

Navigation pédestre: réponses technologiques face aux enjeux de la mobilité piétonne sécurisée



Journée Scientifique GIS ITS Bretagne

Pierre-Yves Gilliéron
Ecole Polytechnique
Fédérale de Lausanne
Laboratoire de Topométrie

11 juin 2008



Sommaire

- Déplacements pédestres
- Exigences de navigation
 - Pompiers
 - Personnes malvoyantes
- Concept de Navigation
- Réponses technologiques
 - MEMS
 - Architecture distribuée
 - Architecture « capteur au pied »
 - Couplage MEMS+UWB
 - MEMS + tags RFID
 - MEMS + carte
- Bilan et perspectives



Déplacements Pédestres

- Un statut ambigu

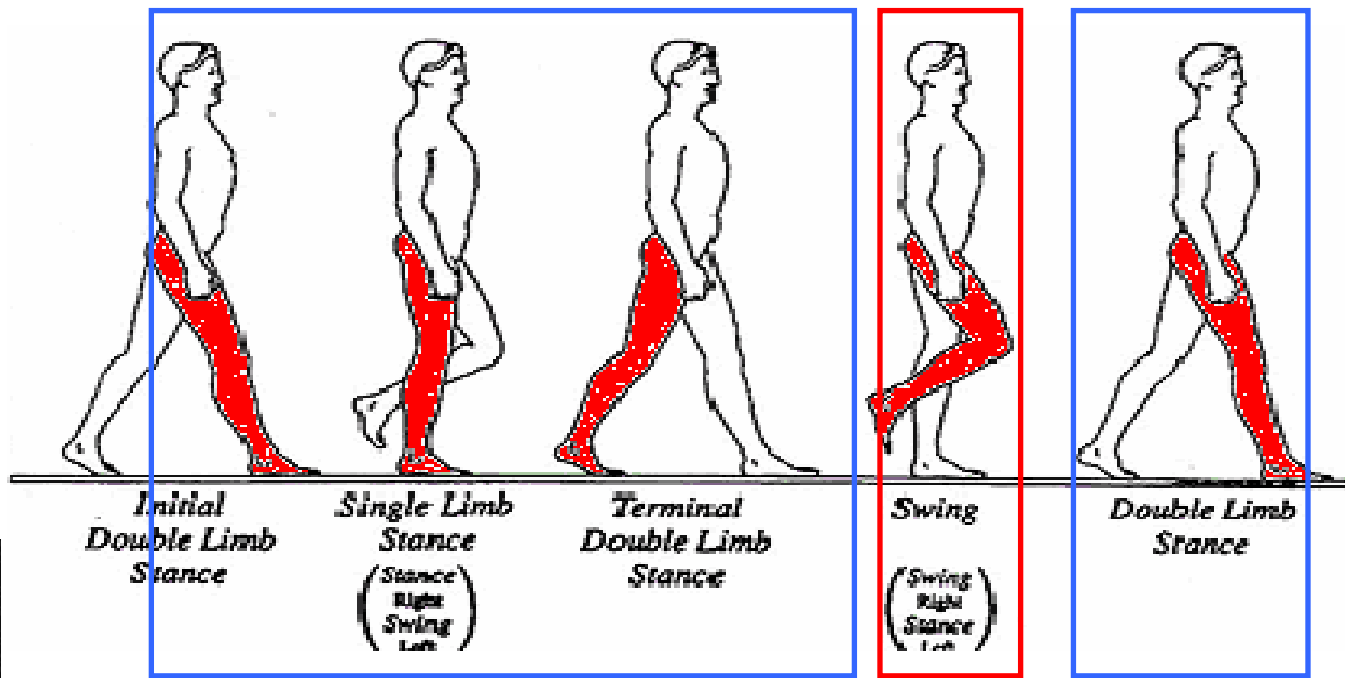
- Dimension essentielle dans la mobilité des personnes, mais enjeu secondaire dans l'organisation des déplacements
- Le piéton est vulnérable et l'accès aux espaces publics reste problématique pour les handicapés

Les choses changent...lentement

- Les initiatives de mobilité durable se multiplie et la notion de mobilité douce devient une réalité

Déplacements Pédestres

- **Caractéristiques de la marche**
 - Elle n'a **rien de technique**
 - C'est un moyen de déplacement **simple**
 - Elle permet une grande **souplesse** de déplacement
 - Elle est associée à de **multiples activités**
 - Elle est liée à une expérience **multisensorielle**
 - Elle résulte de l'influence des **forces physiques**
- **Questions**
 - **Place** de la technologie vs simplicité ?
 - **Rôle** de la technologie vs capacité du piéton ?



Phase de 'Stance'

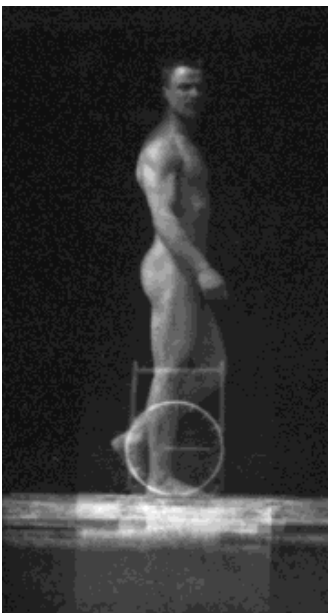
Phase de 'Swing'

Détection d'un pas

Calcul longueur du pas

Détermination azimut

Correction azimut/capteurs



Déplacements Pédestres

- Catégories

- Personnes

- Professionnels, handicapés, sportifs,...

- Situations

- Contexte de déplacement, connaissance du terrain, minutage du déplacement, confort, sécurité, insertion du trajet piéton dans un déplacement

- Environnements

- Type de zone, état de l'espace public, caractéristiques physiques,...

Déplacements Pédestres



Utilisateur
déficient visuel



Utilisateur à
déficience motrice



...

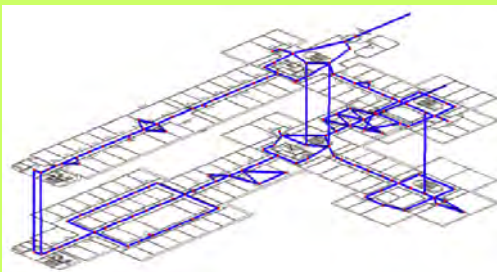


Utilisateur
pompier



← Exigences
spécifiques

← Exigences de
base



Minimum commun à tous
les utilisateurs

Domaine Mobilité Sécurisée

Exigences de Navigation

- **Pompiers**

- Environnement

- Zone (urbaine) restreinte
- Construit, intérieur
- Plusieurs niveaux
- Perturbé et dégradé

- Situation

- Urgence
- Terrain/bâtiment pas connus a priori
- Déplacement en équipe et liaison avec un chef
- Déplacements relativement courts (50-200m)
- Orientation par rapport au bâtiment
- Localisation relative des membres de l'équipe



Exigences de Navigation

Pompiers: fonctions principales « Fil d'Ariane »

- Localiser une équipe dans un bâtiment/pièce
- Déterminer la posture d'une personne
- Guider la personne vers une sortie
- Se déplacer dans un environnement sans visibilité

Performances attendues

- Précision
 - Horizontal: 1 à 3m (largeur d'un couloir) , fréquence 1Hz
 - Vertical: Identification de l'étage
- Intégrité
 - Haute: typique des applications d'urgence et secours
 - Une posture immobile après 30s déclenche une alarme
 - Système autonome de navigation, indépendant d'une infrastructure

Exigences de Navigation

- Personnes malvoyantes

- Environnement

- Urbain, grands complexes (bâtiments, transports)
- Multimodal (transports publics)
- Sensoriel (bruit, odeurs, température)
- Sécurisé ou dangereux

- Situation

- Parcours connus, effectués quotidiennement
- Exploration de nouvelles zones
- Apprentissage, ergothérapie
- Degré de handicap et capacité de locomotion très variables



Exigences de Navigation

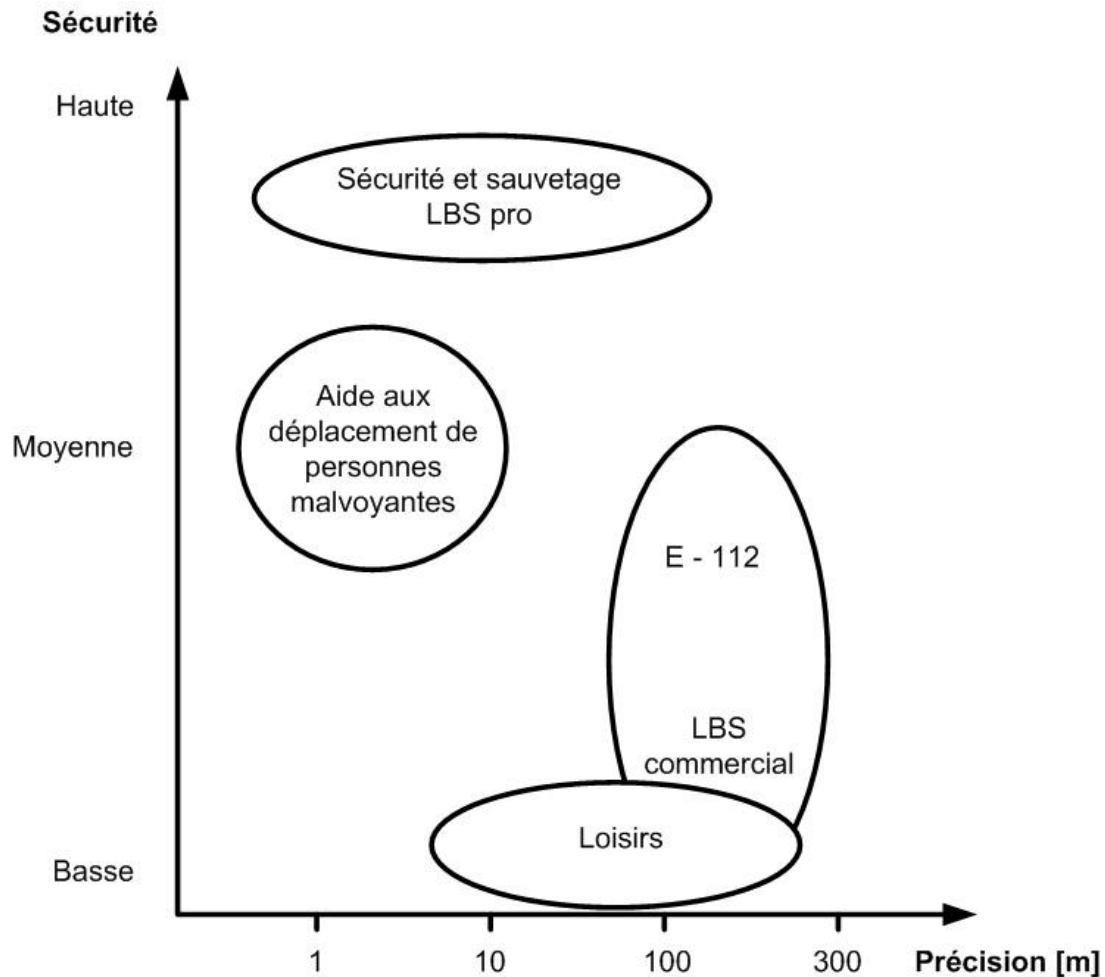
Personnes malvoyantes: fonctions principales « Guide virtuel »

- Se localiser par rapport à des points d'intérêt ou de décision
- Découvrir/apprendre un nouvel itinéraire
- S'orienter dans un grand espace (hall de gare)
- Localiser les dangers principaux

Performances attendues

- Précision
 - Horizontal: variable suivant les situations
 - 1 à 3m (largeur d'un trottoir), fréquence: variable
 - Orientation:
 - Guidage durant le trajet: qq degrés
 - Personne à l'arrêt: 20 degrés (localiser un POI dans une certaine direction)
- Intégrité
 - **Moyenne**: typique des applications d'aide à la navigation
 - Le système de navigation vient en **appui aux méthodes classiques** d'aide à la locomotion (canne, bande rugueuse, écholocation,...)

Exigences de Navigation



Concept de navigation

- Besoins pour une localisation sécurisée
 - Réponse technologique adaptée face aux exigences du domaine d'applications
 - Haut degré d'hybridation des capteurs de localisation absolue (GNSS) et relative (MEMS, RFID, UWB)
 - Association à un contenu cartographique adapté et certifié pour le domaine d'application
 - Intégration dans un service géolocalisé robuste
- **But:** rassembler les outils, les algorithmes et les données de base et associer des services
 - **Terminal de navigation (LBS)**

Localisation absolue

GPS Galileo EGNOS

GNSS

BD

Map Matching

Localisation relative

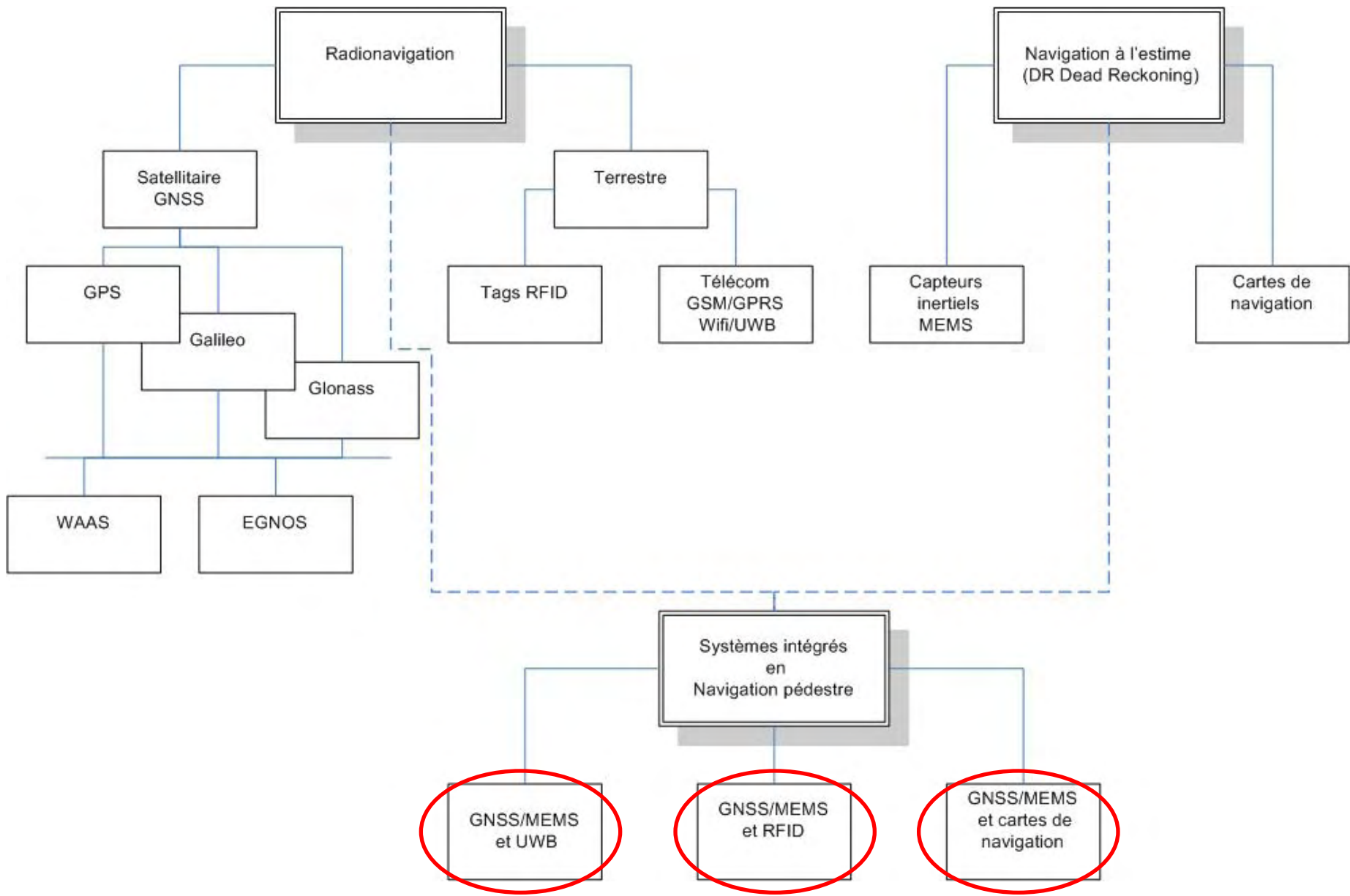
Capteurs MEMS
Tags RFID
WiFi, UWB, ...

