

La Métamorphose du Signal :
Le WiFi Sensing et la Nouvelle Physique de
la Perception Spatiale

*Une analyse multidisciplinaire de la physique des ondes radio,
de l'intelligence artificielle, de la normalisation IEEE 802.11bf
et des implications éthiques et sociétales*

Federico Prevosto

Co-Fondateur, GRAL

Turin, Italie

GRAL — Article de Recherche

Avril 2026

Résumé

Le WiFi Sensing représente un changement de paradigme dans la conception même des réseaux sans fil : d'une infrastructure passive de transport de données binaires à un système perceptif actif, capable de détecter la présence, le mouvement, la morphologie et même les paramètres vitaux des êtres humains à travers l'analyse des perturbations du Channel State Information (CSI). Le présent travail propose une analyse multidisciplinaire et systématique de cette technologie émergente, intégrant les fondements physiques de la propagation multi-trajet, les architectures d'apprentissage profond pour l'estimation de la pose humaine, les mécanismes d'identification biométrique passive, la surveillance sans contact des signes vitaux et les implications éthiques et sécuritaires. La norme IEEE 802.11bf, officiellement publiée en septembre 2025, y est analysée en profondeur en tant que jalon marquant la transition formelle du WiFi d'un moyen de communication à une plateforme de détection native. Les frontières les plus récentes de la recherche sont examinées, notamment l'intégration des grands modèles de langage (LLM) avec les données CSI, les attaques adverses contre les systèmes de détection et les contre-mesures en matière de vie privée. L'article se conclut par une perspective prospective sur les défis ouverts et les orientations futures de la recherche, esquissant une vision dans laquelle chaque environnement connecté deviendra intrinsèquement conscient de la présence et de l'état de santé de ses occupants.

Mots-clés : *WiFi Sensing, Channel State Information, IEEE 802.11bf, Apprentissage Profond, DensePose, Biométrie Passive, Surveillance Sans Contact des Signes Vitaux, Vie Privée, Attaques Adverses, Grands Modèles de Langage, Intelligence Ambiante.*

Table des matières

Table des matières

Résumé

1. Introduction

- 1.1 Le paradoxe de l'invisibilité perceptive
- 1.2 Contexte et motivations
- 1.3 Objectifs et structure

2. Fondements physiques de la propagation radio et du CSI

- 2.1 Propagation multi-trajet
- 2.2 Du RSSI au CSI
- 2.3 Le modèle de Fresnel

3. Architectures d'IA pour le WiFi Sensing

- 3.1 Du signal brut à la compréhension sémantique
- 3.2 DensePose from WiFi
- 3.3 RF-Pose et Person-in-WiFi
- 3.4 Implémentations open source

4. Biométrie passive : l'identité dans le signal

- 4.1 L'empreinte digitale sans fil
- 4.2 Reconnaissance de la démarche
- 4.3 Ondes millimétriques
- 4.4 Authentification palmaire

5. Surveillance sans contact des signes vitaux

- 5.1 Le routeur comme diagnostic passif
- 5.2 Techniques d'extraction
- 5.3 Applications cliniques et domiciliaires

6. La norme IEEE 802.11bf

- 6.1 Genèse et normalisation
- 6.2 Architecture technique
- 6.3 Détection bistatique et multistatique

7. Sécurité, attaques adverses et vie privée

- 7.1 Le paradoxe de la vie privée
- 7.2 Taxonomie des attaques
- 7.3 Contre-mesures et défenses

8. Convergence WiFi Sensing et LLM

- 8.1 Wi-Chat et IoT-LLM

8.2 Raisonnement sur les données capteurs

8.3 Intelligence ambiante

9. Domaines d'application réels

9.1 Sécurité invisible

9.2 Soins intelligents et chutes

9.3 Gestion énergétique

9.4 Interaction homme-machine

9.5 Automobile

10. Défis ouverts et directions futures

10.1 Généralisation inter-domaines

10.2 Scalabilité multi-personnes

10.3 Robustesse

10.4 Intégration avec la 6G

10.5 Intelligence ambiante universelle

11. Conclusion

Références bibliographiques

1. Introduction

1.1 Le paradoxe de l'invisibilité perceptive

Jusqu'à récemment, le signal WiFi était conçu exclusivement comme un vecteur de transport de données binaires — un courant invisible d'informations codées dont la seule fonction reconnue était de connecter les appareils entre eux et au réseau mondial. Les ondes électromagnétiques émises par les routeurs domestiques et professionnels traversaient corps, murs et meubles sans qu'aucune valeur informationnelle ne soit attribuée à ces interactions. Les perturbations subies par le signal lors de la propagation multi-trajet étaient considérées comme du bruit à minimiser, et non comme des données à extraire.

Cependant, les recherches scientifiques de la dernière décennie ont révélé un paradoxe fondamental : ces mêmes distorsions autrefois jugées indésirables contiennent une richesse informationnelle considérable sur l'environnement physique traversé. Chaque réflexion, absorption et diffusion du signal constitue, de fait, une empreinte de l'espace et des corps qui l'occupent. Le WiFi Sensing est la discipline qui inverse la perspective traditionnelle, transformant le routeur d'un simple nœud de communication en un capteur environnemental sophistiqué, capable de « voir » à travers les obstacles opaques sans l'aide de caméras, de capteurs portables ou de tout dispositif supplémentaire.

1.2 Contexte et motivations

Le besoin de surveiller les espaces intérieurs a cru de manière exponentielle ces dernières années, porté par de multiples facteurs convergents. L'automatisation industrielle exige des systèmes de conscience spatiale pour garantir la sécurité des opérateurs sur les lignes de production. La télésanté, accélérée par la pandémie de COVID-19, nécessite des outils de surveillance continue pour les patients fragiles et âgés à domicile. Les maisons intelligentes de nouvelle génération exigent des systèmes adaptatifs qui comprennent non seulement si une pièce est occupée, mais par qui, dans quelle posture et avec quels paramètres vitaux.

