

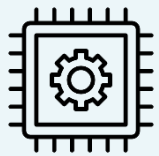
Audition CRCN CNRS – Concours n°06/02

Samir SI-MOHAMMED

Projet : **Jumeaux Numériques pour des Réseaux Sans-fil Optimisés**

Laboratoires d'accueil : **ICube**, LIG, IRISA

Profil



Fondamentaux

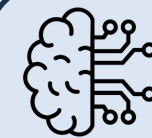
- Algorithmique
- Modélisation
- Développement Logiciel



Réseaux Sans-fil

- Multi-technologies
- Simulation
- **Expérimentation**

 **NS-3**



Intelligence Artificielle

- Optimisation
- Apprentissage automatique
- Apprentissage profond

Domaine de Recherche

- ❖ **Réseau sans-fil** : Interconnexion d'équipement finaux et passerelles, à l'aide de technologies de communication sans-fil



- **Objectifs : Compromis** entre **performances**, **fiabilité** et **coût** des communications
 - Énergie, coût financier, ressources radio, etc.
- **Caractéristiques des réseaux sans-fil :**
 - Variabilité du canal radio (atténuation, interférences, obstacles, etc.)
 - Ressources limitées partagées (accès concurrentiel, etc.)
 - Environnement dynamique (topologie, trafic, etc.)**➔ Difficulté de prédiction des performances du réseau**
- **Question de Recherche :** Comment concevoir une **modélisation précise** des performances d'un réseau, en tenant compte de sa **variabilité** ?

Parcours Académique + Contributions

2015 – 2020



Ingénieur + Master 2 en Informatique

Supervision : Pr. Yacine Challal, Pr. Karima Benatchba



Janvier – Juin 2020



Stage de Recherche

Supervision : Pr. Adlen Ksentini

Contribution : Optimisation de vols de Drones sur des Réseaux 5G



2020 – 2023



Doctorat en Informatique (10/2023)

Supervision : Pr. Thomas Begin,

Pr. Isabelle Guérin Lassous, Dr. Pascale Vicat-Blanc

Contributions :

- Sélection multicritère de Technologies Réseau
- Optimisation de Paramètres de Configurations



Juin – Août 2023



Mobilité Internationale

Supervision : Pr. Catherine Rosenberg

Contribution : Étude de techniques de localisation en 5G



Novembre 2023 –



Postdoctorat

Supervision : Dr. Fabrice Théoleyre

Contribution : Modélisation de Transmissions Radio



Parcours Académique + Contributions

2015 – 2020



Ingénieur + Master 2 en Informatique

Supervision : Pr. Yacine Challal, Pr. Karima Benatchba



Janvier – Juin 2020



Stage de Recherche

Supervision : Pr. Adlen Ksentini

Contribution : Optimisation de vols de Drones sur des Réseaux 5G

- 1 IEEE GLOBECOM
- 1 IEEE VTM

2020 – 2023



Doctorat en Informatique (10/2023)

Supervision : Pr. Thomas Begin,
Pr. Isabelle Guérin Lassous, Dr. Pascale Vicat-Blanc

Contributions :

- Sélection multicritère de Technologies Réseau
- Optimisation de Paramètres de Configurations



Juin – Août 2023



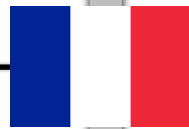
Mobilité Internationale

Supervision : Pr. Catherine Rosenberg

Contribution : Étude de techniques de localisation en 5G



Novembre 2023 –



Postdoctorat

Supervision : Dr. Fabrice Théoleyre

Contribution : Modélisation de Transmissions Radio



Parcours Académique + Contributions

2015 – 2020



Ingénieur + Master 2 en Informatique

Supervision : Pr. Yacine Challal, Pr. Karima Benatchba



Janvier – Juin 2020



Stage de Recherche

Supervision : Pr. Adlen Ksentini

Contribution : Optimisation de vols de Drones sur des Réseaux 5G

- 1 IEEE GLOBECOM
- 1 IEEE VTM

2020 – 2023



Doctorat en Informatique (10/2023)