LPS

Localisation augmentée

LBS - Service à valeur ajoutée basé sur la localisation

Terminal de navigation

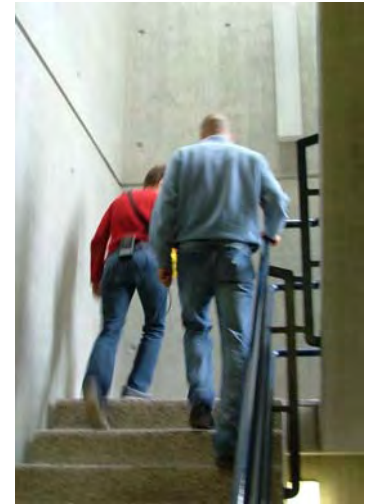


Réponses Technologiques

Navigation à l'intérieur de bâtiments

MEMS (Navigation à l'estime) +

- **Tags RFID**
 - Localisation “point à point”
- **Radio-localisation: UWB**
 - Localisation dans un espace circonscrit
- **Carte: Map-Matching**
 - Utilisation de la géométrie et topologie
 - Caractérisation de certaines zones (dangers)

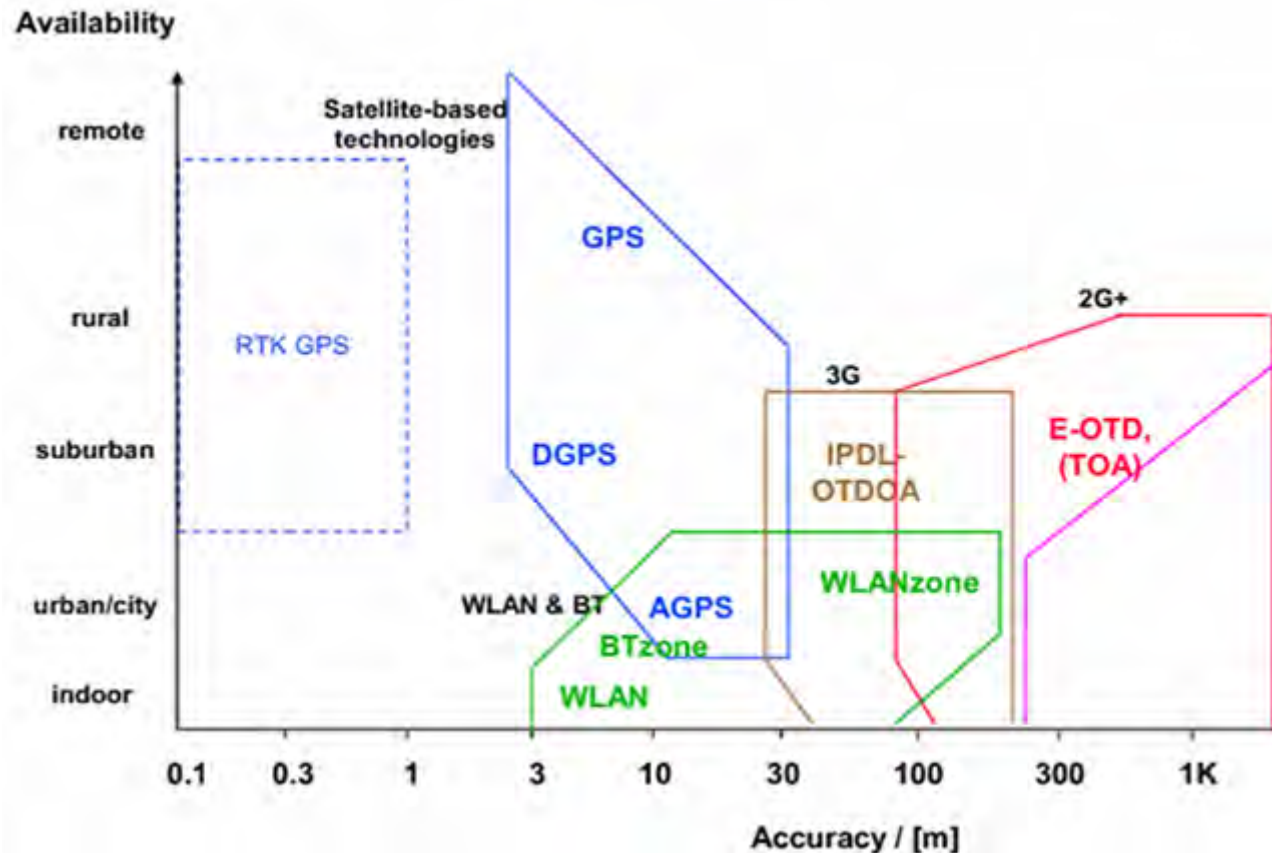


Comparaison des méthodes de localisation utilisée en indoor

- Technologie
- Méthode
- Précision
- Avantages
- Limites

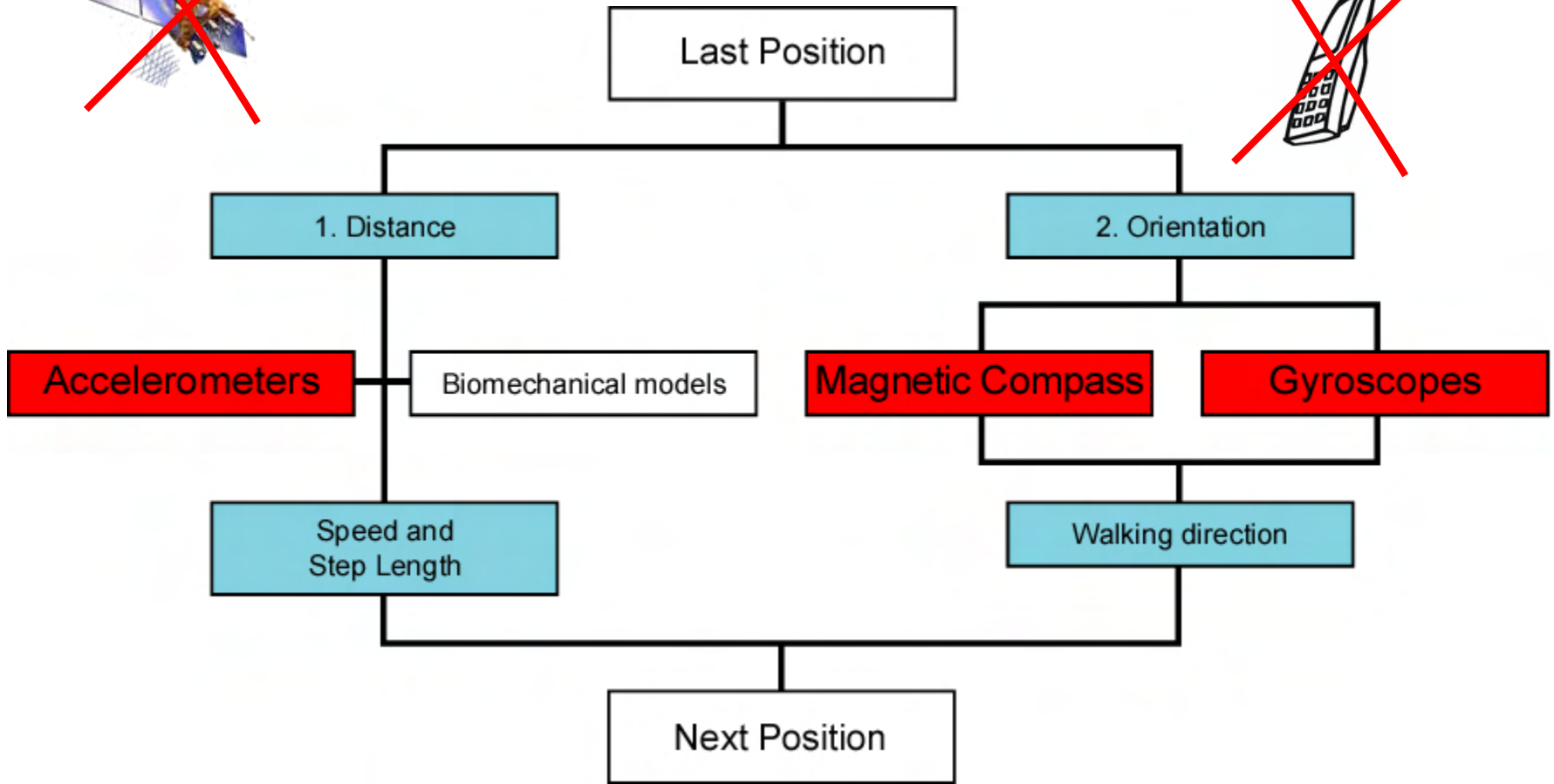
Technology	Processing	Accuracy	Advantages	Limitations	Network based	Independent
RFID Bluetooth	Cell identity	Relative to the cell size (10 - 20 m)	Simple and compatible with existing handset	Number and size of the cells	✓	
WiFi	AOA	up to 100 m	2 AP provide a position	<ul style="list-style-type: none"> - Multipath - Range to the AP - AP antenna quality 	✓	
	TOA	1 - 50 m	High accuracy	<ul style="list-style-type: none"> - Multipath - Clock offset between handset and AP 	✓	
	TDOA	1 - 50 m	<ul style="list-style-type: none"> - High accuracy - No clock offset 	<ul style="list-style-type: none"> - Multipath - Network synchronisation 	✓	
	RSS	Propagation modelling: ~ 10m Fingerprinting: 1-5 m	<ul style="list-style-type: none"> - High accuracy - Compatible with existing hardware 	Creation of RSS database or propagation models	✓	
UWB	AOA	Few decimetres	Only 2 AP provide already a position	<ul style="list-style-type: none"> - Range to the AP - AP antenna quality 	✓	
	TDOA	Few decimetres	High accuracy	<ul style="list-style-type: none"> - Low emission power - High AP density 	✓	
A-GNSS	Network assisted ranging	up 5 m	Improved time to first fix (TTFF) and signal tracking sensitivity.	<ul style="list-style-type: none"> - Multipath - Not working in deep indoor 	✓	✓
MEMS	Dead reckoning	5% of travelled distance	<ul style="list-style-type: none"> - Autonomous system - Position always available 	Large errors (drift and bias) typical of these sensors affect the accuracy		✓

Réponses Technologiques



Systèmes de radiolocalisation: précision vs environnement et disponibilité
 Systèmes dépendants d'une infrastructure

Réponses Technologiques

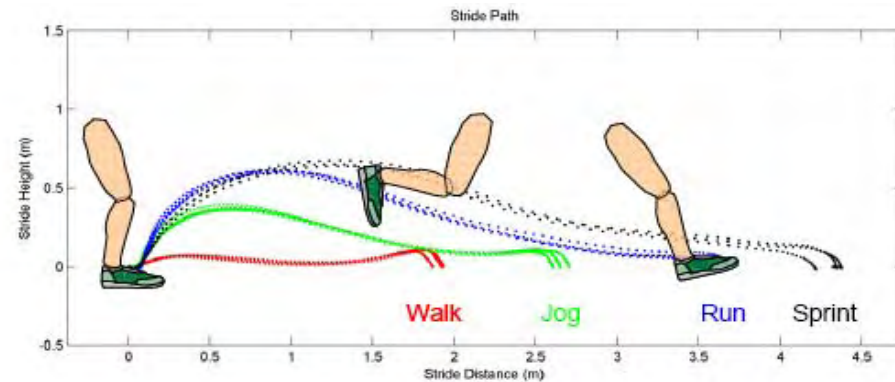
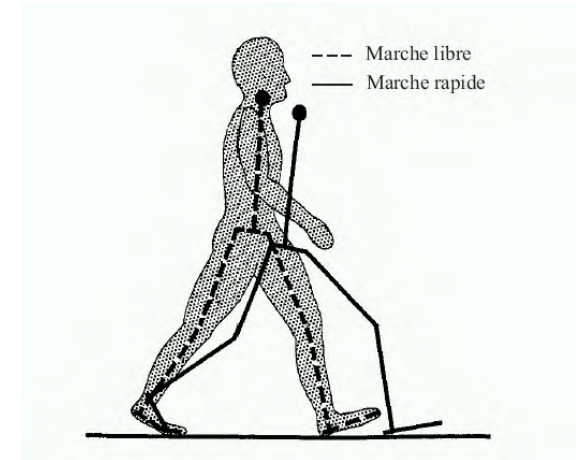


Systèmes capteurs MEMS: navigation à l'estime (DR – Dead Reckoning)
 Systèmes indépendants d'une infrastructure

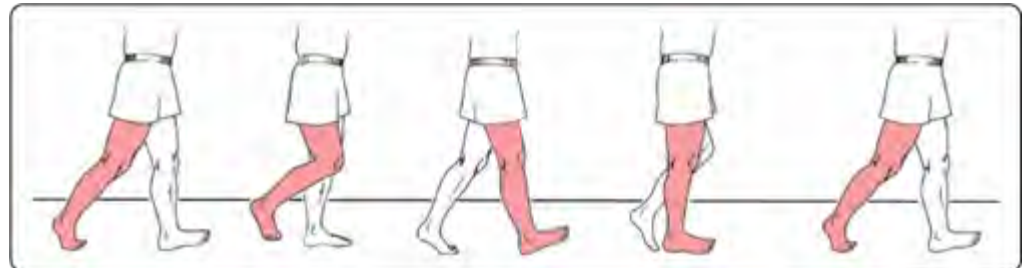
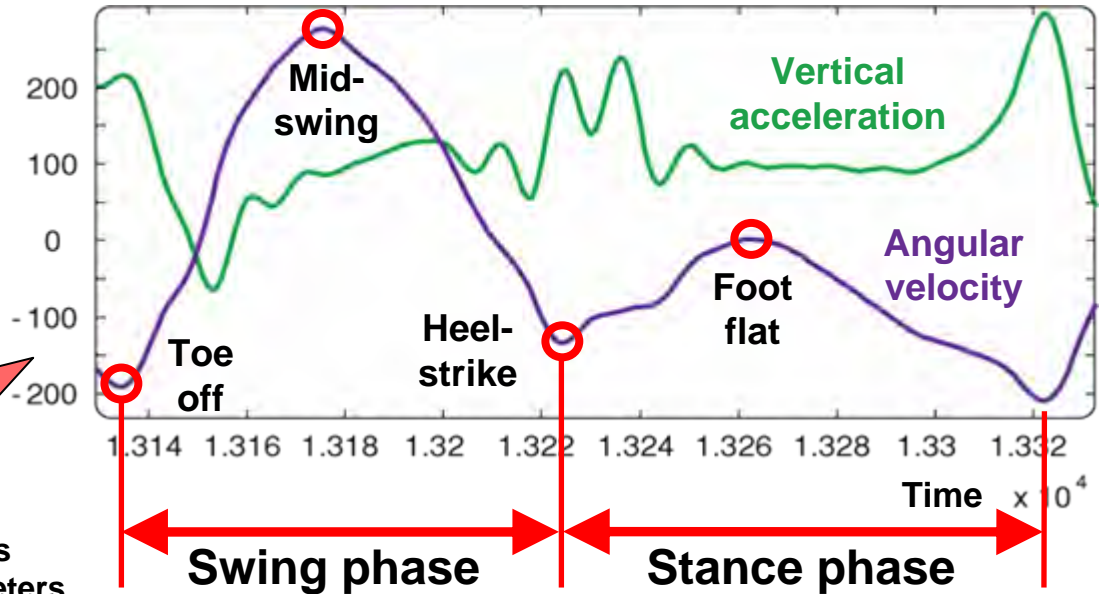
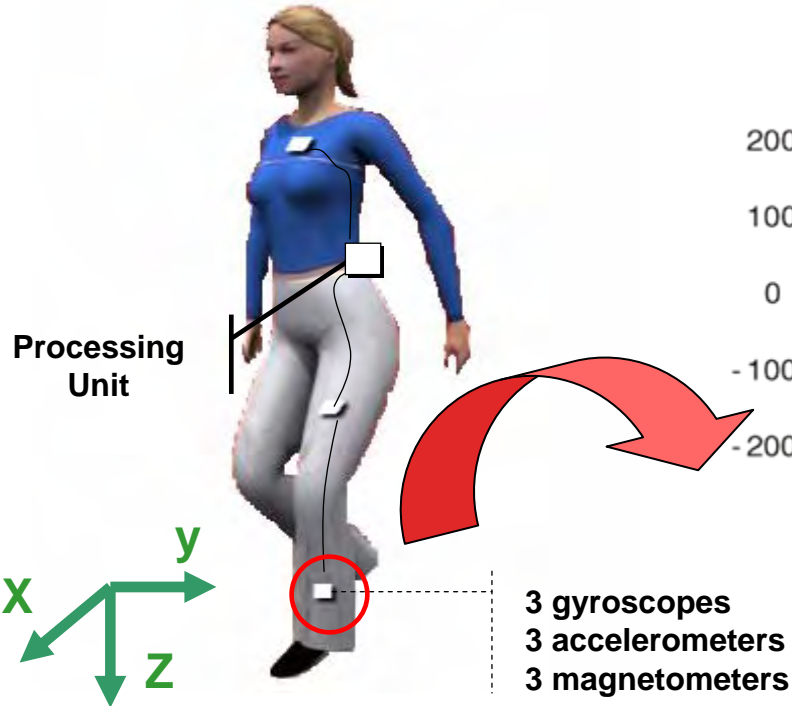
MEMS: Principe