Les technologies traditionnelles de détection ambiante présentent des limites structurelles significatives que le WiFi Sensing promet de surmonter. Les caméras, bien qu'offrant la meilleure résolution perceptive, soulèvent de graves problèmes de vie privée et sont inefficaces en conditions de faible éclairage ou d'occlusion. Les capteurs infrarouges passifs (PIR) ont une portée limitée, ne distinguent pas les humains des animaux domestiques et ne fournissent aucune information sur la posture ou l'identité. Les dispositifs portables (wearables) exigent un entretien constant, la conformité de l'utilisateur et cessent de fonctionner s'ils sont oubliés ou retirés. Les systèmes LiDAR et radar dédiés, bien qu'efficaces, entraînent des coûts matériels élevés et une consommation énergétique significative.

Le WiFi Sensing surmonte ces obstacles en exploitant une infrastructure déjà omniprésente et opérationnelle dans la quasi-totalité des environnements habités de la planète. Selon les estimations les plus récentes, plus de 20 milliards d'appareils WiFi actifs existent dans le monde en 2025. Cette ubiquité représente un avantage concurrentiel sans précédent : aucun nouveau matériel n'a besoin d'être installé ; il s'agit simplement d'extraire les informations déjà contenues dans les signaux existants.

1.3 Objectifs et structure du travail

Le présent travail vise à fournir une analyse complète, rigoureuse et actualisée du WiFi Sensing, organisée selon une structure multidisciplinaire reflétant la complexité intrinsèque du domaine. La Section 2 présente les fondements physiques de la propagation radio et l'architecture du Channel State Information. La Section 3 examine les architectures d'intelligence artificielle employées pour l'estimation de la pose humaine et la reconnaissance d'activités. La Section 4 explore les frontières de la biométrie passive et de l'identification individuelle. La Section 5 analyse la surveillance sans contact des signes vitaux. La Section 6 est consacrée à la norme IEEE 802.11bf. La Section 7 aborde les questions de sécurité, les attaques adverses et la vie privée. La Section 8 présente la convergence émergente entre le WiFi Sensing et les grands modèles de langage. La Section 9 illustre les domaines d'application réels. Enfin, la Section 10 trace les défis ouverts et les directions futures.

2. Fondements physiques de la propagation radio et du Channel State Information

2.1 Mécanique de la propagation multi-trajet

Le principe physique qui sous-tend le WiFi Sensing réside dans l'interaction fondamentale entre les ondes électromagnétiques et la matière. Un signal WiFi, transmis dans les bandes de fréquences à 2,4 GHz, 5 GHz et, plus récemment, 6 GHz, ne parcourt pas un chemin rectiligne unique de l'émetteur au récepteur. Au contraire, les ondes radio subissent une série complexe de phénomènes physiques lors de la propagation : réflexion sur les surfaces rigides (murs, sols, meubles), diffraction autour des arêtes, diffusion sur les surfaces irrégulières et absorption par les matériaux à forte teneur en eau.

Le corps humain, composé d'environ 60 % d'eau, agit comme un obstacle dynamique particulièrement significatif pour les ondes radio aux fréquences WiFi. La constante diélectrique de l'eau à 2,4 GHz est d'environ 80, soit des ordres de grandeur supérieurs à celle de l'air (environ 1). Cela signifie que le corps humain réfléchit, absorbe et fait écran à une proportion significative de l'énergie électromagnétique incidente. Lorsqu'une personne se déplace dans un environnement, elle modifie dynamiquement les chemins de propagation du signal, générant des variations mesurables dans la réponse du canal radio.

Le résultat est le phénomène de propagation multi-trajet : le signal transmis atteint le récepteur via des centaines, voire des milliers de trajectoires distinctes, chacune avec un retard temporel, une atténuation et un déphasage spécifiques. La superposition cohérente de tous ces trajets au récepteur génère un motif d'interférence complexe qui varie en fonction de la géométrie de l'environnement et de la position des corps en son sein.

2.2 Du RSSI au CSI : une révolution en granularité

Pendant des décennies, le seul indicateur de qualité du canal radio couramment accessible était le Received Signal Strength Indicator (RSSI), une mesure scalaire de la puissance globale du signal reçu. Le RSSI présente des limites fondamentales pour la détection : en tant que valeur unique agrégée, il ne peut distinguer les variations induites par différentes sous-porteuses ni capturer les informations de phase, ce qui le rend sensible au bruit et aux fluctuations environnementales.

La véritable révolution est arrivée avec le Channel State Information (CSI), rendu accessible à partir de la norme IEEE 802.11n et de ses successeurs. Dans les normes WiFi modernes, la transmission utilise la technologie OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), qui divise le canal radio en multiples sous-porteuses orthogonales. Le CSI capture la réponse du

canal pour chaque sous-porteuse individuelle, fournissant une description vectorielle complexe du canal radio :

$$H(f, t) = A(f, t) \cdot e^{j\varphi(f, t)}$$

où H est la réponse fréquentielle du canal, $A(f, t)$ représente l'amplitude de la sous-porteuse à la fréquence f et au temps t , et $\varphi(f, t)$ la phase correspondante. Dans un système WiFi à 56 sous-porteuses et 3 antennes, le CSI produit une matrice 3×56 de valeurs complexes pour chaque paquet reçu, avec un débit d'acquisition pouvant atteindre 1 000 paquets par seconde.

Cette granularité spectrale et temporelle est la clé qui a ouvert la porte au WiFi Sensing moderne. En analysant la variation temporelle de la matrice CSI sur l'ensemble des sous-porteuses et des antennes, il devient possible d'isoler les fréquences Doppler induites par les mouvements humains, en les séparant de la contribution statique de l'environnement.

