché (encore nouveaux), ne nous ont pas permis d'obtenir un deuxième lecteur dans les temps. La poursuite de cette recherche pourrait justement être explorée dans une phase subséquente du projet.

Somme toute, nous avons démontré que notre artefact apportait une solution à notre problématique de départ. La prochaine étape vise à élaborer la phase 5 de la méthodologie par une évaluation de la solution par les utilisateurs (commis à l'entrepôt) et l'identification de lacunes/améliorations possibles. Une autre limite à notre projet d'avoir limité le suivi des moules au plancher d'entreposage et des étagères. Il serait certainement utile de compléter la visibilité en temps réel de ces moules par leur suivi sur les machines et l'association d'un actif à une ressource (p. ex. avec une application de type *track & match*). Finalement, sur le plan applicatif, l'intégration automatisée des données de localisations à l'ERP permettra de rendre plus efficace le processus de recherche de moules en éliminant la tâche de recherche dans notre application RTLS.

Sur le plan processuel, la solution mise en place permet d'automatiser la recherche manuelle des moules et de considérablement réduire les temps de recherches. En effet, une opération qui prenait auparavant une moyenne de huit heures (voir quelques jours) a été réalisée en moins de 15 minutes. Sachant que le coût d'un arrêt de production est estimé à environ 5000\$ par heure, cela implique que chaque emplacement mal noté peut engendrer des coûts pouvant aller jusqu'à 40 000\$. Ainsi, grâce à la solution mise en place, et malgré la précision relative (au niveau du numéro de l'étagère), le fait qu'elle réduit la recherche à une seule colonne, cela réduit le temps de recherche au maximum 15 min. Plus intéressant encore, notre solution permet de résoudre des problèmes comme dans le cas d'un rangement de moule dans une caisse qui ne lui est pas affectée. Cet équipement

«introuvable» à moins d'ouvrir toutes les caisses peut forcer l'entreprise à réusinier un nouveau moule dont le prix d'usinage est estimé à environ 85 000 \$. Le fait d'avoir des tags, autant sur les caisses que directement sur les moules permet ainsi de détecter automatiquement la localisation des caisses et des moules (dont on peut lire les tags à travers les caisses en bois). Par contre, pour savoir si un moule a été transféré vers un autre entrepôt, cela nécessitera que la solution soit déployée dans tous les entrepôts ou à minima dans les entrées/sorties des entrepôts.

Ce projet de collaboration industrie-université s'inscrit donc dans une tendance très marquée de la transformation numérique des entreprises québécoises, et à l'adoption encore très limitée de solution RTLS. Il offre un éclairage complémentaire et actualisé à la littérature sur les RTLS.

## 8 RÉFÉRENCES

- Affogbolo, R., Gauzente, C., Kuntz, P. & Guénoche A. (2020). Pros and Cons of IoT Use: What can they tell us with respect to Business Model Change? *SIM*, 25 (4), 2020.
- Ahmed, F. Phillips, M. Phillips, S. & Kim, K. (2020). Comparative Study of Seamless Asset Location and Tracking Technologies. *Procedia Manufacturing*, 51, 1138-1145.
- Behrendt A., de Boer, E., Kasah, T., Koerber, B. & Mohr N. (2021). A manufacturer's guide to scaling Industrial IoT Feb. 05 2021. <https://www.mckinsey.com/>
- Benessaïeh, K. (2020, 05 septembre). Secteur manufacturier : le Québec sait-il encore fabriquer ? *La presse*. <https://www.lapresse.ca>
- Bendavid, Y. (2016). Selecting the Right RTLS in Hospitals. *The Encyclopedia of E-Commerce Development, Implementation, and Management*, 3, 1884-1899.
- Bendavid, Y., Hachani, M. & Rostampour, S. (2022). Design et développement d'un prototype de magasin connecté pour les petites entreprises. *Marché et Organisations*, 45, 49 80.
- Bendavid, Y. & Rostampour, S. (2021). RTLS in 2021: Where Do We Stand? RFID and IoT in Logistics/Operations, [RFID Journal digital Summit](https://www.rfidjournal.com/), May 12, 2021.
- Casella, G., Bigliardi, B. & Bottani, E. (2022). The evolution of RFID technology in the logistics field: a review, *Procedia Computer Science*, 200, 2022, 1582-1592.
- Commission européenne (2021). Industry 5.0 - Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry. <https://op.europa.eu>
- Couture, L. et Clarke, S. (2017). Croissance réelle du secteur canadien de la fabrication depuis 2000. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/11-626-x/11-626-x2017074-fra.htm>
- Garms, F., Jansen, C., Schmitz, C., Hallerstede, S. Tschiesner, A. (2019). Industry 4.0 Capturing value at scale in discrete manufacturing. *Mc Kinsey report*, September 13.: <https://www.mckinsey.com>
- Ghadge, K. Achar, T. Bhatt, A. Gurumoorthy, B. & Chakrabarti, B. (2020). Indoor positioning of metal parts by fingerprinting using passive RFID. *Procedia CIRP*, 88, 60-63.
- Halawa, F. Dauod, H. Lee, G., Li, Y. Yoon, S. & Chung, S. (2020). Introduction of a real time location system to enhance the warehouse safety and operational efficiency. *International Journal of Production Economics*, 224, 107541.
- ISQ - Institut de la statistique du Québec (2013). Portrait statistique du secteur manufacturier au Québec Édition 2013. Récupéré de <https://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/secteur-manufacturier/manuf-portrait.pdf>
- Jiang, Z., Guo, Y., & Wang, Z. (2021). Digital twin to