Principe

- Typologie de la marche
- La gravité induit des mouvements spécifiques
- Identification des forces principales
- Architecture matérielle: MEMS
 - Mono capteur ou distribuée
 - Accéléromètres
 - capteurs magnétiques
 - gyromètres
- Approche
 - Directe ou indirecte
 - Distance parcourue
 - Orientation du trajet
 - Détection de postures particulières



MEMS: Architecture distribuée

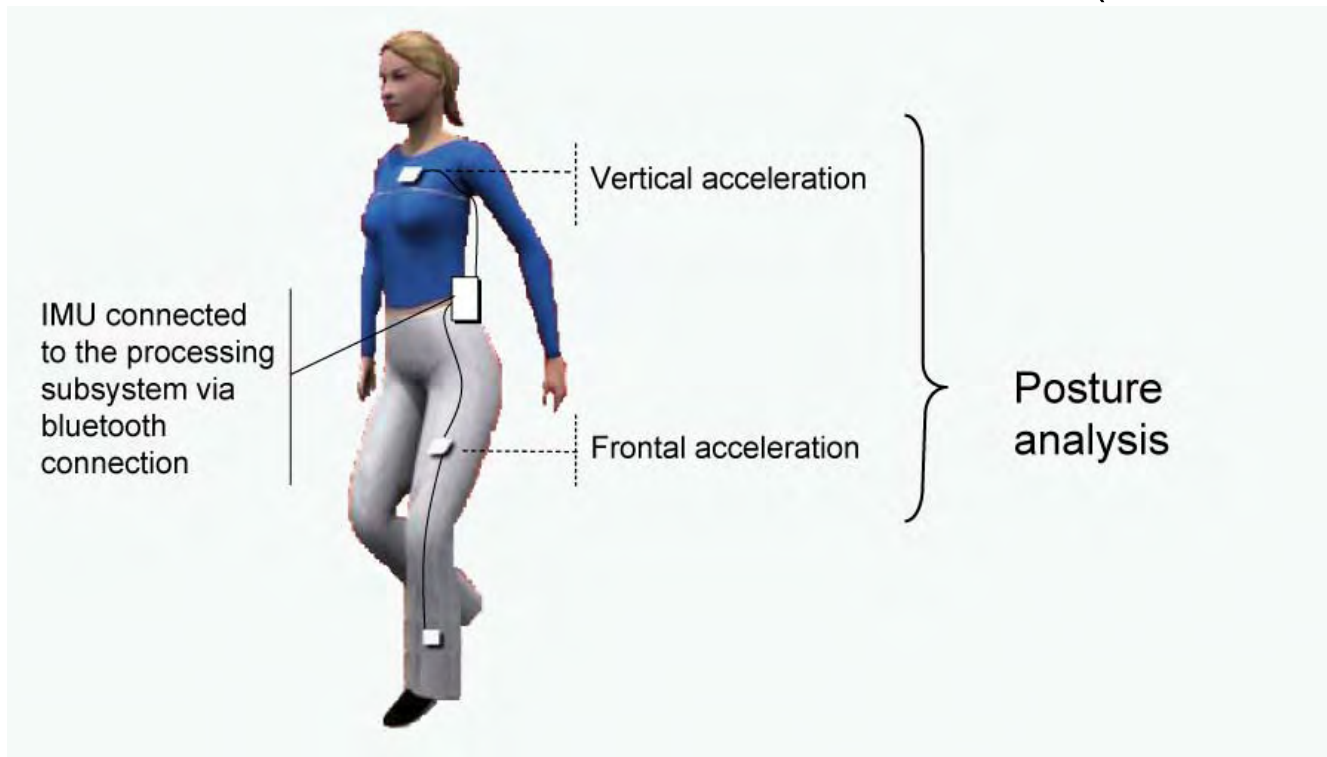


Erreur de détection
inférieure à 1 %

Approche développée à l'EPFL dans le
cadre du projet EU – FP6 - LIAISON

MEMS: Architecture distribuée

- Analyse de la posture
 - Approche distribuée
 - Debout, assis, couché
- Aspects sécuritaire pour le pompier
 - Déclenchement d'une alarme en cas de posture immobile (couché, assis)



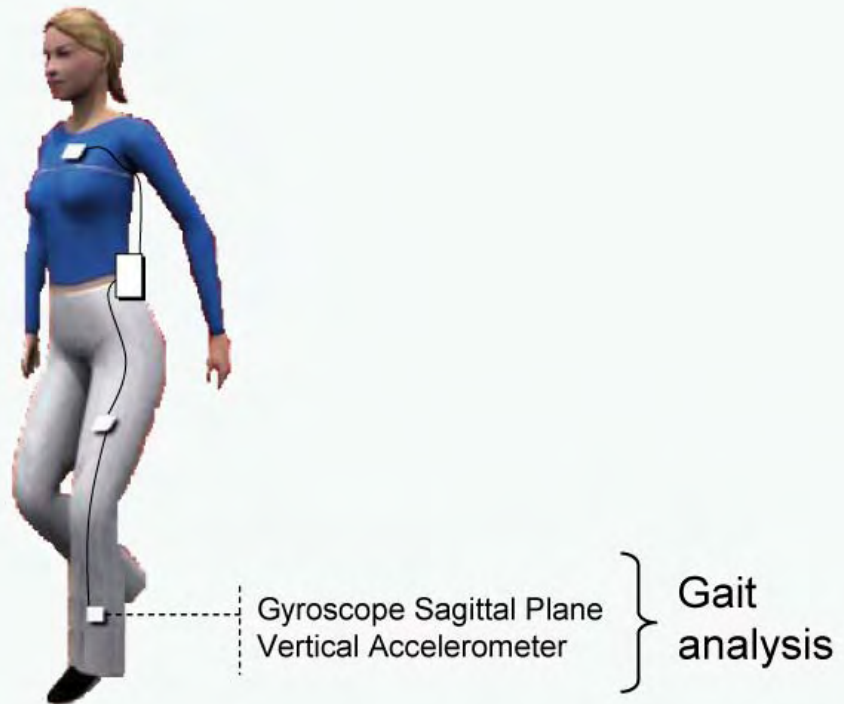
MEMS: Architecture distribuée

- **Analyse de l'allure**

- Classification par logique floue
- Marche en avant, montée d'escaliers, descente d'escaliers (en avant ou à reculons)

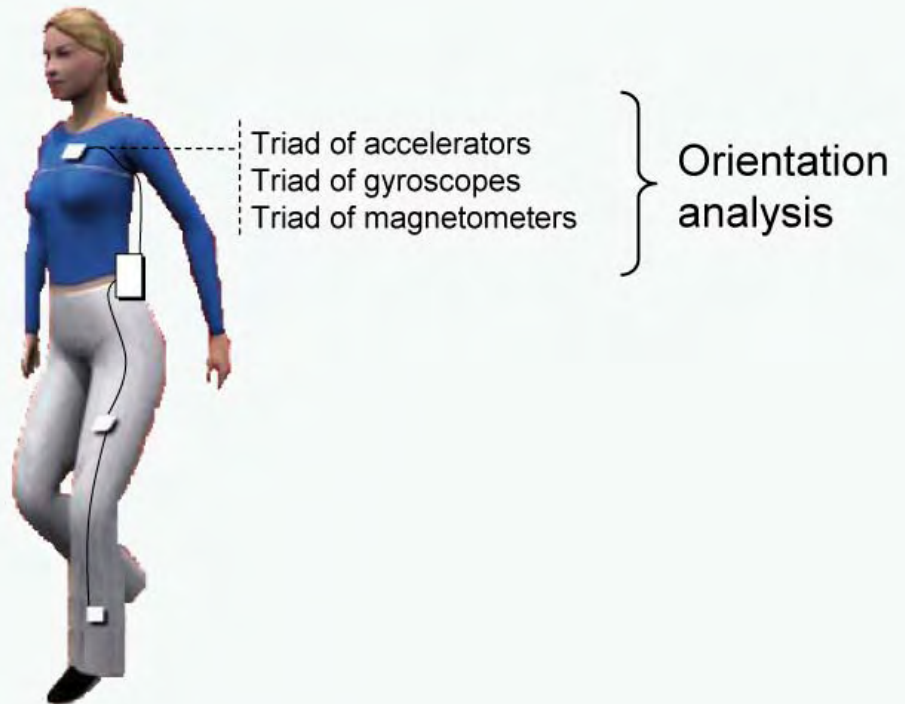
- **Déplacements**

- Estimation indirecte des déplacements horizontaux et verticaux provenant des capteurs inertiels
- Relation entre variance/fréquence des accélérations et la longueur des pas



MEMS: Architecture distribuée

- Analyse de l'orientation
 - Filtre de Kalman adaptif étendu
 - Signaux accélérométriques et des magnétomètres complétés de l'orientation dérivée des gyroscopes
 - Réponse adaptive sous différentes conditions dynamiques et selon les perturbations magnétiques



MEMS: Architecture “Capteur au pied”

- Capteurs MEMS montés sur la chaussure: 3D accéléromètres/gyromètres/compas
- Approche: la distance entre les pas est estimée **directement** des mesures 3D d'accélération et d'orientation



Référence:

Travaux de
S. Beauregard

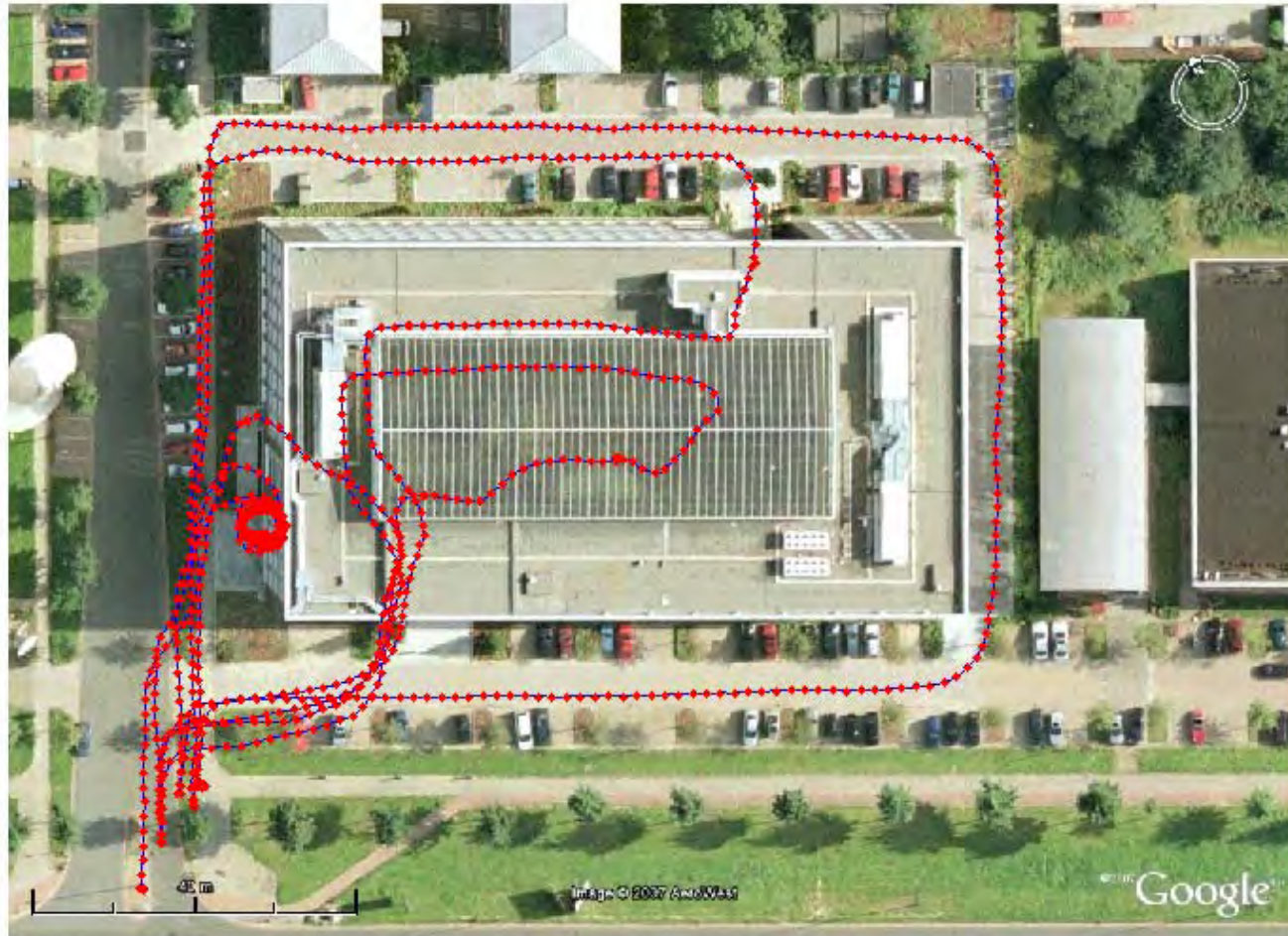
MEMS: Architecture “Capteur au pied”

- Les déplacements entre les pas sont calculés **directement** par double intégration des signaux accélérométriques dans un référentiel terrestre
- Utilisation du fait qu'un pied est immobile à chaque pas
 - Détection des accélérations et vitesses angulaires en dessous d'un certain seuil
 - A cet instant, on peut réaliser une mise à jour des capteurs sachant que la vitesse est nulle (ZUP: Zero Velocity Update)

Bilan

- Méthode adaptée à une marche régulière
- Pas forcément adaptée aux arrêts réguliers et mouvements aléatoires