2.3 Le modèle de Fresnel et la sensibilité aux micro-mouvements

Un aspect souvent négligé dans la littérature de vulgarisation, mais fondamental pour comprendre la sensibilité du WiFi Sensing, est le modèle des zones de Fresnel. Lorsqu'un corps se déplace dans la première zone de Fresnel entre l'émetteur et le récepteur — la région ellipsoïdale où la différence de chemin optique est inférieure à une demi-longueur d'onde — les variations du CSI sont maximales. À 5 GHz, la longueur d'onde est d'environ 6 cm, ce qui signifie que des déplacements de l'ordre de quelques centimètres peuvent générer des variations de phase significatives.

Cette sensibilité submillimétrique de la phase est ce qui rend possible la surveillance des micro-mouvements : les oscillations de la cage thoracique pendant la respiration (amplitude typique : 4–12 mm) et les pulsations cardiaques transmises à la surface du corps (amplitude typique : 0,2–0,5 mm). Le ratio CSI (CSI-ratio), calculé entre des antennes co-localisées, élimine le bruit ambiant commun et isole les variations induites exclusivement par le mouvement de la cible.

3. Architectures d'intelligence artificielle pour le WiFi Sensing

3.1 Du signal brut à la compréhension sémantique

Le CSI produit un flux de données intrinsèquement complexe et bruité. Les données brutes contiennent des contributions superposées provenant de sources statiques (murs, meubles), d'interférences électromagnétiques et des mouvements humains d'intérêt. L'intelligence artificielle intervient pour résoudre ce que la physique appelle un problème inverse : à partir des perturbations du signal reçu, elle reconstruit la cause qui les a générées, à savoir la position, la pose et l'identité des êtres humains dans l'environnement.

L'évolution des architectures d'IA appliquées au WiFi Sensing peut être divisée en trois générations distinctes. La première génération (2015–2018) s'appuyait sur des méthodes traditionnelles d'apprentissage automatique : machines à vecteurs de support (SVM), forêts aléatoires et modèles de mélange gaussien, alimentés par des caractéristiques extraites manuellement des données CSI (variance, entropie, coefficients de la transformée en ondelettes). Ces méthodes atteignaient des précisions de 80–90 % dans la reconnaissance d'activités macro (marcher, s'asseoir, se tenir debout), mais se révélaient fragiles face aux changements d'environnement.

La deuxième génération (2018–2022) a introduit l'apprentissage profond de bout en bout. Les réseaux de neurones convolutifs (CNN) traitent les données CSI comme des images bidimensionnelles — des spectrogrammes temps-fréquence — identifiant des motifs discriminants sans ingénierie manuelle de caractéristiques. Les réseaux récurrents (LSTM, GRU, BiGRU) capturent les dépendances temporelles dans les séquences CSI, particulièrement efficaces pour reconnaître les activités cycliques comme la marche. Des architectures hybrides CNN-LSTM combinent les avantages des deux approches.

La troisième génération (2022–présent) se caractérise par l'adoption d'architectures Transformer et de mécanismes d'attention, capables de modéliser les relations globales dans les données CSI et de mieux généraliser à travers des environnements divers. Les Transformers excellent dans la capture des corrélations à longue portée entre sous-porteuses et instants temporels, dépassant les limites du champ récepteur local des CNN.

3.2 DensePose from WiFi : l'estimation de la pose dense

L'étude fondatrice « DensePose from WiFi », publiée en janvier 2023 par une équipe de l'Université Carnegie Mellon, a constitué un jalon dans le domaine. Les chercheurs ont démontré qu'il est possible d'estimer la pose dense du corps humain — c'est-à-dire la correspondance point à point entre la surface corporelle 2D et le modèle 3D — en utilisant exclusivement des signaux WiFi standard, sans aucune caméra.

L'architecture proposée se déroule en trois phases principales. Dans la première phase, les échantillons CSI bruts (amplitude et phase) provenant de trois antennes réceptrices sont nettoyés par des algorithmes de purification du signal. Dans la deuxième phase, un encodeur-décodeur à deux branches traduit les échantillons CSI purifiés en cartes de caractéristiques 2D qui émulent celles extraites d'images conventionnelles. Dans la troisième phase, une architecture DensePose-RCNN modifiée utilise ces caractéristiques 2D pour estimer des cartes UV du corps humain, représentant la correspondance dense entre les coordonnées 2D et la surface 3D du corps.

Un élément clé de l'approche est l'apprentissage par transfert : le modèle est pré-entraîné sur DensePose basé sur des images, puis adapté pour accepter des entrées WiFi. Cela permet d'exploiter la riche connaissance de la structure du corps humain acquise par le modèle visuel. Lors des expériences, le système a atteint une précision moyenne (AP) de 87,2 % au seuil IoU de 50 %, démontrant des performances comparables aux systèmes basés sur caméras pour la détection de la position des personnes.

3.3 RF-Pose et Person-in-WiFi : les précurseurs

Avant DensePose from WiFi, deux études fondatrices ont ouvert la voie à l'estimation de la pose humaine par signaux radio. RF-Pose, développé au MIT CSAIL en 2018, a introduit pour la première fois l'utilisation de signaux radio pour l'estimation de la pose du squelette humain à travers des obstacles opaques. En utilisant un dispositif radio spécifique opérant aux fréquences sub-6 GHz, RF-Pose a démontré qu'il est possible de détecter 14 points clés du corps humain à travers les murs, avec une précision approchant celle des systèmes basés sur caméras en ligne de vue directe.

Person-in-WiFi (2019) a confirmé la faisabilité de l'identification de la forme et de l'identité du corps humain à partir exclusivement des données CSI extraites de routeurs commerciaux. Cette étude a montré que les signaux WiFi standard contiennent suffisamment d'informations pour la segmentation corporelle et la localisation des personnes, sans nécessiter de matériel spécialisé.