Supervision : Pr. Thomas Begin,
Pr. Isabelle Guérin Lassous, Dr. Pascale Vicat-Blanc

Contributions :

- Sélection multicritère de Technologies Réseau
- Optimisation de Paramètres de Configurations

- 1 IEEE ICCCN
- 1 ACM LANC
- 1 IEEE ICC
- 1 Elsevier IoT Journal
- 1 Elsevier FGCS Journal

Juin – Août 2023



Mobilité Internationale

Supervision : Pr. Catherine Rosenberg

Contribution : Étude de techniques de localisation en 5G



Novembre 2023 –



Postdoctorat

Supervision : Dr. Fabrice Théoleyre

Contribution : Modélisation de Transmissions Radio



Parcours Académique + Contributions



2015 – 2020



Ingénieur + Master 2 en Informatique

Supervision : Pr. Yacine Challal, Pr. Karima Benatchba

Janvier – Juin 2020



Stage de Recherche

Supervision : Pr. Adlen Ksentini

Contribution : Optimisation de vols de Drones sur des Réseaux 5G

- 1 IEEE GLOBECOM
- 1 IEEE VTM

2020 – 2023



Doctorat en Informatique (10/2023)

Supervision : Pr. Thomas Begin,
Pr. Isabelle Guérin Lassous, Dr. Pascale Vicat-Blanc

Contributions :

- Sélection multicritère de Technologies Réseau
- Optimisation de Paramètres de Configurations

- 1 IEEE ICCCN
- 1 ACM LANC
- 1 IEEE ICC
- 1 Elsevier IoT Journal
- **1 Elsevier FGCS Journal**

Juin – Août 2023



Mobilité Internationale

Supervision : Pr. Catherine Rosenberg

Contribution : Étude de techniques de localisation en 5G

- **1 IEEE IoT Journal**

Novembre 2023 –



Postdoctorat

Supervision : Dr. Fabrice Théoleyre

Contribution : Modélisation de Transmissions Radio



Parcours Académique + Contributions



2015 – 2020



Ingénieur + Master 2 en Informatique

Supervision : Pr. Yacine Challal, Pr. Karima Benatchba

Janvier – Juin 2020



Stage de Recherche

Supervision : Pr. Adlen Ksentini

Contribution : Optimisation de vols de Drones sur des Réseaux 5G

- 1 IEEE GLOBECOM
- 1 IEEE VTM

2020 – 2023



Doctorat en Informatique (10/2023)

Supervision : Pr. Thomas Begin,
Pr. Isabelle Guérin Lassous, Dr. Pascale Vicat-Blanc

Contributions :

- Sélection multicritère de Technologies Réseau
- Optimisation de Paramètres de Configurations

- 1 IEEE ICCCN
- 1 ACM LANC
- 1 IEEE ICC
- 1 Elsevier IoT Journal
- **1 Elsevier FGCS Journal**

Juin – Août 2023



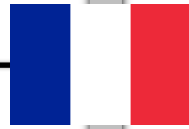
Mobilité Internationale

Supervision : Pr. Catherine Rosenberg

Contribution : Étude de techniques de localisation en 5G

- **1 IEEE IoT Journal**

Novembre 2023 –



Postdoctorat

Supervision : Dr. Fabrice Théoleyre

Contribution : Modélisation de Transmissions Radio

- 1 ClIoT (demo)
- 1 AINA
- **1 IEEE IoT Journal (sub.)**

Parcours Académique + Contributions



2015 – 2020



Ingénieur + Master 2 en Informatique

Supervision : Pr. Yacine Challal, Pr. Karima Benatchba

Janvier – Juin 2020



Stage de Recherche

Supervision : Pr. Adlen Ksentini

Contribution : Optimisation de vols de Drones sur des Réseaux 5G

- 1 IEEE GLOBECOM
- 1 IEEE VTM

2020 – 2023



Doctorat en Informatique (10/2023)