MEMS: Architecture “Capteur au pied”



Pas ●

Transitions intérieures et extérieures, sans GPS, distance totale ~1 km

MEMS: Bilan

- ✓ Système indépendant de toute infrastructure
- ✓ Plusieurs possibilités de montage des capteurs
- ✓ Très bonne estimation de la distance parcourue
- ✓ Possibilité de détection de postures/activités

- ✗ Erreurs grossières typiques des MEMS
drift, bias, scale factor
- ✗ L'erreur de position croît à chaque pas
- ✗ Nécessité de recalibrer périodiquement les capteurs

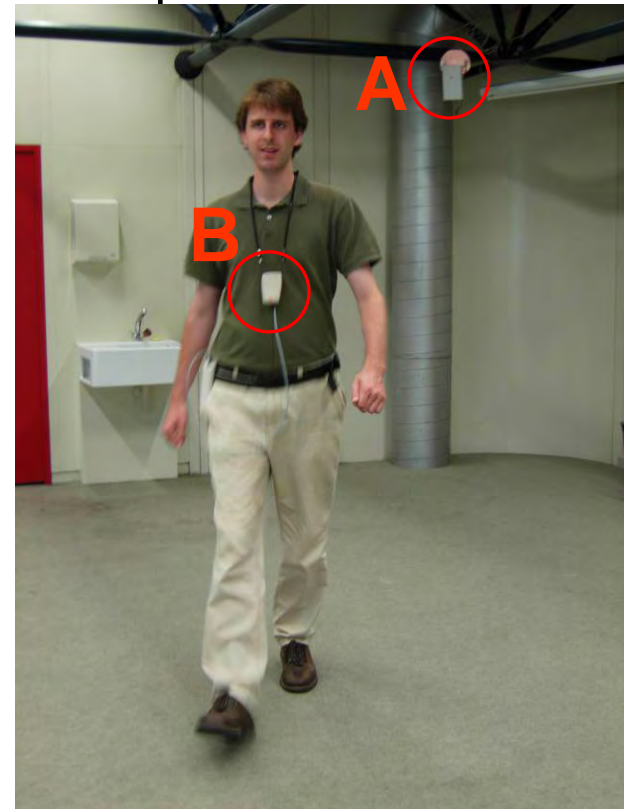


Couplage MEMS - UWB

Système de radiolocalisation UWB

- Banc d'essais EPFL, salle de 12 x 12 m
- **A**: local équipé de 4 antennes
- **B**: la personne équipée d'un tag émetteur/récepteur

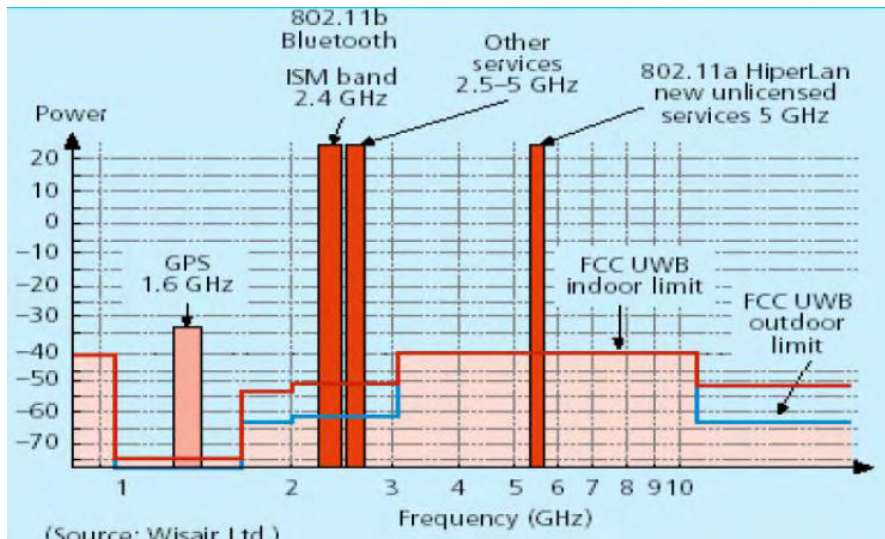
- Utilisation conjointe de capteurs MEMS et d'un système de radiolocalisation UWB
- Réalisation d'un couplage entre un système **autonome** et un système **lié à une infrastructure**
- Hybridation des données MEMS - UWB au moyen de deux filtres de Kalman :
 - Filtre en couplage « lâche »
 - Filtre en couplage « rapproché »



Couplage MEMS - UWB

UWB: Ultra Wide Band ou ULB (Ultra Large Bande)

- Moyen de télécom sans fils
- Norme américaine 802.15.13a du FCC (Federal Communications Commission) depuis 2002
- Signal qui peut difficilement être brouillé
- Grande pénétration au travers des matériaux
- Émission de signaux de très courte impulsion (pico sec)



- à faible puissance sous le niveau d'émission non intentionnelle de bruit
- sur une gamme de fréquences extrêmement large
- spectre de fréquences [3.1 – 10.6] GHz

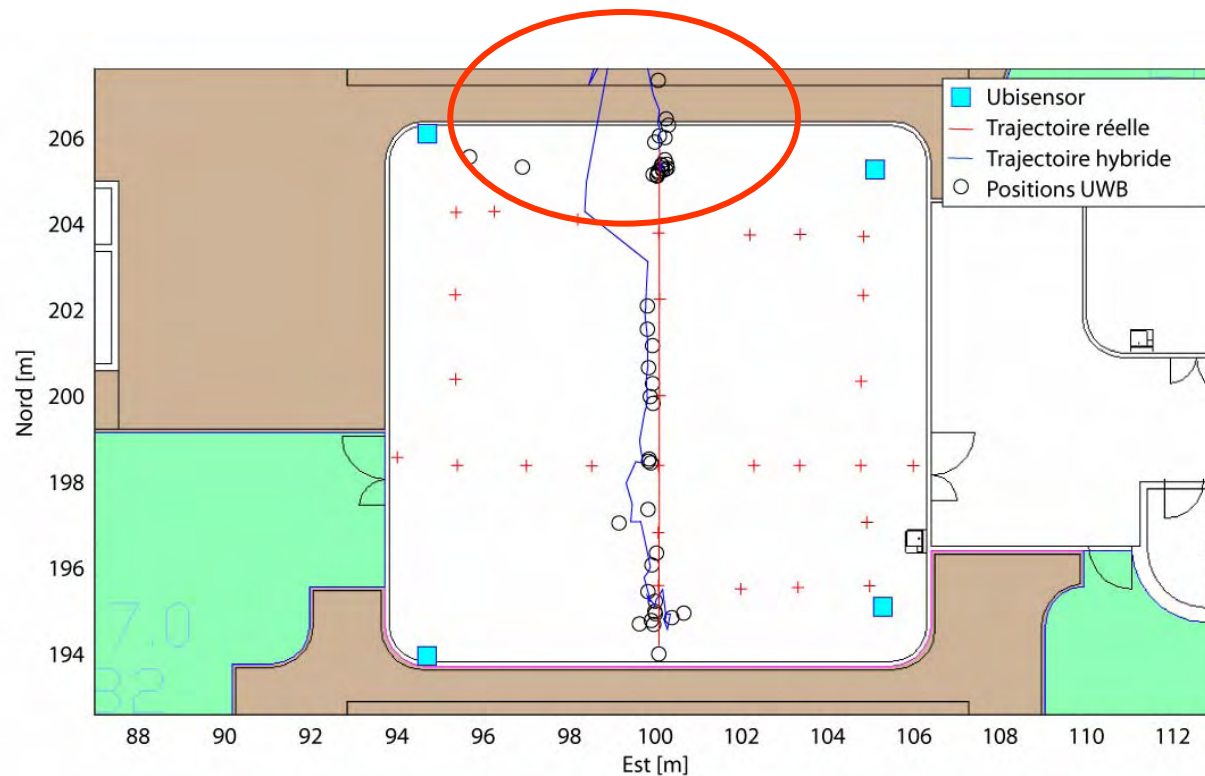
Couplage MEMS - UWB


Couplage lâche

- Données de base utilisées dans le filtre pour obtenir la trajectoire hybride
 - Positions E, N et Z issues du système de localisation basé sur l'UWB
 - Informations issues d'un capteur inertiel MEMS
 - Informations de comptage de pas
 - Orientation du capteur MEMS, qui permet d'estimer la direction du déplacement (cap) du piéton
- Vecteur d'état comprenant
 - Positions 3D du piéton (E, N, Z)
 - Longueur moyenne d'un pas
 - « Biais » sur les mesures d'orientation (cap) provenant des MEMS
- Mises à jour effectuées à partir des positions issues du système de localisation UWB

Couplage MEMS-UWB

- Nécessité de trier les positions UWB

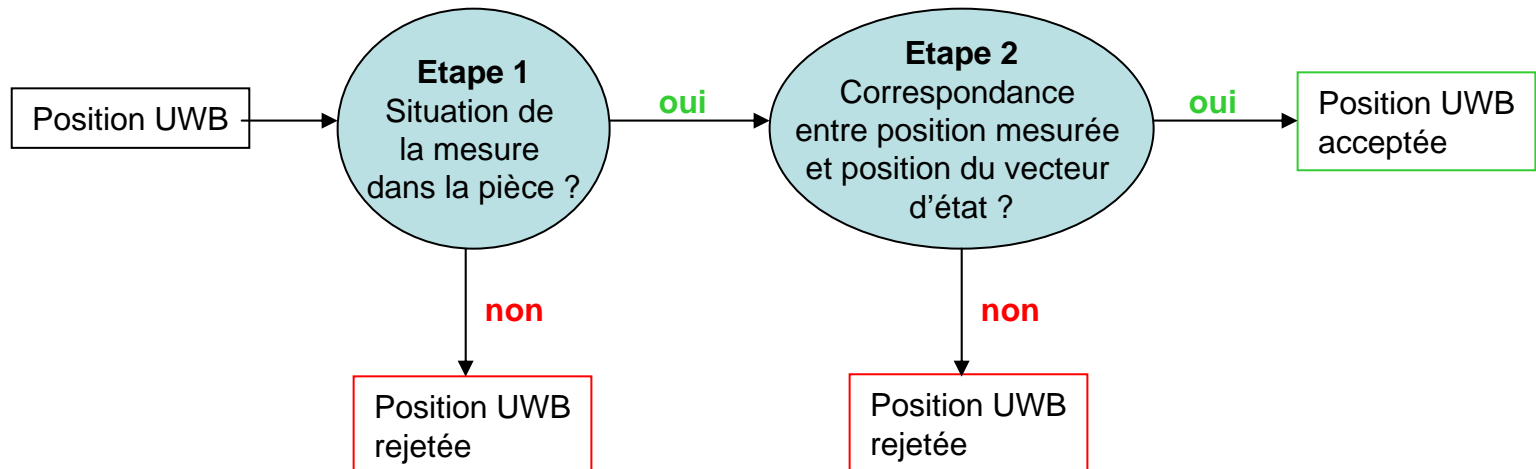


 Positions erronées créant de grandes déviations dans la trajectoire hybride

Couplage MEMS-UWB

Couplage lâche

- Principe du tri des positions UWB
 1. Elimination des mesures de position situées hors de la pièce
 2. Comparaison des mesures avec la position stockée dans le vecteur d'état
 - Différences entre les coordonnées mesurées et les coordonnées du vecteur d'état
 - Division de ces différences par les écarts-types des coordonnées du vecteur d'état
 - Définition de seuils maximum pour les résultats de la division
 - Rejet des positions pour lesquelles ce seuil est dépassé