improve the virtual-real integration of industrial IoT. *Journal of Industrial Information Integration*, 22, 100196.

Katoch R. (2002). IoT research in supply chain management and logistics: A bibliometric analysis using vosviewer software, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 56, Part 5, 2022, P. 2505-2515

Liu, M., Fang, S., Dong, H., & Xu, C. (2020). Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 346–361.

MEI - ministère de l'Économie et de l'Innovation (2020). Plan d'action en économie numérique. <https://www.quebec.ca/gouvernement/ministere/economie/publications>

Newman-Casey, P.A. Musser, J. Niziol, L. Shedden, K. Burke, D. Cohn, A. (2020). Designing and validating a low-cost real time locating system to continuously assess patient wait times. *Journal of Biomedical Informatics*, 106.

Oguntala, G. Abd-Alhameed R. Jones, S. Noras, J. Patwary M. & Rodriguez, J. (2018). Indoor location identification technologies for real-time IoT-based applications: An inclusive survey. *Computer Science Review*, 30, 55-79.

Pancham, J. Millham R. et Fong, S. (2017). Evaluation of Real Time Location System technologies in the health care sector. *17th International Conference on Computational Science and Its Applications (ICCSA)*, Trieste, 2017, 1-7.

Peffer, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M.A. & Chatterjee, S. (2007). A design science research methodology for information systems research. *Journal of Management Information Systems*, 24(3), 45–77.

Quuppa (2023). How to compare different RTLS technologies? <https://www.quuppa.com/overview/>

Sakpere, W. Adeyeye-Oshin, M. & Mlitwa, N. (2017). A

state-of-the-art survey of indoor positioning and navigation systems and technologies. *South African Computer Journal*, 29 (3), p145-196.

Schaeffer E. (2017). Industry X.0. Realizing Digital Value in Industrial Sectors, Kogan Page; 1st edition (May 30 2017)

Sewio (2020). RTLS Technology Comparison. <https://www.sewio.net>

STIQ (2022). Baromètre industriel Québécois. 13<sup>e</sup> édition. <https://www.stiq.com/>

Stone, M. (2021). What is ultra-wideband, and how does it work? <https://insights.samsung.com>

Swedberg C. (2019). Pilot Aims to Prove Passive RTLS Success for Manufacturing Site. *RFID Journal* <https://www.rfidjournal.com>

Swedberg C. (2021). BLE Uses Phase Finding for Affordable RTLS Applications. *RFID Journal* <https://www.rfidjournal.com/>

Utterback J. M. (1996). Mastering the Dynamics of Innovation. Harvard Business Review Press; 2nd edition (October 1, 1996), 288 pages

Wang, J. Lim, M.K., Wang, C. & Tseng, M-L (2021). The evolution of the Internet of Things (IoT) over the past 20 years, *Computers & Industrial Engineering*, 155, 2021, 107174

Zafari, F. Gkelias, A. & Leung, K. K. (2019). A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(3), 2568-2599, doi : 10.1109/COMST.2019.2911558.

Zimmerman T., A Zimmermann (2022). Gartner, Magic Quadrant for Indoor Location Services, Gartner report, 23 February 2022. Récupéré de <https://www.gartner.com/>