Supervision : Pr. Thomas Begin,

Pr. Isabelle Guérin Lassous, Dr. Pascale Vicat-Blanc

Contributions :

- Sélection multicritère de Technologies Réseau
- **Optimisation de Paramètres de Configurations**

- 1 IEEE ICCCN
- 1 ACM LANC
- 1 IEEE ICC
- 1 Elsevier IoT Journal
- **1 Elsevier FGCS Journal**

Juin – Août 2023



Mobilité Internationale

Supervision : Pr. Catherine Rosenberg

Contribution : Étude de techniques de localisation en 5G

- **1 IEEE IoT Journal**

Novembre 2023 –



Postdoctorat

Supervision : Dr. Fabrice Théoleyre

Contribution : **Modélisation de Transmissions Radio**

- 1 CloT (demo)
- 1 AINA
- **1 IEEE IoT Journal (sub.)**

Optimisation de Paramètres de Configurations

❖ Problématique :

- Comment obtenir une configuration optimisée pour un scénario donné ?
 - Explosion combinatoire des paramètres
 - Ex : > 20,000 configurations pour la technologie **802.15.4**
 - Impact considérable sur les performances
 - Ex : Facteur d'étalement pour la technologie **LoRa**
 - ➔ Autonomie énergétique de 1 à 10 ans et portée de 100 à 10,000 m

❖ Verrou scientifique :

- Difficulté d'explorer efficacement l'espace des configurations
 - *Curse of dimensionality*
- ➔ Hypothèses restrictives des modèles de la littérature
 - Contexte applicatif (topologie, trafic, etc.)