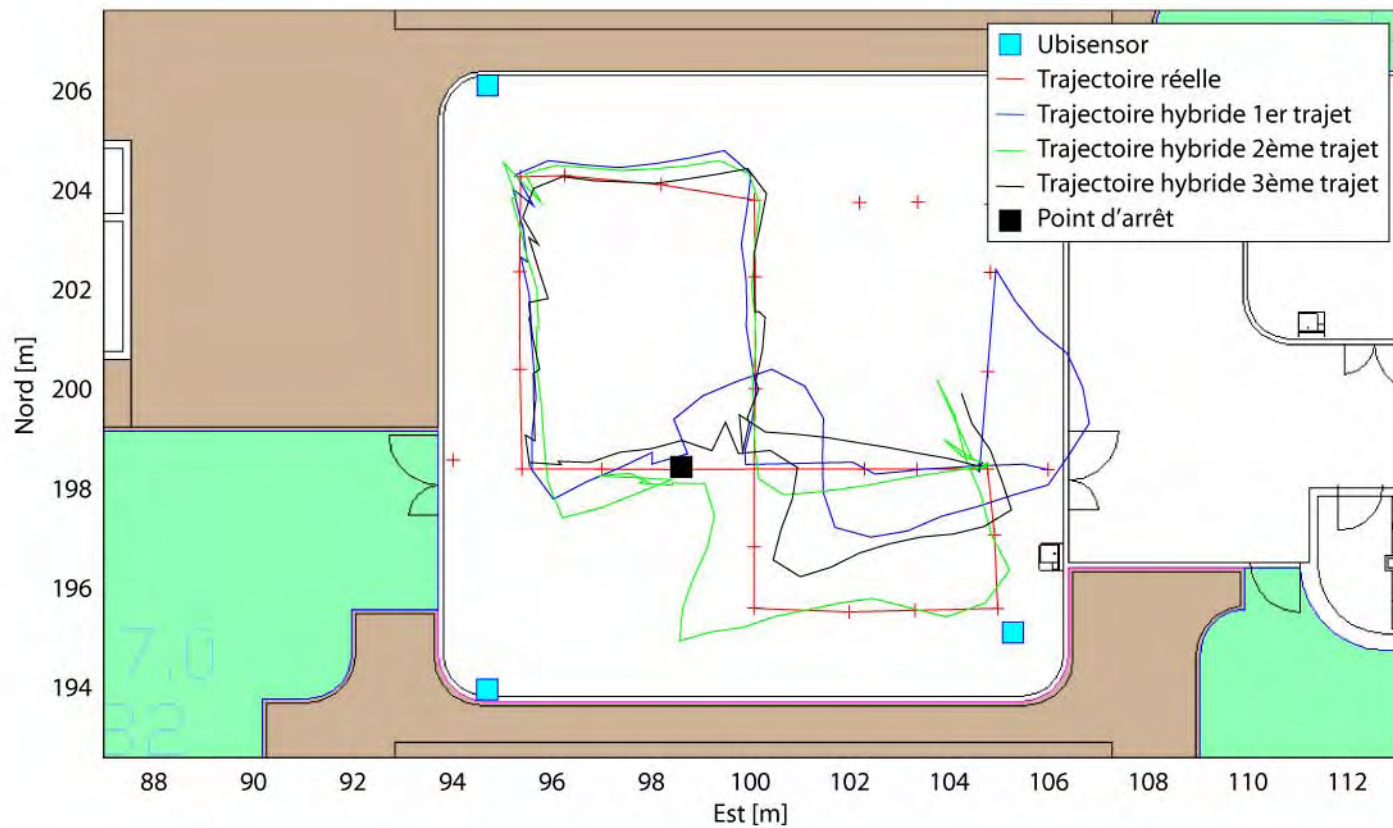


Couplage MEMS-UWB

Evaluation du couplage lâche

Double boucle effectuée 3 fois

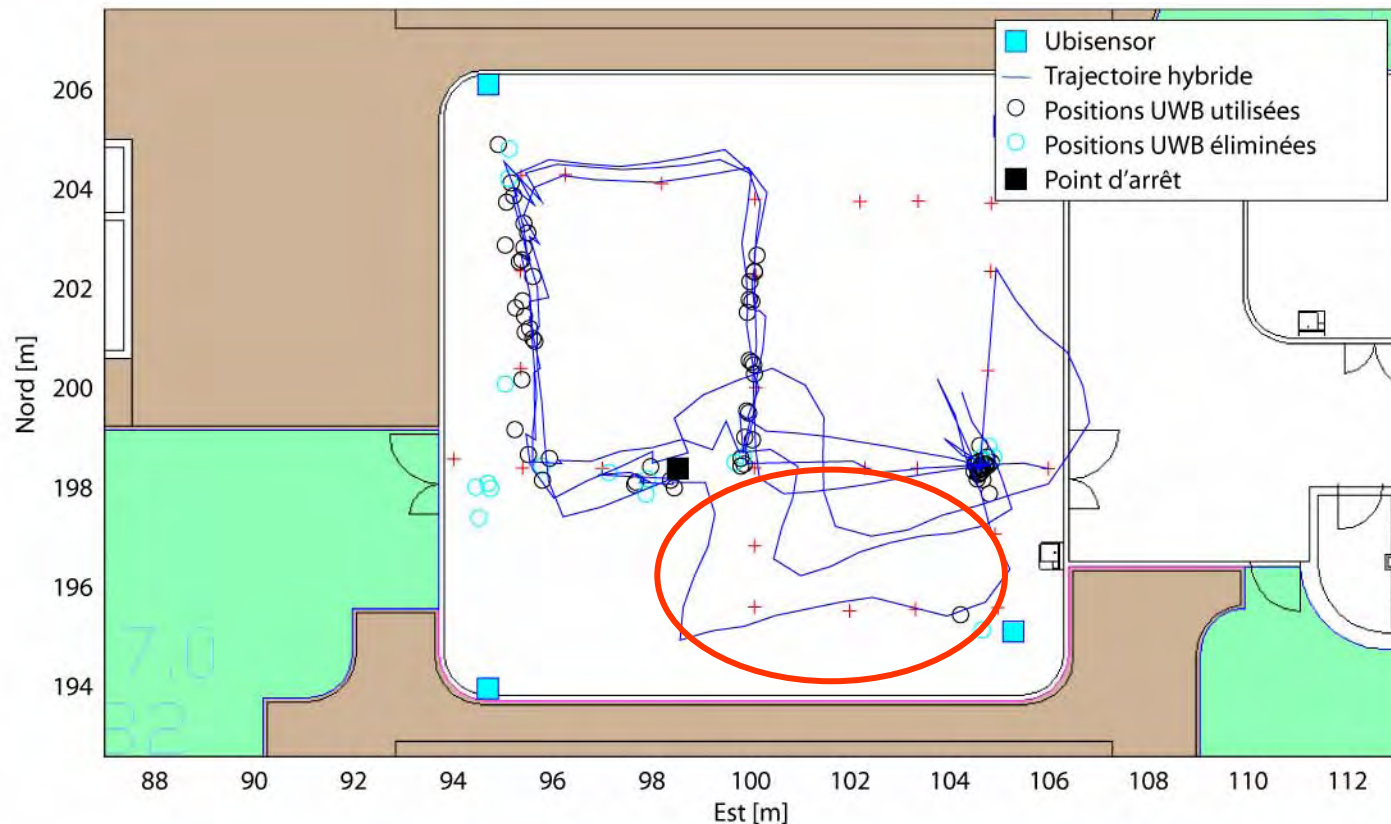
A chaque tour le piéton stoppe sur le point d'arrêt



Couplage MEMS-UWB

Evaluation du couplage lâche

Comparaison de la trajectoire hybride avec les positions UWB

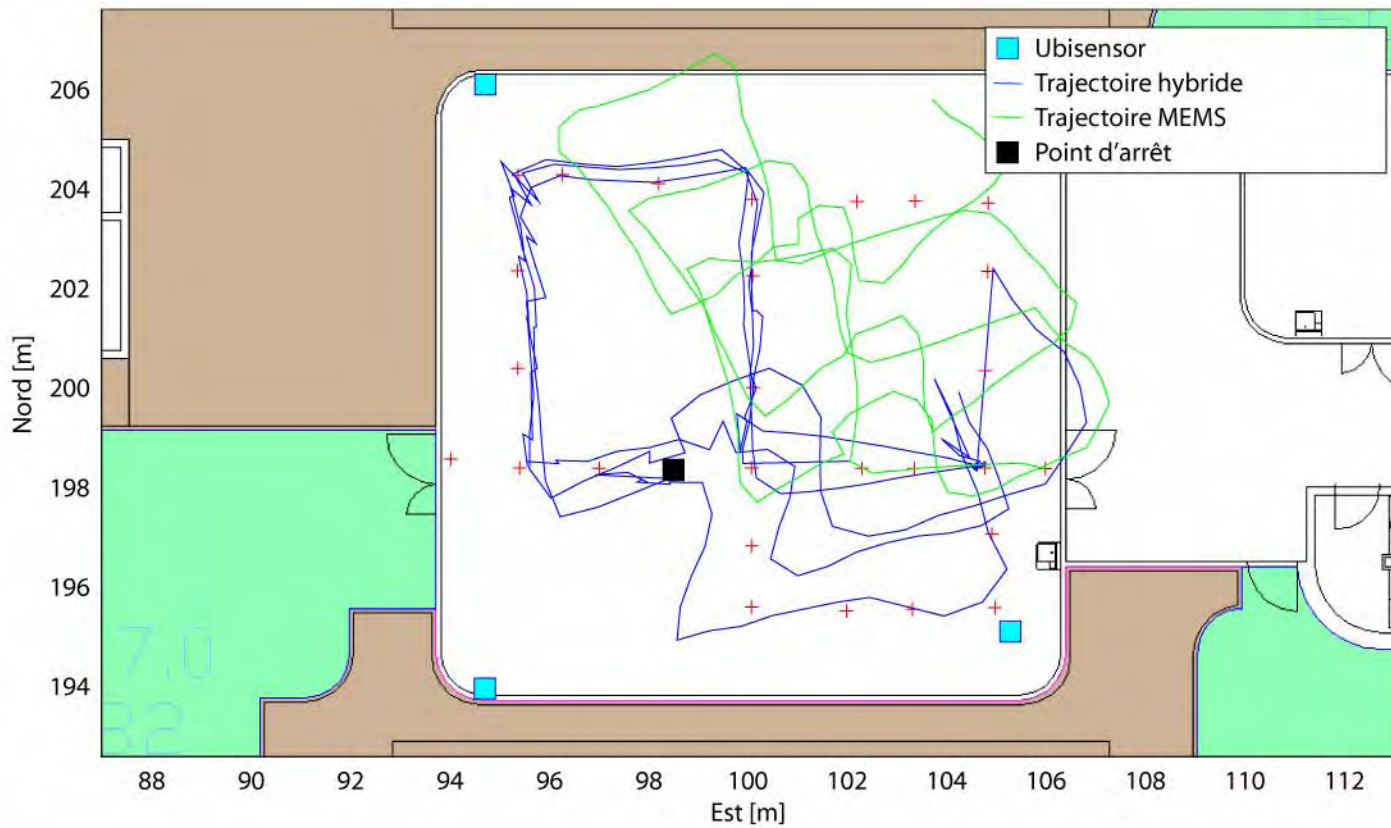


Absence de positions UWB due aux obstructions/orientation du piéton.
Incidence sur la trajectoire hybride (fausse au sud)

Couplage MEMS-UWB

Evaluation du couplage lâche

Comparaison de la trajectoire hybride avec la trajectoire MEMS



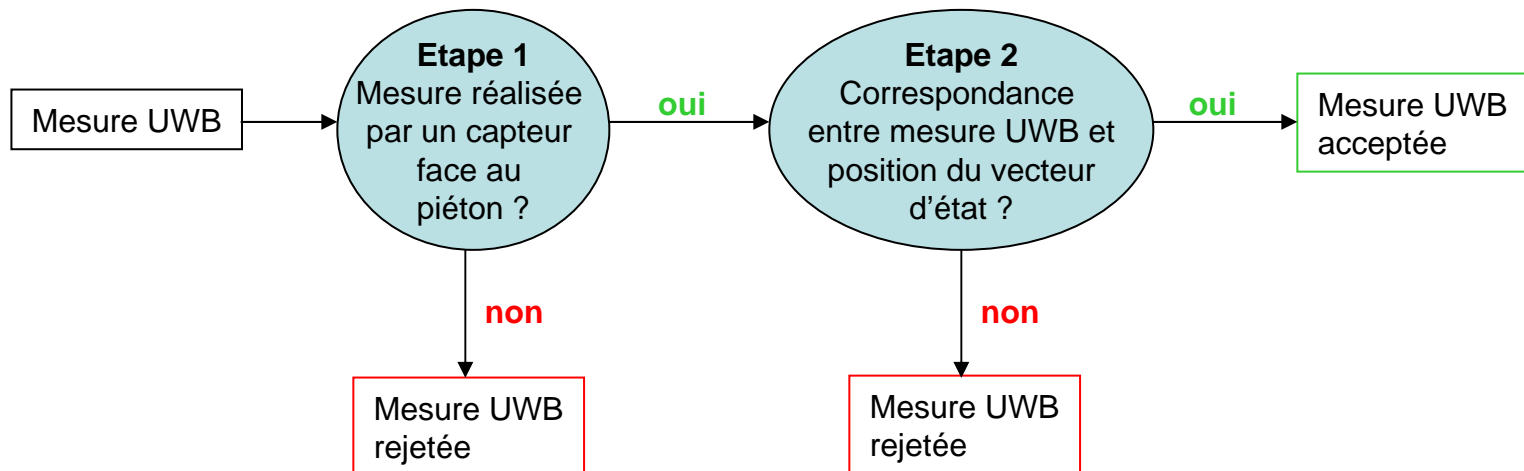
Couplage MEMS-UWB

Couplage rapproché

- Données de base utilisées dans le filtre pour obtenir la trajectoire hybride
 - Mesures brutes du système de localisation UWB
 - Mesures d'angles
 - Mesures de différences de temps d'arrivée (TDOA)
 - Informations issues des capteurs inertiels MEMS
 - Informations de comptage de pas
 - Orientation du capteur MEMS, qui permet d'estimer la cap du piéton
- Vecteur d'état comprenant:
 - Positions 3D du piéton (E, N, Z)
 - Fréquence des pas, longueur moyenne d'un pas
 - Vitesse verticale, cap du piéton
 - « Biais » sur les mesures de cap issues des MEMS
- Mises à jour à partir des informations issues du module MEMS
- Mises à jour à partir des mesures brutes du système de localisation UWB

Couplage MEMS-UWB

- Tri des mesures brutes UWB
 1. Elimination des mesures issues de capteurs portés par le piéton
 2. Comparaison des mesures avec la position stockée dans le vecteur d'état
 - Calcul d'angles et de différences de temps d'arrivée « théoriques » à partir des coordonnées stockées dans le vecteur d'état
 - Calcul de l'écart-type de ces valeurs par propagation de variances à partir de la matrice de covariance du vecteur d'état
 - Comparaison des mesures du système UWB avec les valeurs « théoriques » issues du vecteur d'état, selon le même principe que celui adopté pour le tri des positions

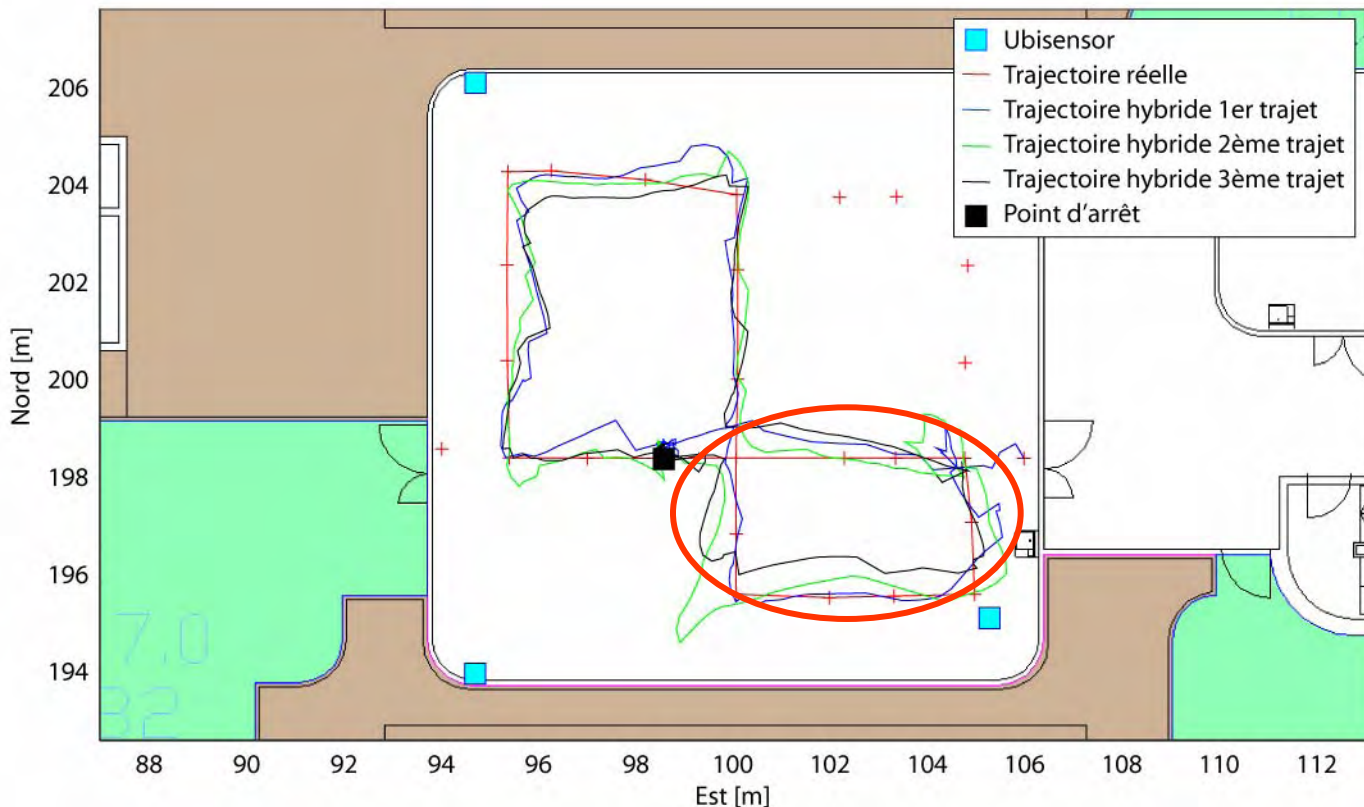


Couplage MEMS-UWB

Performance du couplage rapproché

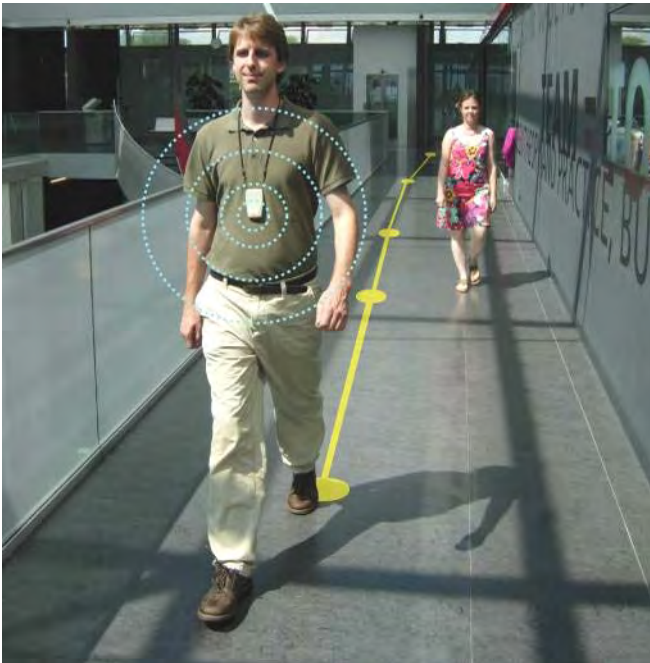
Double boucle effectuée 3 fois

A chaque tour le piéton stoppe sur le point d'arrêt



Absence de positions UWB due aux obstructions/orientation du piéton.
Trajectoire hybride correcte avec ce type couplage