3.4 Implémentations open source et démocratisation

Une évolution récente remarquable est l'apparition d'implémentations open source rendant le WiFi Sensing accessible aux chercheurs et développeurs. Le projet RuView, par exemple, a réimplémenté l'architecture DensePose from WiFi en Rust, atteignant une vitesse de traitement de 54 000 images par seconde. Le système fonctionne sur des microcontrôleurs ESP32 coûtant environ 9 dollars, démontrant que le WiFi Sensing peut fonctionner sur du matériel à très bas coût, sans connexion cloud, avec un traitement entièrement embarqué.

4. Biométrie passive : l'identité dans le signal

4.1 L'empreinte digitale sans fil

Au-delà de la macro-analyse du mouvement, la recherche s'aventure dans l'un des territoires les plus fascinants et simultanément controversés du WiFi Sensing : la biométrie passive. Le principe fondamental est que chaque individu possède une masse corporelle, une taille, une démarche et une géométrie squelettique uniques, qui produisent des perturbations CSI caractéristiques et potentiellement identifiantes. En substance, la manière dont une personne perturbe un champ électromagnétique peut servir d'« empreinte digitale sans fil ».

La littérature récente documente une intense activité de recherche dans ce domaine. Une revue systématique publiée en 2024 sur PMC a structuré les trois phases principales de l'identification humaine basée sur le WiFi : la collecte des données CSI, le prétraitement (incluant l'extraction de caractéristiques liées à la démarche, aux gestes, à la biométrie radio et à la fréquence respiratoire) et la classification par modèles d'apprentissage automatique.

4.2 Reconnaissance de la démarche (Gait Recognition)

La reconnaissance de la démarche est considérée comme le mécanisme biométrique le plus prometteur pour le WiFi Sensing, car elle implique le mouvement du corps entier, est difficile à falsifier et ne nécessite aucune interaction ni coopération de la part du sujet. Des systèmes tels que WiWho, WiFi-ID et WiGait ont démontré la faisabilité de l'identification individuelle en analysant les cycles de marche reflétés dans les motifs CSI.

GaitFi a proposé une approche multimodale innovante combinant signaux WiFi et vidéo pour l'identification humaine, utilisant un Lightweight Residual Convolution Network comme réseau principal. Les résultats ont montré que la fusion des deux modalités perceptives améliore significativement la robustesse par rapport aux systèmes unimodaux, en particulier en conditions d'éclairage défavorables.

Des approches plus récentes, telles que NeuralWave et HumanFi, adoptent l'apprentissage profond pour extraire automatiquement des caractéristiques discriminantes du CSI brut, dépassant les limites des classificateurs traditionnels basés sur des caractéristiques artisanales. NeuralWiGait intègre CNN et BiGRU (Bidirectional Gated Recurrent Unit) dans un cadre hybride capable de capturer simultanément les caractéristiques spatiales et temporelles de la démarche, atteignant des précisions supérieures à 95 % en environnements contrôlés.

4.3 Vers l'identification par ondes millimétriques

Une frontière émergente est l'utilisation du WiFi à ondes millimétriques (mmWave) à 60 GHz pour l'identification des personnes. La recherche récente a démontré que le CSI à 60 GHz

surpasse significativement les performances du CSI à 5 GHz pour l'identification personnelle, grâce à la haute sensibilité spatiale des ondes millimétriques. Des modèles tels que TemporalConvNet et CNN-BiLSTM avec attention temporelle atteignent des précisions de 93–96 % sur des données à 60 GHz, indiquant que le WiFi de prochaine génération (Wi-Fi 7 et au-delà) apportera des améliorations substantielles en biométrie sans fil.

4.4 Authentification palmaire par WiFi

Une application particulièrement innovante est HandPass, un système d'authentification basé sur le scan CSI de la paume de la main. En utilisant un Raspberry Pi avec une puissance d'antenne réduite à 1 dBm, les chercheurs ont acquis des données CSI à partir des mains de 20 participants, exploitant les caractéristiques biophysiques de la main (taille, forme, écartement angulaire des doigts, longueur des phalanges) comme marqueurs biométriques. Les altérations spécifiques du signal électromagnétique causées par la géométrie unique de chaque main produisent une empreinte CSI identifiante utilisable pour le contrôle d'accès.

5. Surveillance sans contact des signes vitaux

5.1 Le routeur comme dispositif de diagnostic passif

L'une des applications les plus prometteuses du WiFi Sensing est la surveillance sans contact des paramètres vitaux : fréquence respiratoire et fréquence cardiaque. Le principe physique exploité est la sensibilité submillimétrique de la phase CSI aux micro-mouvements de la paroi thoracique et de la surface corporelle induits par l'activité cardio-pulmonaire.

La respiration génère des oscillations de la paroi thoracique d'une amplitude typique de 4–12 mm et d'une fréquence de 12–20 respirations par minute chez l'adulte sain. L'activité cardiaque génère des micro-vibrations d'une amplitude de 0,2–0,5 mm et d'une fréquence de 60–100 battements par minute. Ces deux signaux modulent la phase du CSI de manière détectable, à condition que le bruit ambiant et le fouillis statique soient adéquatement éliminés.

5.2 Techniques d'extraction des signaux vitaux

La recherche a développé deux approches principales pour la surveillance respiratoire. La première utilise le traitement du signal CSI dans le domaine complexe, en appliquant des filtres passe-bande et une analyse spectrale (FFT) pour isoler les composantes fréquentielles correspondant à la respiration. La seconde approche, plus récente, exploite l'analyse de la trajectoire du ratio CSI dans le plan complexe, où le mouvement respiratoire génère des trajectoires elliptiques caractéristiques.

Pour la surveillance cardiaque, les défis sont plus importants en raison de la faible amplitude des vibrations. Les techniques avancées comprennent la projection rotatoire combinée à la sélection adaptative des sous-porteuses (HSR subcarrier selection) et les réseaux CNN de bout en bout qui apprennent directement la mise en correspondance des données CSI brutes avec la fréquence cardiaque. Des systèmes hybrides combinant CSI WiFi et données mmWave ont atteint des précisions de 99 % dans la surveillance des signes vitaux en conditions contrôlées.