Couplage MEMS - UWB : Bilan



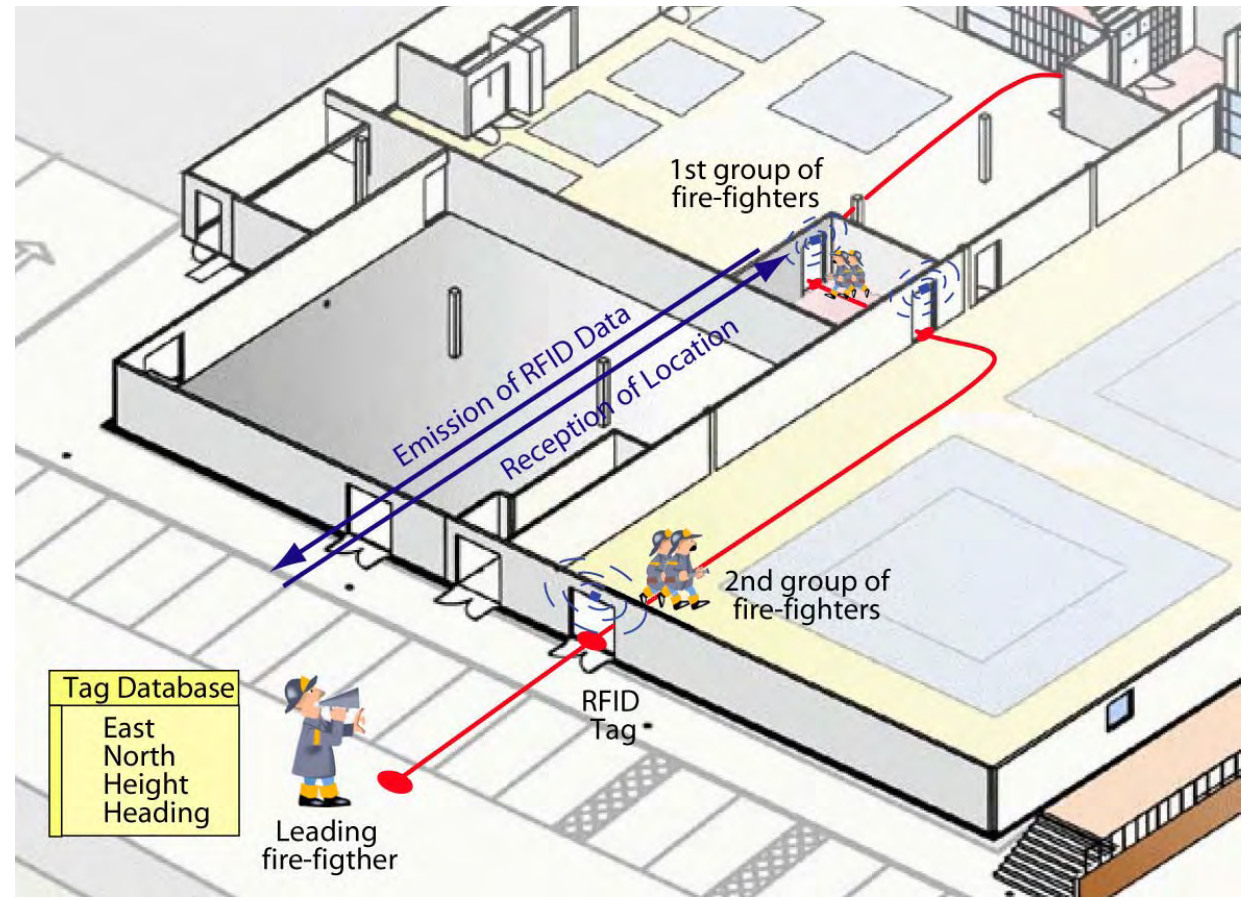
- ✓ Système robuste
- ✓ Haute précision ~1m
- ✓ Couplage MEMS-UWB performant dans des situations de faible réception UWB

- ✗ Système UWB dépendant d'une infrastructure
- ✗ Effets des multi-trajets de l'UWB
 - ✗ Position erronées

MEMS + tags RFID

- **Concept de localisation**

- Placement de tags RFID le long du parcours à des endroits stratégiques (porte)
- Les coordonnées de tags RFID sont connues (BD bâtiment) et l'orientation du trajet au droit du tag
- Les capteurs MEMS estime le parcours qui est périodiquement recalé aux passages des tags RFID



MEMS + tags RFID

Extended Kalman Filter

Process

MEMS

 s, θ

$$\begin{aligned}\dot{E} &= \lambda \cdot s \cdot \sin(\theta + \delta\theta) \\ \dot{N} &= \lambda \cdot s \cdot \cos(\theta + \delta\theta) \\ \dot{Z} &= \Delta Z \\ \dot{\lambda} &= w_\lambda \\ \dot{\delta\theta} &= -\beta_{\delta\theta} \delta\theta + w_{\delta\theta}\end{aligned}$$

 $\mathbf{x} =$

$$\begin{bmatrix} E \\ N \\ Z \\ \lambda \\ \delta\theta \end{bmatrix}$$

Measurements

RFID

$$\theta_{\text{MEMS}} + \delta\theta$$

$$[E \quad N \quad Z]$$

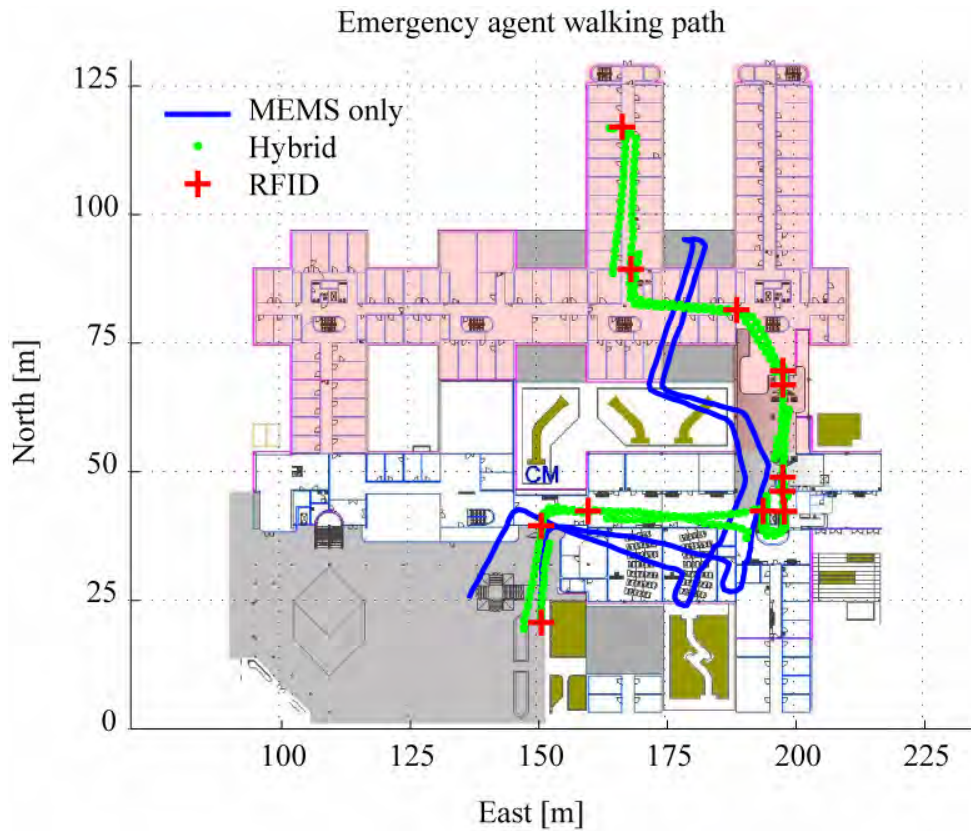
$$\theta \pm 180^\circ$$

$$\delta\theta = \theta_{\text{RFID}} - \frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{n_s} \theta_{\text{MEMS},i}$$

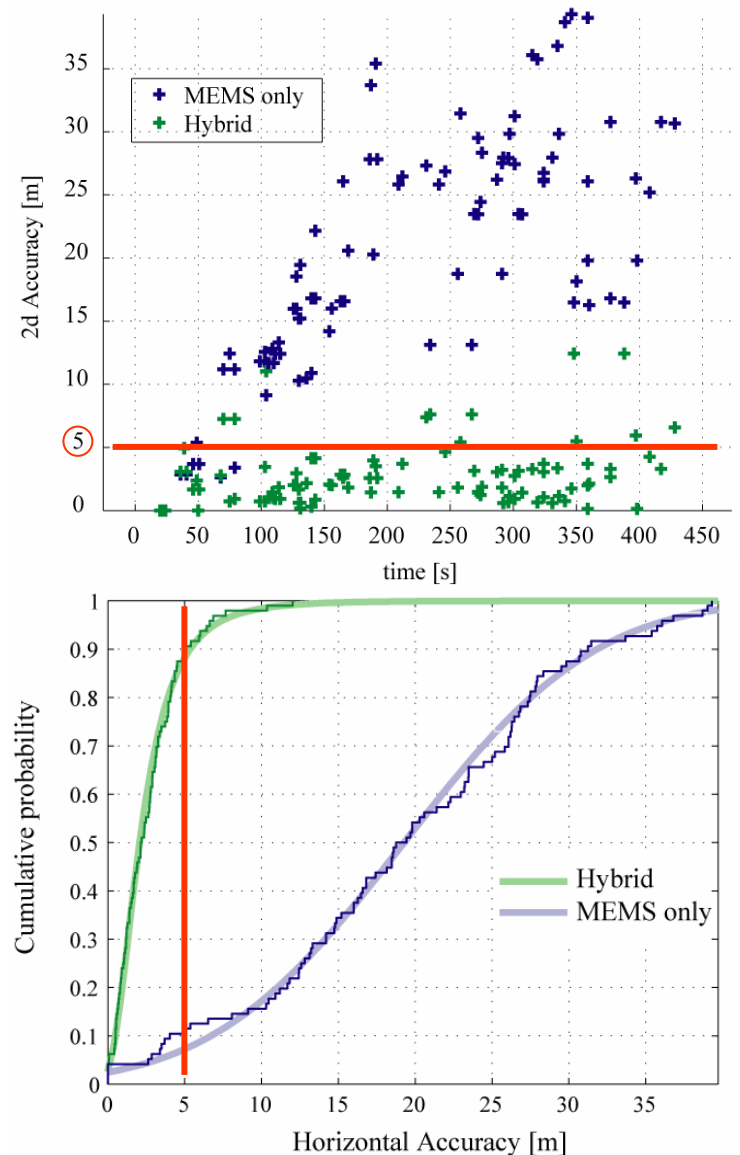
Schéma du principe de couplage

MEMS + tags RFID

Analyse de performance

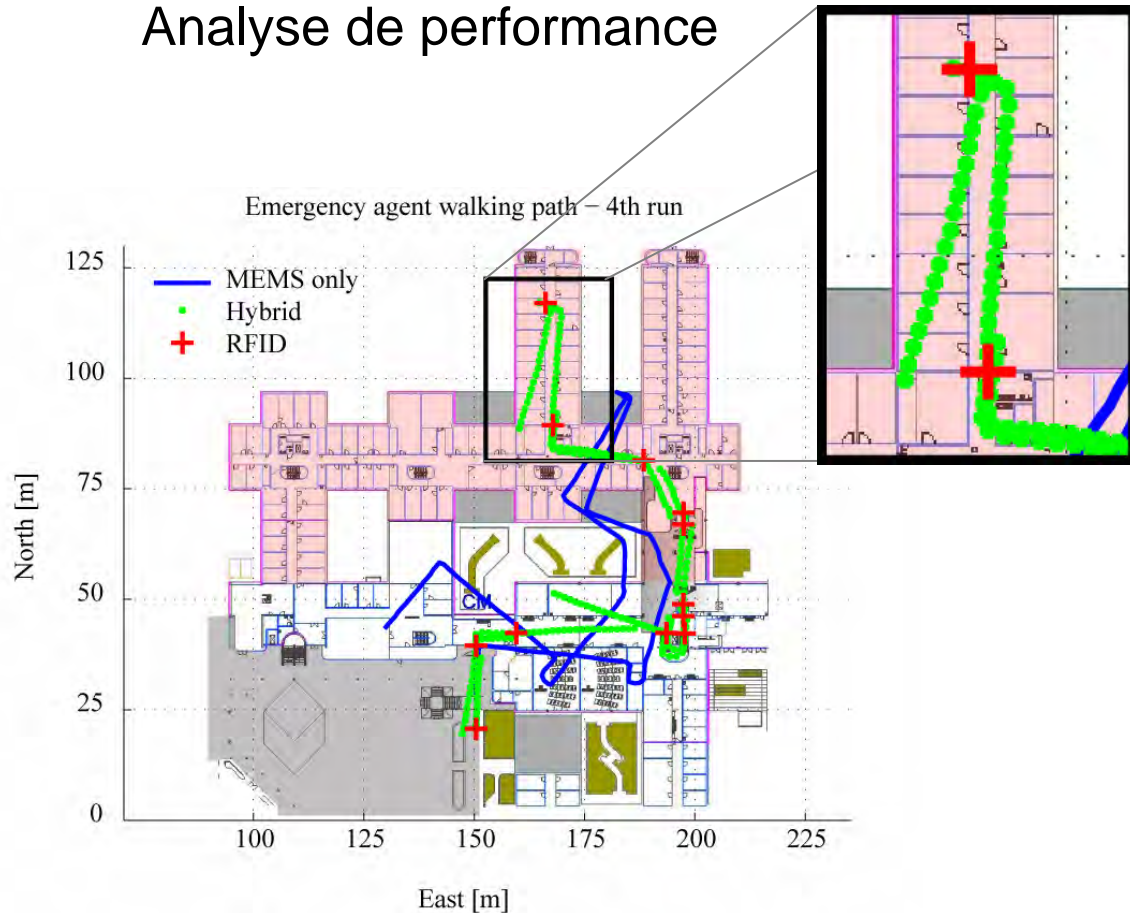


350 m, 7 min 30 sec, 2 étages



MEMS + tags RFID

Analyse de performance

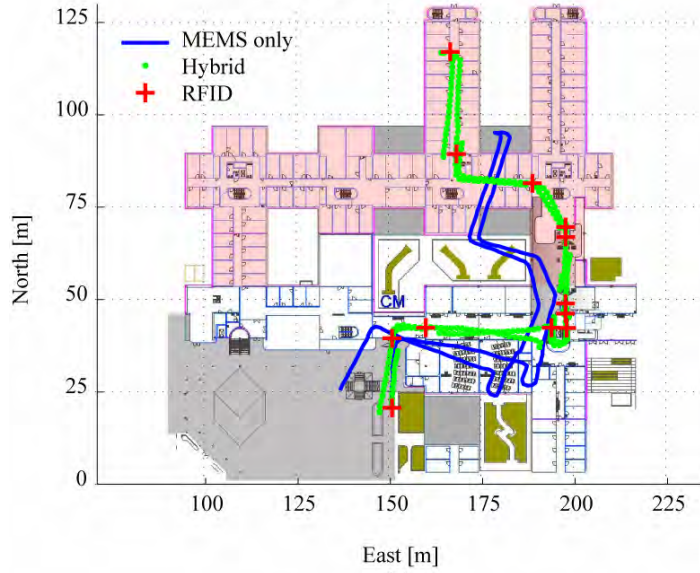


- Découplage des mises à jour des informations de position et de cap
- Problème rencontré: lorsque la personne tourne au droit d'un tag RFID
 - L'information d'orientation (cap) au droit du tag peut biaiser le calcul du trajet hybride

Précision inférieure à 5m

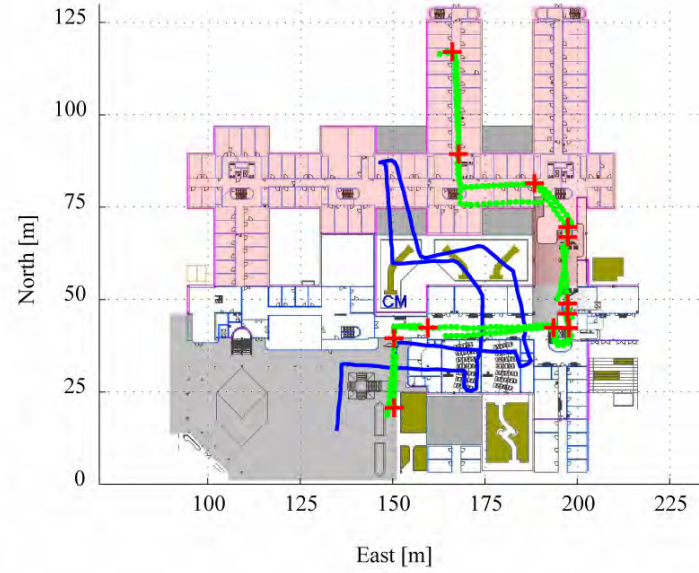
Placement de tags RFID chaque 20 à 40 m

Emergency agent walking path – 1st run



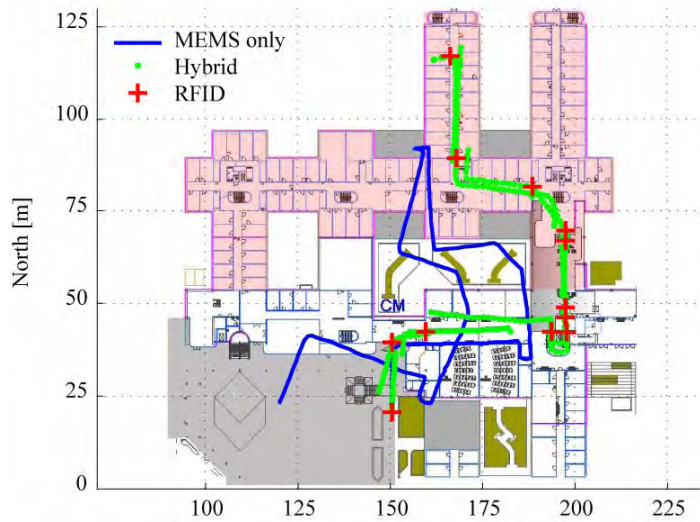
(a)

Emergency agent walking path – 3rd run



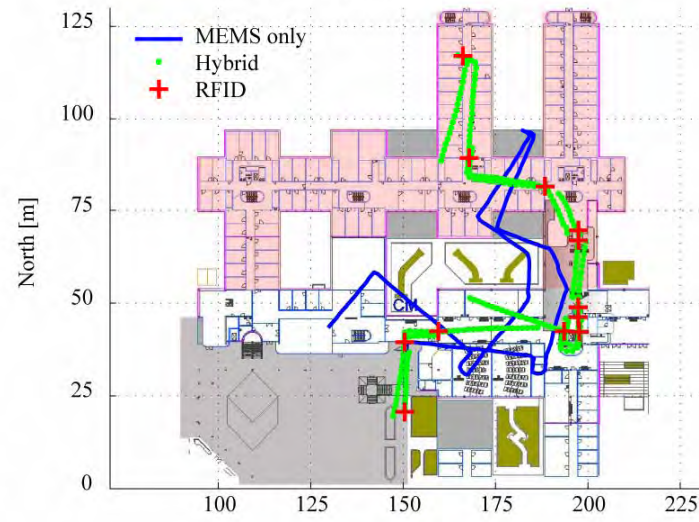
(c)

Emergency agent walking path – 2nd run



(b)

Emergency agent walking path – 4th run



(d)

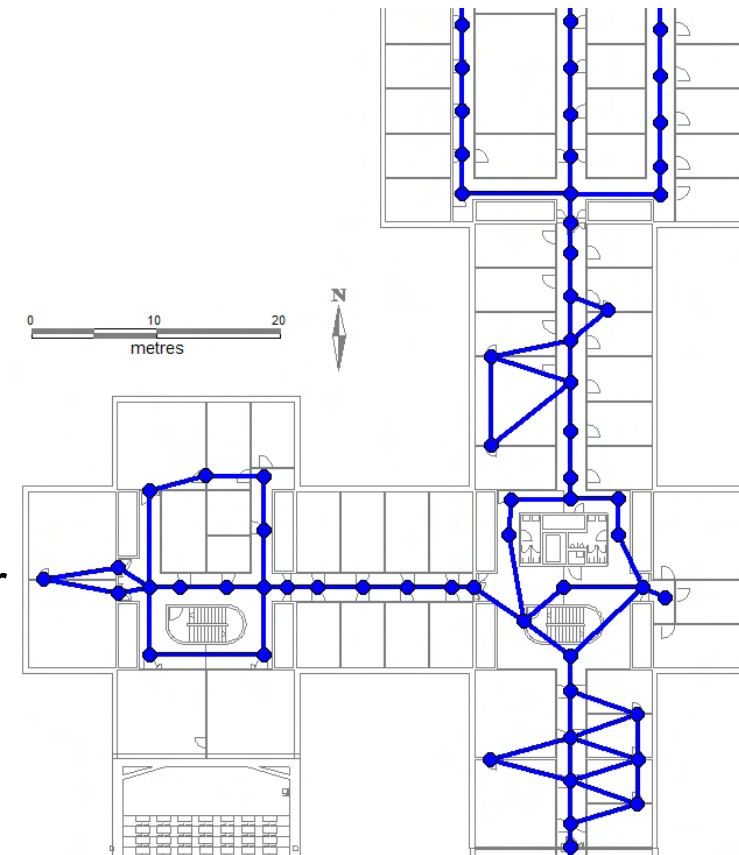
MEMS + tags RFID : Bilan



- ✓ Système simple et facile à déployer
- ✓ Ne dépend pas d'une installation pré-existante liée à l'infrastructure
- ✓ Robustesse (Points fixes)
- ✗ Nécessité de connaître les positions des tags
 - ✗ En principe, on peut s'appuyer sur les plans d'évacuation des bâtiments pour positionner les tags
- ✗ Difficile à déployer suivant la typologie des espaces construits (grande halle)

MEMS + Carte

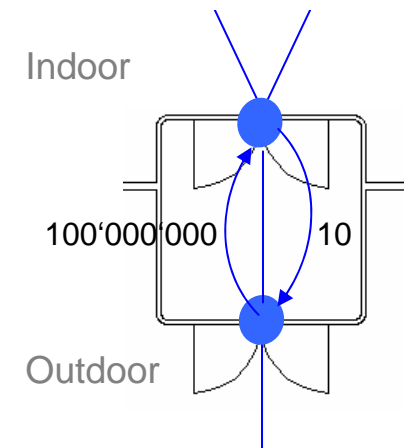
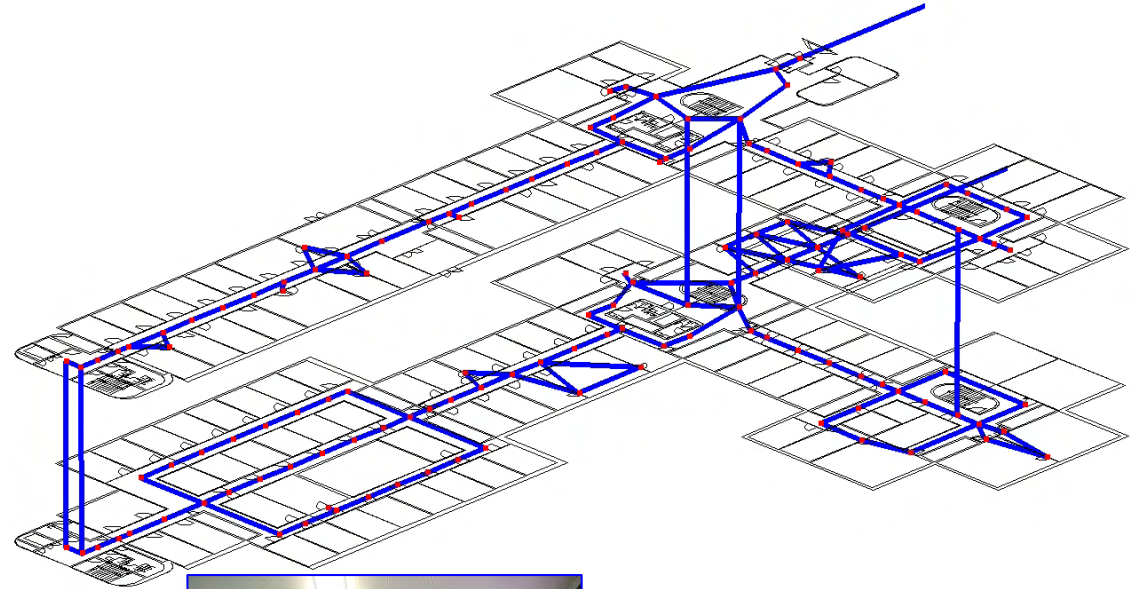
- La base de données cartographiques est nécessaire pour associer une position estimée à un contenu thématique (hall, local, escaliers,...)
- Construction d'un modèle de type **Nœud - Arête**
 - Avantage pour les applications de navigation
 - Principaux axes de circulation à l'intérieur des bâtiments
 - Portes représentées par leur projection ponctuelle sur l'axe central
 - Connexions extérieures entre les bâtiments



MEMS + Carte

Modèle de base

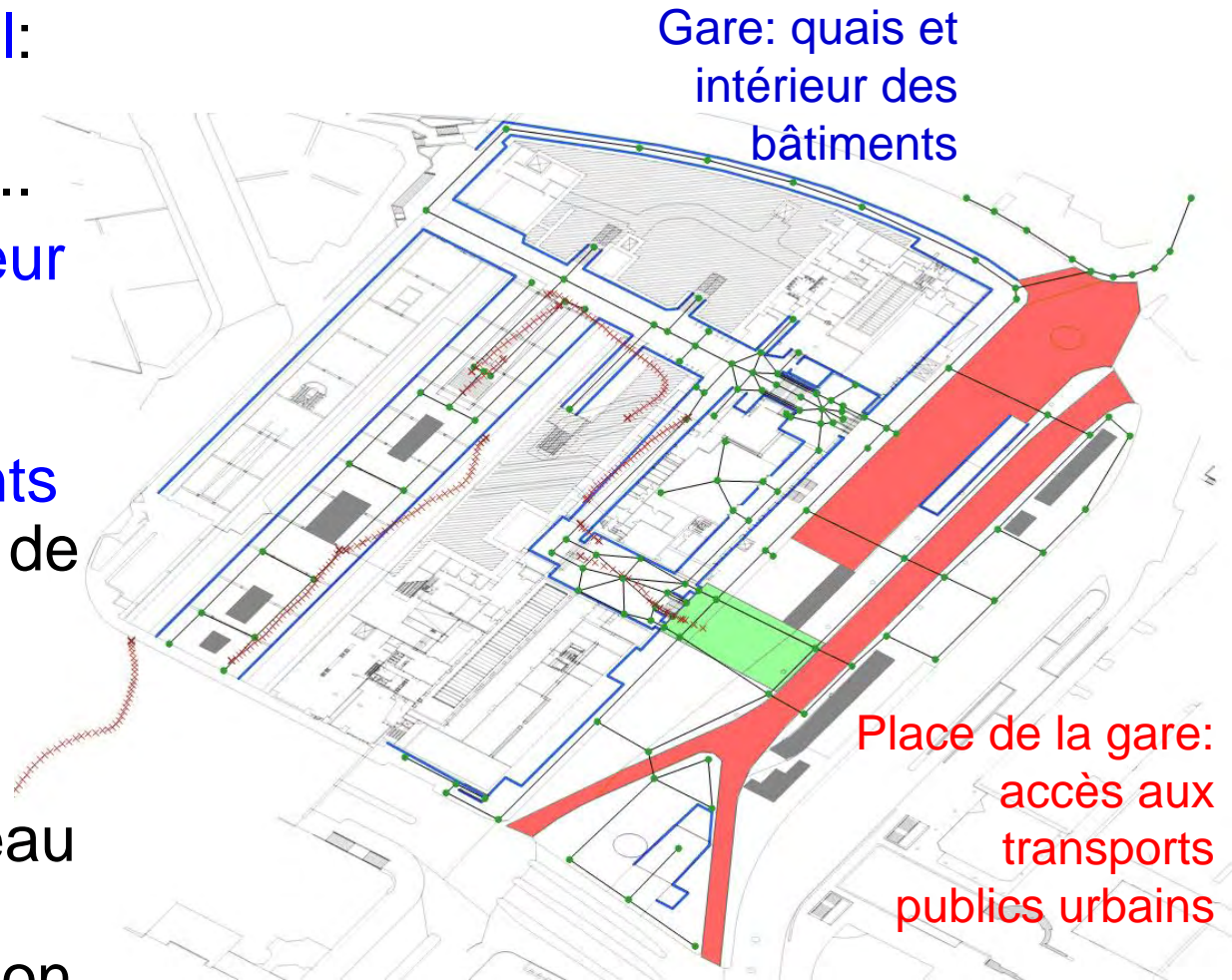
- Modèle 2D + liens verticaux
 - Modélisation des escaliers et des ascenseurs
 - Informations spécifiques sur l'accès à certains locaux
- Modèle développé pour le campus EPFL (aide à l'orientation, calculs d'itinéraires)



MEMS + Carte

Modèle spécifique

- Modèle **multimodal**: réseaux piéton, transports publics,...
- Connexions **intérieur et extérieur** des bâtiments
- Intégration de **points de repères**, zones de dangers,...
- Organisation en couches d'information: réseau de navigation, contexte, localisation