5.3 Applications cliniques et domiciliaires

La surveillance sans contact des signes vitaux possède un potentiel transformateur dans de multiples contextes cliniques. En milieu hospitalier, en particulier dans les unités de soins intensifs néonataux (USIN), la surveillance sans contact élimine l'inconfort et le risque d'infection associés aux capteurs adhésifs traditionnels. Dans les établissements de soins de longue durée, la surveillance continue et invisible des paramètres vitaux permet la détection précoce de la détérioration de l'état de santé. Une étude portant sur 612 résidents dans cinq établissements de soins a démontré que la surveillance sans contact par radar peut prédire 77 %

des hospitalisations avec un délai moyen de 5,6 jours, et 89 % de celles dues à des affections respiratoires ou cardiaques.

En milieu domiciliaire, le WiFi Sensing peut surveiller la qualité du sommeil en analysant les schémas respiratoires nocturnes, détecter les apnées et fournir des alertes en cas d'anomalies sans nécessiter de dispositif portable. Cette capacité à transformer le routeur domestique en dispositif de diagnostic passif représente un changement de paradigme dans les soins de santé préventifs.

6. La norme IEEE 802.11bf : le WiFi devient capteur natif

6.1 Genèse et processus de normalisation

Jusqu'à récemment, le WiFi Sensing était limité par l'absence d'API normalisées et l'hétérogénéité des implémentations propriétaires. Le besoin d'un cadre unifié a conduit à la formation du groupe de travail IEEE 802.11bf, discuté pour la première fois au sein du comité permanent Wireless LAN Next-Generation en juillet 2019. Le projet a été officiellement autorisé en septembre 2020, avec l'objectif de créer un amendement à la norme IEEE 802.11 permettant nativement les fonctionnalités de détection.

Le processus de normalisation a traversé de nombreux cycles de révision : le Draft 0.1 a été publié en avril 2022, suivi de multiples scrutins avec des taux d'approbation croissants (jusqu'à 96 % lors de la deuxième recirculation SA de novembre 2024). La norme IEEE 802.11bf-2025 a été officiellement publiée le 26 septembre 2025, marquant la transition définitive du WiFi d'un moyen de communication à une plateforme de détection.

6.2 Architecture technique de la norme

L'amendement IEEE 802.11bf définit des modifications de la couche de contrôle d'accès au support (MAC) et des interfaces de service de la couche physique (PHY) pour les modes High Efficiency (HE), Extremely High Throughput (EHT), Directional Multi-Gigabit (DMG) et Enhanced DMG (EDMG). Les bandes opérationnelles couvertes comprennent les fréquences exemptes de licence entre 1 GHz et 7,125 GHz (2,4, 5 et 6 GHz) et au-dessus de 45 GHz.

Le cadre de détection WLAN défini par la norme est structuré autour de cinq phases opérationnelles principales : la mise en place de la session de détection (Sensing Session Setup), où deux ou plusieurs stations (STA) négocient les paramètres ; la configuration de la mesure (Sensing Measurement Setup) ; l'instance de mesure (Sensing Measurement Instance), phase d'acquisition proprement dite des données CSI ; la terminaison de la mesure (Sensing Measurement Termination) ; et enfin, la phase de traitement des résultats.

6.3 Détection bistatique et multistatique

L'une des innovations clés de la norme est la prise en charge des configurations de détection bistatiques et multistatiques. En détection monostatique, l'émetteur et le récepteur sont le même appareil ; en détection bistatique, ce sont des appareils séparés ; en détection multistatique, plusieurs appareils de différents fabricants collaborent pour construire une carte perceptive tridimensionnelle de l'environnement. Cette interopérabilité multi-fournisseurs est la caractéristique qui transformera l'écosystème WiFi d'un réseau de points d'accès indépendants en un maillage perceptif distribué.

La norme garantit également la rétrocompatibilité avec les dispositifs IEEE 802.11 existants, permettant une transition progressive. Les routeurs de nouvelle génération pourront alterner des cycles de transmission de données avec des cycles de balayage environnemental à haute fréquence, avec une optimisation du partage temporel minimisant la dégradation des performances de communication.

7. Sécurité, attaques adverses et implications en matière de vie privée

7.1 Le paradoxe de la vie privée dans le WiFi Sensing

Le WiFi Sensing présente un paradoxe éthique fondamental : la même technologie qui promet d'améliorer la sécurité et la santé sans violer la vie privée visuelle peut, paradoxalement, devenir un instrument de surveillance invisible encore plus envahissant que les caméras. Un attaquant disposant d'un accès à un dispositif WiFi peut, en théorie, détecter la présence, le mouvement, les activités et même les frappes au clavier d'une victime sans que celle-ci en ait conscience.

La recherche a démontré que les jeux de données publics de WiFi Sensing contiennent des informations privées involontaires. Des études ont montré que les jeux de données de reconnaissance de gestes et d'activités peuvent révéler des attributs privés des utilisateurs, tels que la taille, le poids et le genre, lorsqu'ils sont soumis à des attaques ciblées. Le retour de formation de faisceau (beamforming feedback), transmis en clair dans la norme 802.11ac et ses itérations ultérieures, aggrave encore l'exposition à la vie privée, permettant des inférences plus précises sur les frappes au clavier et les mots de passe.

7.2 Taxonomie des attaques

Une revue systématique publiée en 2025 a proposé une classification systématique des attaques contre les systèmes WiFi Sensing selon trois rôles : le système sans fil comme victime, comme arme et comme bouclier. En analysant plus de 200 publications de 2020 à 2024, les chercheurs ont identifié de multiples vecteurs d'attaque menaçant la fiabilité et la sécurité des systèmes de détection.

Les attaques contre la cible de détection comprennent les attaques statiques (utilisation de surfaces réfléchissantes intelligentes pour modifier la propagation), les attaques dynamiques (injection de mouvements contrôlés dans l'environnement) et les attaques adverses (perturbations optimisées pour tromper les modèles d'apprentissage profond). Les attaques contre la source de détection comprennent le brouillage, l'usurpation et la manipulation des symboles pilotes des paquets WiFi. Le cadre WiIntruder a démontré la faisabilité d'attaques perturbatives universelles capables de dégrader simultanément les performances de multiples applications de détection, y compris l'authentification des utilisateurs et la surveillance respiratoire.

7.3 Contre-mesures et défenses

La communauté scientifique a répondu par une série de contre-mesures. Les systèmes d'obfuscation du CSI, tels qu'AntiSense et IRShield, introduisent de l'aléatoire spatial dans le signal pour empêcher la détection non autorisée tout en préservant la qualité de la communication. Des approches plus récentes proposent des techniques de randomisation du canal définies à la source (source-defined channel randomization) qui varient dans le temps les filtres appliqués au signal, empêchant un attaquant de construire un modèle stable de l'environnement.

Sur le plan réglementaire, la question de la vie privée dans le WiFi Sensing reste largement inexplorée au niveau législatif. Le RGPD européen pourrait être applicable dans la mesure où les données CSI traitées permettent l'identification de personnes spécifiques, mais la jurisprudence établie fait défaut. La norme IEEE 802.11bf inclut un amendement séparé (802.11bh) spécifiquement dédié à la protection de la vie privée des utilisateurs, mais les détails d'implémentation restent en cours de développement.

8. La convergence du WiFi Sensing et des grands modèles de langage

8.1 Un nouveau paradigme : Wi-Chat et IoT-LLM

L'une des frontières les plus récentes et conceptuellement les plus disruptives du WiFi Sensing est son intégration avec les grands modèles de langage (LLM). L'année 2025 a vu la publication de Wi-Chat, le premier système de reconnaissance d'activités humaines basé sur le WiFi et alimenté par un LLM. Wi-Chat démontre que les modèles de langage peuvent traiter des signaux WiFi bruts et inférer des activités humaines en intégrant les principes physiques du WiFi Sensing dans les invites (prompts), sans recourir aux techniques traditionnelles de traitement du signal.

L'approche est conceptuellement révolutionnaire : au lieu d'entraîner un réseau de neurones spécialisé pour chaque tâche de détection, Wi-Chat exploite la capacité de raisonnement zéro-shot des LLM, les guidant avec des connaissances physiques sur la propagation des signaux. Les résultats expérimentaux montrent que les LLM peuvent atteindre des performances significatives dans la reconnaissance d'activités, ouvrant un paradigme dans lequel la compréhension du monde physique est médiatisée par la compétence linguistique du modèle.

8.2 IoT-LLM : raisonnement sur les données capteurs du monde réel

Le cadre IoT-LLM, publié dans Patterns (Cell Press) fin 2025, élargit cette vision en proposant un système unifié dans lequel les LLM raisonnent sur des données IoT hétérogènes, y compris les données CSI WiFi à haute dimensionnalité (forme typique : $T \times 3 \times 114$, où T est la longueur temporelle, 3 les antennes et 114 les sous-porteuses). Le cadre utilise des techniques de compression et de réduction dimensionnelle (ACP) pour transformer les données CSI en représentations textualisées compatibles avec l'entrée des LLM.

L'évaluation du cadre sur cinq tâches IoT réelles — incluant la reconnaissance d'activités humaines par WiFi et la localisation intérieure basée sur le WiFi — a démontré que les LLM, lorsqu'ils sont correctement guidés, peuvent rivaliser avec des modèles spécialisés sur des tâches sensorielles traditionnelles. Cette convergence entre le traitement du langage naturel et la détection physique ouvre la voie à des Personal Health LLMs (Ph-LLMs) capables d'interpréter en continu les données WiFi pour la surveillance proactive de la santé.

8.3 Implications pour l'intelligence ambiante

L'intégration LLM-WiFi Sensing pourrait transformer radicalement le concept d'intelligence ambiante. Dans un scénario futur, un système domestique pourrait non seulement détecter qu'une personne âgée est tombée (détection), mais aussi raisonner sur le contexte («

l'utilisateur est tombé dans la salle de bain à 3 heures du matin, ne s'est pas relevé depuis 2 minutes, la fréquence cardiaque est irrégulière »), générer une alerte en langage naturel au personnel médical et communiquer verbalement avec la victime via un assistant vocal — le tout sans aucun dispositif portable ni caméra.

9. Domaines d'application réels

9.1 Sécurité invisible et détection d'intrusions

Le WiFi Sensing permet la détection d'intrusions sans zones mortes et avec la capacité de distinguer les humains des animaux domestiques grâce à l'analyse de la silhouette et de la démarche reflétées dans le signal. Contrairement aux capteurs PIR conventionnels, un système WiFi Sensing peut opérer à travers les murs, couvrir un logement entier avec une seule paire émetteur-récepteur et fournir des informations sur la localisation et l'identité de l'intrus.

9.2 Soins intelligents et détection des chutes

La surveillance continue des personnes fragiles dans des environnements sensibles représente peut-être l'application la plus urgente et la plus socialement pertinente. Dans les salles de bain, où l'utilisation de caméras est proscrite pour des raisons éthiques et où le risque de chute est le plus élevé, le WiFi Sensing offre une solution unique : surveillance continue de la présence, de la posture et des signes vitaux sans aucune intrusion visuelle. La détection des chutes est déjà l'un des cas d'usage les plus matures, avec des systèmes commerciaux basés sur le WiFi atteignant des sensibilités supérieures à 95 %.

9.3 Gestion énergétique adaptative

L'optimisation des systèmes CVC (chauffage, ventilation et climatisation) et de l'éclairage fondée sur l'occupation spatiale réelle et la posture des utilisateurs représente une application à impact économique significatif. Contrairement aux capteurs d'occupation binaires, le WiFi Sensing peut déterminer le nombre exact de personnes dans une pièce, leurs positions et leur niveau d'activité, permettant des ajustements énergétiques granulaires et prédictifs.