Modèle conceptuel de données

Réseau de navigation

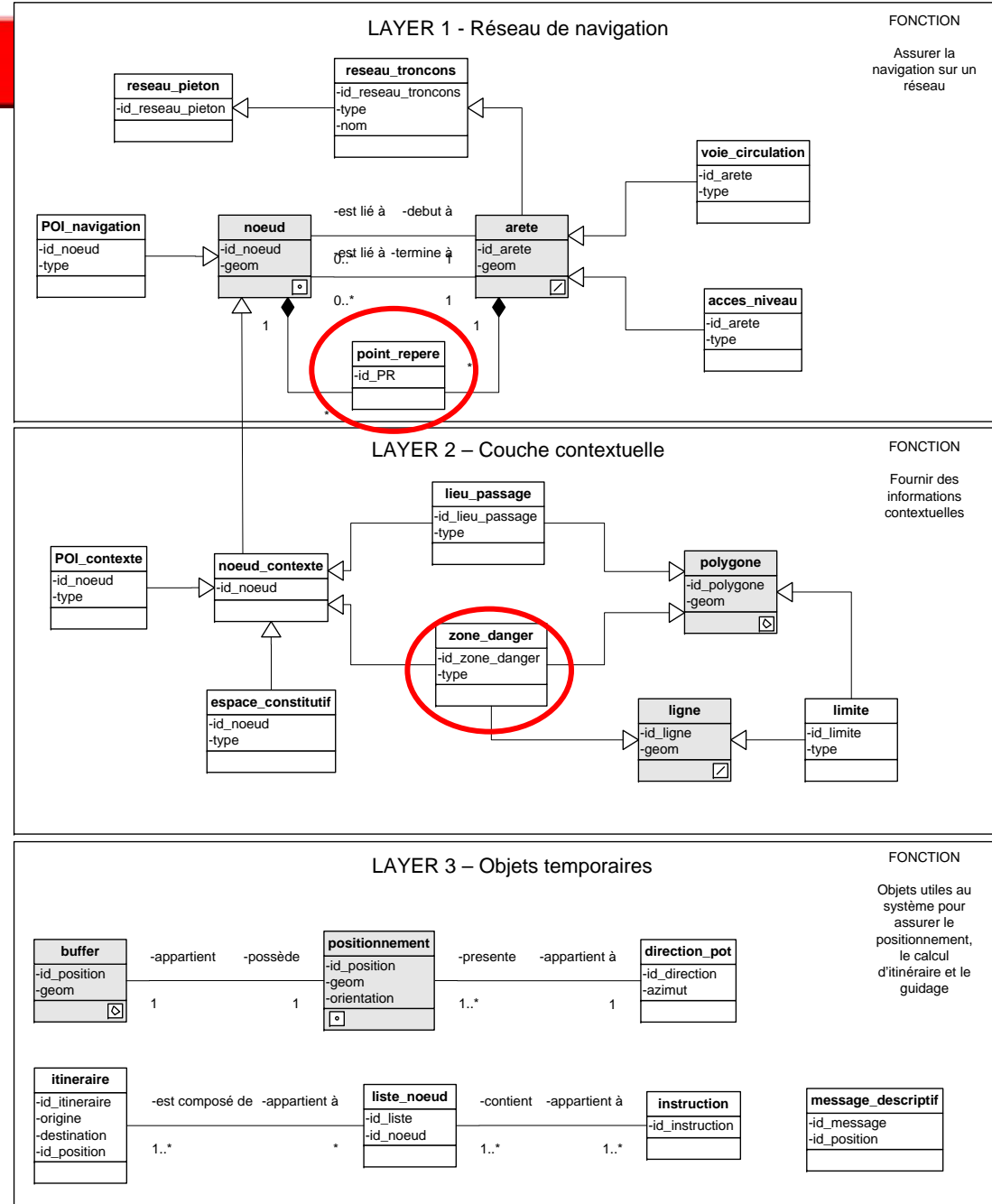
- Arête, nœuds
- POI
- Points de repère

Couche de contexte

- Passages fréquentés
- Zones de dangers

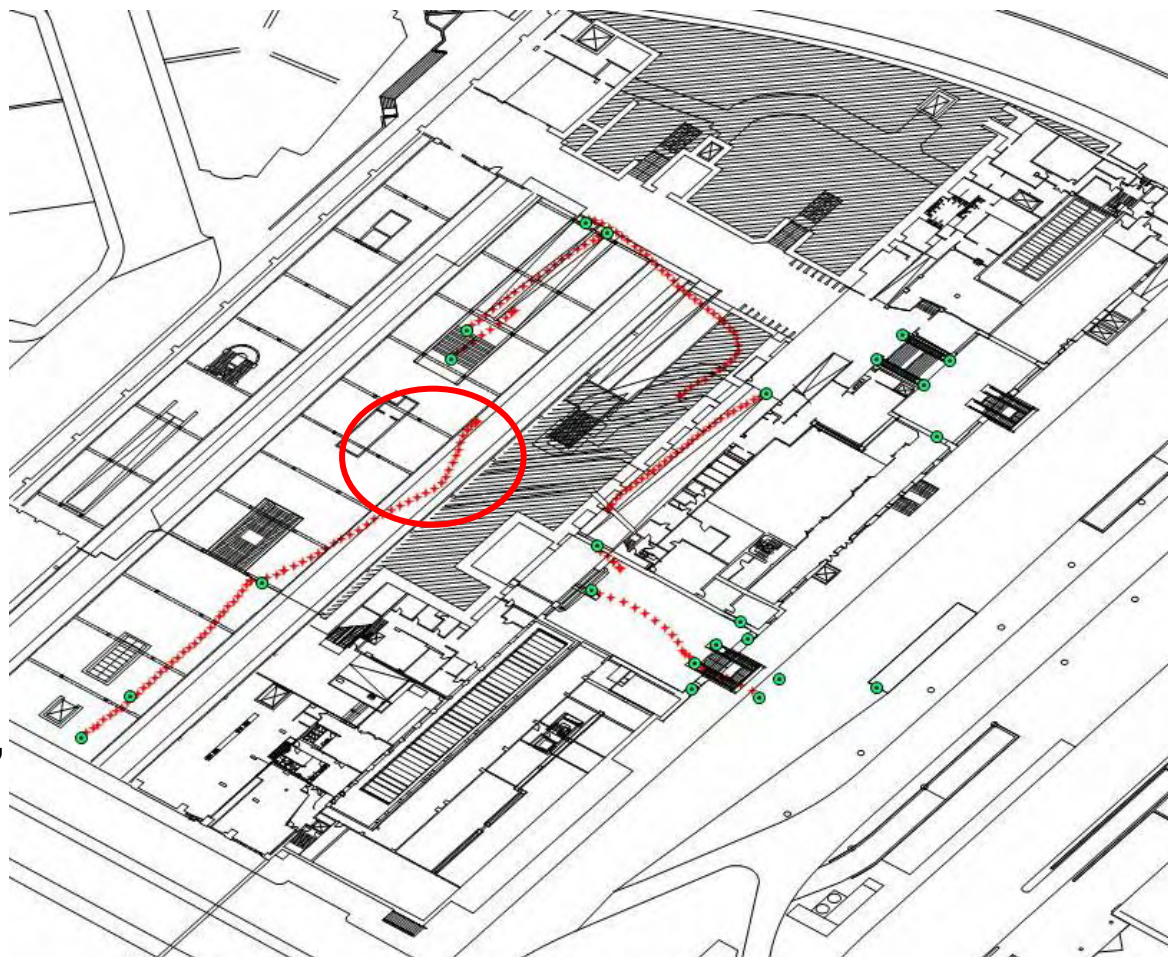
Objets temporaires

Travail de recherche EPFL de Thomas Delavy: modèle de données spécifiques pour les personnes malvoyantes



MEMS + Carte

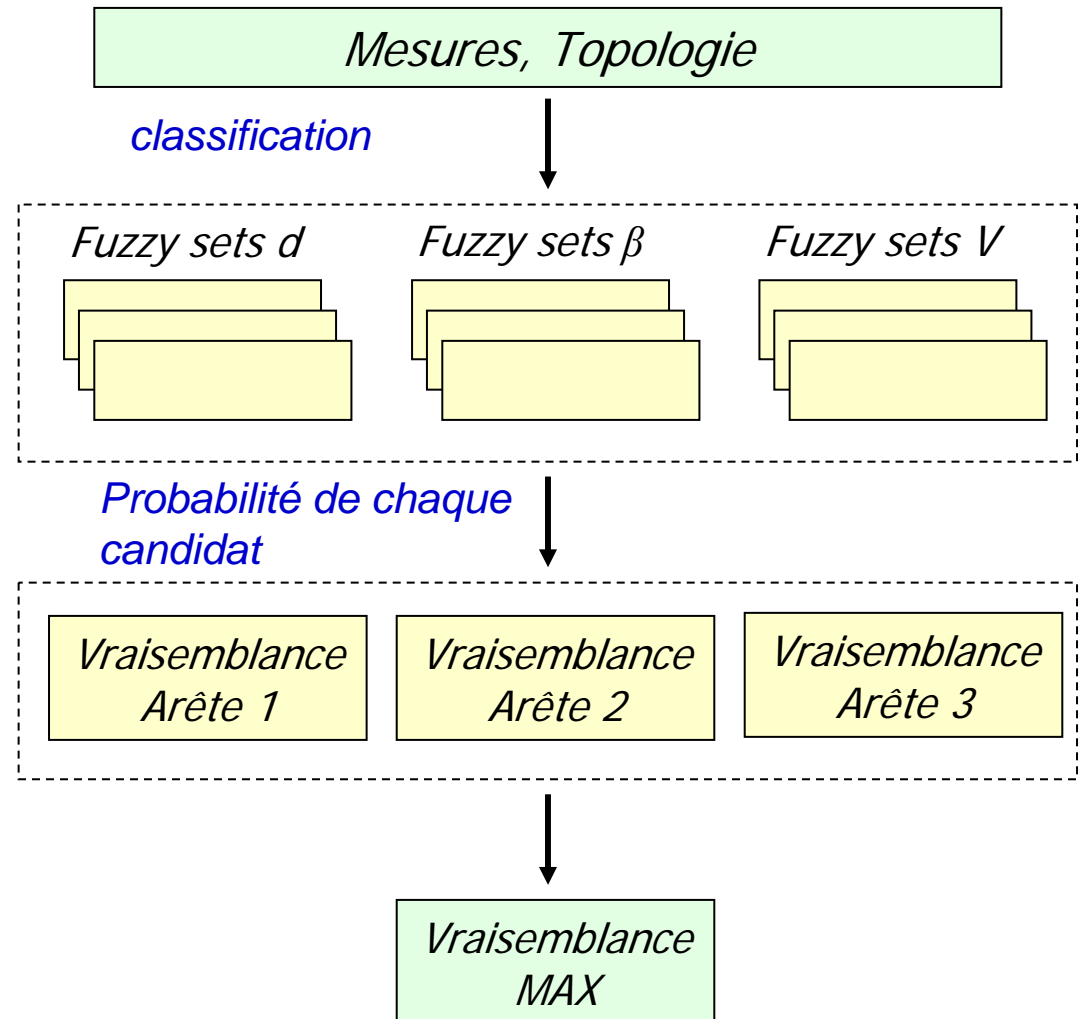
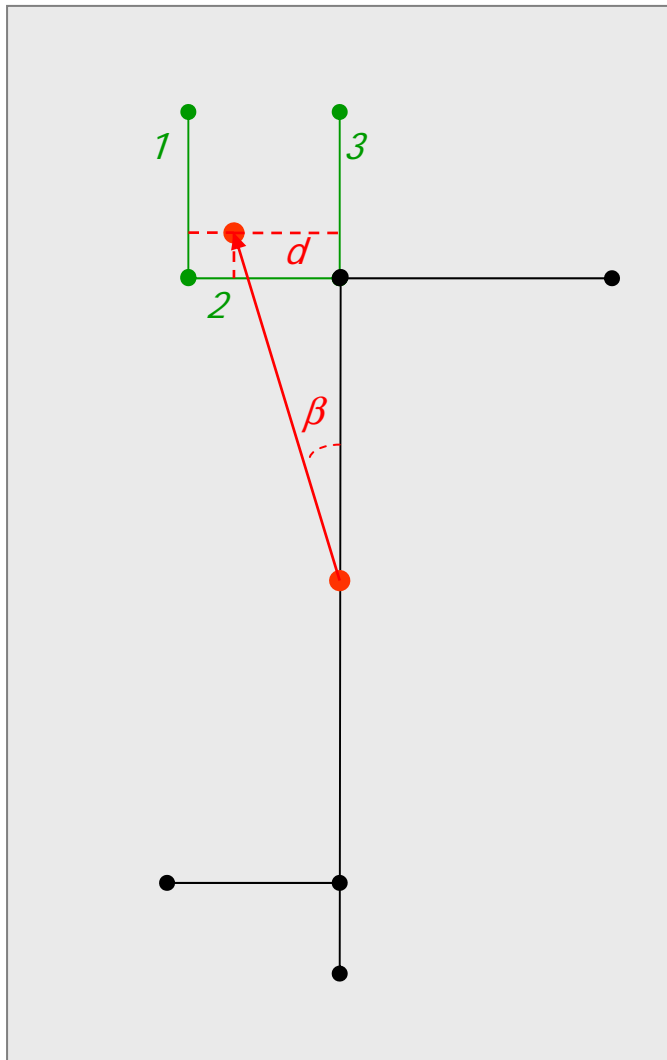
- Superposition d'une trajectoire MEMS (brute) au contenu cartographique
 - Présence des éléments de contexte pour circonscrire la trajectoire
 - Usage de points de passage stratégiques (escaliers, escalators, portes principales)



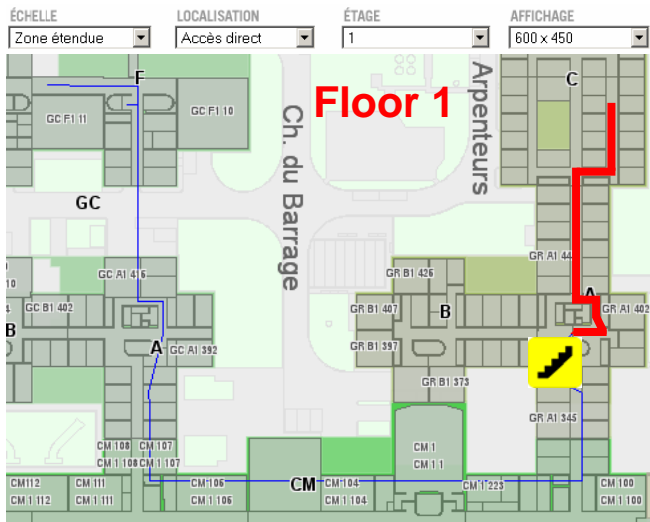
Zones de quai, fortes perturbations (magnétiques) sur les MEMS

MEMS + Carte

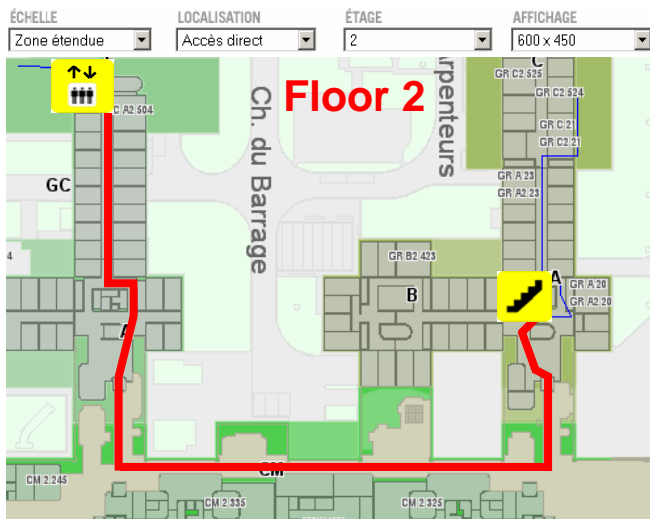
- Méthodes de map-matching basées sur la logique floue



MEMS + carte : Bilan



- ✓ Système indépendant de toute infrastructure
- ✓ Richesse du contenu cartographique: réseau, contexte, POI
- ✓ Référentiel précis et fiable



- ✗ Disponibilité des données
- ✗ Coût de saisie et de mise à jour
- ✗ Absence de formats et modèles standards

Bilan et perspectives

- **Mobilité piétonne sécurisée**
 - Besoins spécifiques et très variables: pas de système universel
 - Les applications sécuritaires et professionnelles vont dicter le marché et influencer les choix technologiques
- **Réponses technologiques**
 - (trop) grand potentiel de solutions en cours de maturation
 - Accroissement du rôle de la carte et des balises (RFID)
- **Perspectives**
 - Développement des produits cartographiques spécifiques à la navigation pédestre
 - Intégration (on the chip) de technologies MEMS dans les récepteurs GNSS ou LPS (UWB, WiFi)

Remerciements et Contacts

- Groupe navigation pédestre à l'EPFL
 - Prof. Bertrand Merminod
 - Valérie Renaudin
 - Sylvain Pittet, Thomas Delavy
 - Phillip Tomé, François Bonzon
- Université de Bremen (D)
 - Stéphane Beauregard, invité EPFL au printemps 08
- Projet Liaison
 - www.liaison-project.eu
 - Rôle de la carte et des balises (RFID)
- Contacts
 - EPFL – Laboratoire de Topométrie
 - <http://topo.epfl.ch>
 - Pierre-yves.gillieron@epfl.ch