9.4 Interaction homme-machine et reconnaissance de gestes

La reconnaissance des gestes par WiFi permet le contrôle sans contact et sans dispositif des appareils intelligents. L'utilisateur peut contrôler les lumières, les appareils électroménagers et les systèmes de divertissement par de simples gestes dans l'air. La recherche a démontré la reconnaissance fiable du langage des signes via WiFi (SignFi), ouvrant des possibilités de communication assistive pour les personnes souffrant de déficience auditive.

9.5 Automobile et détection embarquée

Le WiFi Sensing s'étend également au contexte véhiculaire. Le système V2iFi a démontré la faisabilité de la surveillance des signes vitaux à l'intérieur d'un véhicule au moyen de signaux WiFi, permettant la détection des états de somnolence du conducteur, la surveillance des passagers et l'ajustement automatique des systèmes de confort sans capteurs dédiés.

10. Défis ouverts et directions futures

10.1 Généralisation inter-domaines

Le défi le plus significatif pour le WiFi Sensing demeure la généralisation inter-domaines : les modèles entraînés dans un environnement spécifique (une pièce avec un agencement mobilier particulier et un positionnement spécifique des appareils) tendent à se dégrader significativement lorsqu'ils sont transférés dans un environnement différent. La variabilité de la géométrie environnementale, des conditions de propagation et des caractéristiques matérielles des appareils fait de la généralisation un problème de recherche ouvert.

Les approches prometteuses incluent l'adaptation de domaine non supervisée, l'apprentissage fédéré pour l'entraînement distribué sur des environnements multiples tout en préservant la vie privée, et les architectures fondées sur des modèles physiques qui intègrent la connaissance de la propagation radio dans la structure du réseau de neurones, réduisant la dépendance aux données d'entraînement spécifiques à l'environnement.

10.2 Scalabilité multi-personnes

Les systèmes actuels montrent des performances déclinantes lorsque le nombre de personnes dans l'environnement dépasse 3 à 5. La séparation des contributions individuelles dans le signal CSI en scénarios encombrés exige des avancées dans les techniques de formation de faisceau, la résolution spatiale des systèmes MIMO et les architectures d'attention multi-cibles.

10.3 Robustesse et sécurité

Comme documenté dans la Section 7, la vulnérabilité aux attaques adverses représente un obstacle significatif pour le déploiement dans des applications critiques pour la sécurité. Les recherches futures devront développer des architectures intrinsèquement robustes, des techniques de certification formelle de la robustesse et des protocoles d'authentification mutuelle entre les dispositifs de détection.

10.4 Intégration avec la 6G et les réseaux de prochaine génération

Les réseaux de sixième génération (6G), attendus vers 2030, intégreront nativement des capacités de détection dans la communication (Integrated Sensing and Communication, ISAC). Le WiFi Sensing, avec la norme 802.11bf, anticipe cette convergence dans le domaine des réseaux locaux. L'interopérabilité entre le WiFi Sensing et la détection cellulaire (5G NR et 6G) créera des écosystèmes perceptifs multi-échelles, du niveau de la pièce (WiFi) au niveau urbain (cellulaire).

10.5 Vers l'intelligence ambiante universelle

La vision à long terme est celle d'une intelligence ambiante universelle, dans laquelle chaque environnement connecté — d'une simple pièce à un bâtiment entier, d'un véhicule à une ville — serait doté d'une conscience perceptive native, sans capteurs dédiés. Avec l'adoption de la norme IEEE 802.11bf, déjà publiée, et l'évolution des grands modèles de langage vers l'interprétation des données sensorielles, cette vision passe rapidement de la spéculation académique à la réalité ingénierie.

Le défi futur ne sera plus la couverture du signal, mais sa résolution perceptive : un monde dans lequel l'énergie invisible qui nous connecte sert également de gardien silencieux de notre sécurité et de notre santé, équilibrant les promesses de l'innovation avec le respect incontournable de la vie privée et de la dignité humaine.

11. Conclusion

Le WiFi Sensing représente la convergence définitive des télécommunications, de l'intelligence artificielle et de la perception spatiale. Avec la publication de la norme IEEE 802.11bf en septembre 2025, le WiFi a officiellement cessé d'être exclusivement un moyen de communication pour devenir une plateforme de détection native, normalisée et interopérable.

La présente analyse a documenté comment cette transformation est soutenue par de solides fondements physiques (la sensibilité submillimétrique de la phase CSI), des architectures d'IA de plus en plus sophistiquées (des CNN aux Transformers, de l'apprentissage par transfert aux LLM), des applications d'une pertinence sociale immédiate (surveillance des personnes âgées, détection des chutes, santé intelligente) et un écosystème de recherche en expansion rapide.

Parallèlement, ce travail a mis en évidence les défis significatifs qui subsistent : la généralisation inter-domaines, la scalabilité multi-personnes, la robustesse aux attaques adverses et, surtout, le paradoxe éthique d'une technologie qui promet la vie privée visuelle tout en permettant potentiellement une surveillance encore plus envahissante. La communauté scientifique et les législateurs devront travailler en synergie pour garantir que l'intelligence ambiante du futur soit non seulement techniquement efficace, mais éthiquement durable.

En conclusion, le WiFi Sensing n'est pas simplement une nouvelle fonctionnalité ajoutée aux routeurs : c'est un changement de paradigme dans la relation entre les êtres humains et l'environnement électromagnétique qui les entoure. Pour la première fois dans l'histoire de la technologie, l'énergie invisible qui nous connecte peut également nous comprendre.

Références bibliographiques

- [1] J. Geng, D. Huang, F. De La Torre, "DensePose From WiFi," arXiv:2301.00250, Carnegie Mellon University, 2023.
- [2] M. Zhao, T. Li, M. Abu Alsheikh, Y. Tian, H. Zhao, A. Torralba, D. Katabi, "Through-Wall Human Pose Estimation Using Radio Signals (RF-Pose)," MIT CSAIL, CVPR 2018.
- [3] F. Wang, S. Zhou, S. Panev, J. Han, D. Huang, "Person-in-WiFi: Fine-grained Person Perception Using WiFi," ICCV 2019.
- [4] T. Ropitault, S. Blandino, A. Sahoo, N. Golmie, "IEEE 802.11bf: Enabling the Widespread Adoption of Wi-Fi Sensing," IEEE Communications Standards Magazine, 2023.
- [5] Y. Ma, G. Zhou, S. Wang, H. Zhao, W. Jung, "An Overview on IEEE 802.11bf: WLAN Sensing," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2024.
- [6] IEEE Std 802.11bf-2025, "Amendment 4: Enhancements for Wireless LAN Sensing," IEEE Standards Association, Publié le 26 septembre 2025.
- [7] X. Liu, X. Meng, H. Duan, Z. Hu, M. Wang, "A Survey on Secure WiFi Sensing Technology: Attacks and Defenses," Sensors, 25(6), 1913, 2025.
- [8] M. Alhazbi et al., "WiFi-Based Human Identification with Machine Learning: A Comprehensive Survey," PMC, 2024.
- [9] H. Zhang, et al., "Wi-Chat: Large Language Model Powered Wi-Fi Sensing," arXiv:2502.12421, 2025.
- [10] T. Zhu, et al., "IoT-LLM: A Framework for Enhancing Large Language Model Reasoning from Real-World Sensor Data," Patterns (Cell Press), 2025.
- [11] Y. Lang, et al., "GaitFi: Robust Device-Free Human Identification via WiFi and Videos," IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games, 2022.
- [12] J. Jiang, S. Jiang, Y. Liu, et al., "Wi-Gait: Pushing the Limits of Robust Passive Personnel Identification Using Wi-Fi Signals," Computer Networks, 229, 2023.
- [13] Z. Wu, et al., "NeuralWiGait: An Accurate WiFi-based Gait Recognition System Using Hybrid Deep Learning Framework," The Journal of Supercomputing, 2025.
- [14] N. Bhat, et al., "Beyond Sub-6 GHz: Leveraging mmWave Wi-Fi for Gait-Based Person Identification," arXiv:2510.08160, 2025.
- [15] L. Silva, et al., "HandPass: A Wi-Fi CSI Palm Authentication Approach for Access Control," arXiv:2510.22133, 2025.
- [16] S. Zhou, W. Zhang, et al., "Adversarial WiFi Sensing for Privacy Preservation of Human Behaviors," IEEE Communications Letters, 24(2), 2020.
- [17] C. Li, M. Xu, et al., "Practical Adversarial Attack on WiFi Sensing Through Unnoticeable Communication Packet Perturbation," ACM MobiCom, 2024.
- [18] Y. Zhou, C. Li, et al., "RIStealth: Practical and Covert Physical-Layer Attack Against WiFi-Based Intrusion Detection via RIS," ACM SenSys, 2023.
- [19] M. Cominelli, F. Gringoli, R. Lo Cigno, "AntiSense: Standard-Compliant CSI Obfuscation Against Unauthorized Wi-Fi Sensing," Computer Communications, 185, 2022.
- [20] J. Chen, et al., "Privacy-preserving WiFi Sensing in WSNs via CSI Obfuscation," Computers & Security, 2025.

- [21] Y. Shi, X. Zhang, L. Fu, H. Zhang, "An Investigation of the Private-Attribute Leakage in WiFi Sensing," *High-Confidence Computing*, 4, 2024.
- [22] M. S. Raheel, et al., "Contactless Vital Sign Monitoring Systems: A Comprehensive Survey," *Sensors & Diagnostics*, RSC Publishing, 2024.
- [23] J. Sun, X. Bian, M. Li, "Non-Contact Heart Rate Monitoring Method Based on Wi-Fi CSI Signal," *Sensors*, 2024.
- [24] P. Sruthi, S. K. Udgata, "Wi-Fi Sensing Based Person Identification and Activity Recognition Using Two-Phase Deep Learning Model," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 132, 2024.
- [25] L. Zhang, et al., "A Comprehensive Survey on Wi-Fi Sensing for Human Identity Recognition," *Electronics*, 12(23), 4858, 2023.
- [26] S. Shang, et al., "WirelessLLM: Empowering Large Language Models Towards Wireless Intelligence," arXiv:2405.17053, 2024.
- [27] RuView Project, "WiFi DensePose: Real-time Human Pose Estimation via WiFi Signals," GitHub, 2025.
- [28] R. K. Liu, et al., "Origin Wireless AI: IEEE 802.11bf WiFi Sensing Project," *Origin Wireless AI*, 2022-2025.
- [29] L. Lu, et al., "An Imperceptible Eavesdropping Attack on WiFi Sensing Systems," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 32, 2024.
- [30] Y. Chen, et al., "A Survey of Wireless Sensing Security from a Role-Based View: Victim, Weapon, and Shield," arXiv:2412.03064, 2024.
- [31] L. Xu, et al., "Integration of LLMs and the Physical World: Research and Application," *ACM Digital Library*, 2024.
- [32] Tapestry Health / Neteera Technologies, "Étude collaborative sur la surveillance à distance sans contact dans les établissements de soins de longue durée : 612 résidents," 2025.
- [33] T. Zheng, Z. Chen, C. Cai, J. Luo, X. Zhang, "V2iFi: In-Vehicle Vital Sign Monitoring via Compact RF Sensing," 2020.
- [34] WhoFi: WiFi-Based Person Identification Using Deep Neural Networks with Transformer Encoding, NTU-Fi Dataset, Précision jusqu'à 95,5 %, 2025.
- [35] IEEE 802.11bh-2024, "Amendment: Enhancements for User Privacy Protection," Publié le 3 juin 2025.