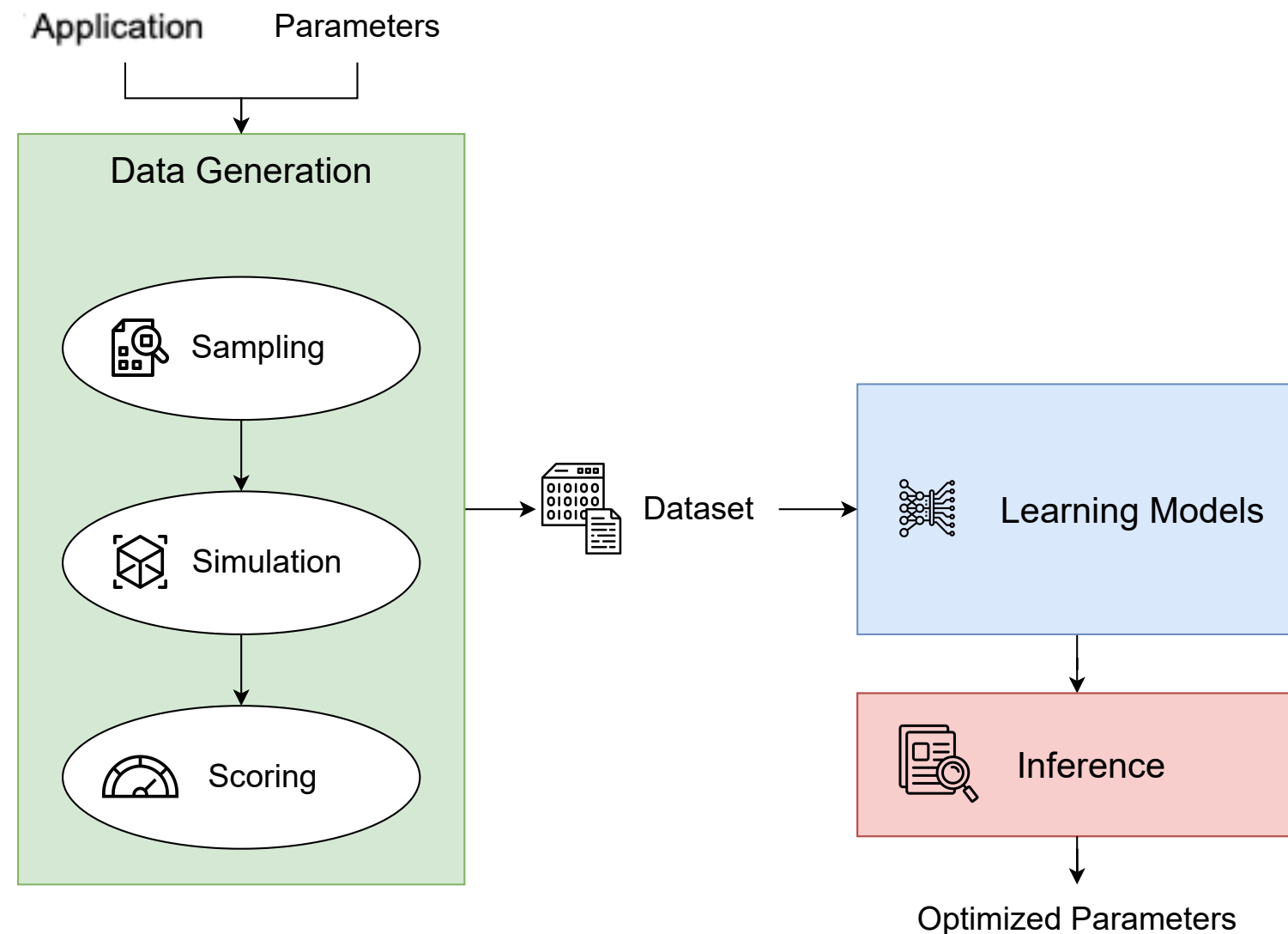
-
- **Si-Mohammed**, et al. « NS+ NDT: Smart Integration of Network Simulation in Network Digital Twin, Application to IoT Networks ». Future Generation Computer Systems, 2024.

Optimisation de Paramètres de Configurations

❖ Contribution : Modèle de Substitution

❖ Fonctionnement :

1. Échantillonnage de l'espace de configurations
2. Utilisation de modèles de Machine Learning (Régression)
3. Inférence sur l'ensemble exhaustif



- **Si-Mohammed**, et al. « NS+ NDT: Smart Integration of Network Simulation in Network Digital Twin, Application to IoT Networks ». Future Generation Computer Systems (2024).

Optimisation de Paramètres de Configurations

❖ Résultat :

➔ Configuration proche de l'optimale avec une **division par 60** du **nombre de simulations** par rapport à une recherche exhaustive

❖ Contributions :

- ✓ Méthode **efficace** d'exploration de l'espace de configurations
- ✓ **Assouplissement** des **hypothèses** sur le contexte applicatif

❖ Perspective :

- Combinaison de l'approche avec des techniques de **Clustering** pour une **optimisation** plus **affinée**
 - Impact des configurations spécifique à chaque lien radio [1]

[1] **S. Si-Mohammed** and F. Théoleyre. Data-Driven Prediction Models for Wireless Network Configuration. In 39th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA) (2025).

Modélisation de Transmissions Radio

❖ Problématique :

- Comment modéliser la qualité des liens radio d'un réseau ?
 - Dynamisme et hétérogénéité considérables

❖ Verrou scientifique :

- Incapacité des modèles de simulation à capturer le dynamisme des liens
 - Absence de variabilité des conditions radio dans les modèles de propagation

-
- **Si-Mohammed** and Fabrice Théoleyre. "Towards Accurate, Data-Driven and Lightweight Digital Twins for Wireless Networks". *Submitted to IEEE IoT Journal*.

Modélisation de Transmissions Radio

❖ Problématique :

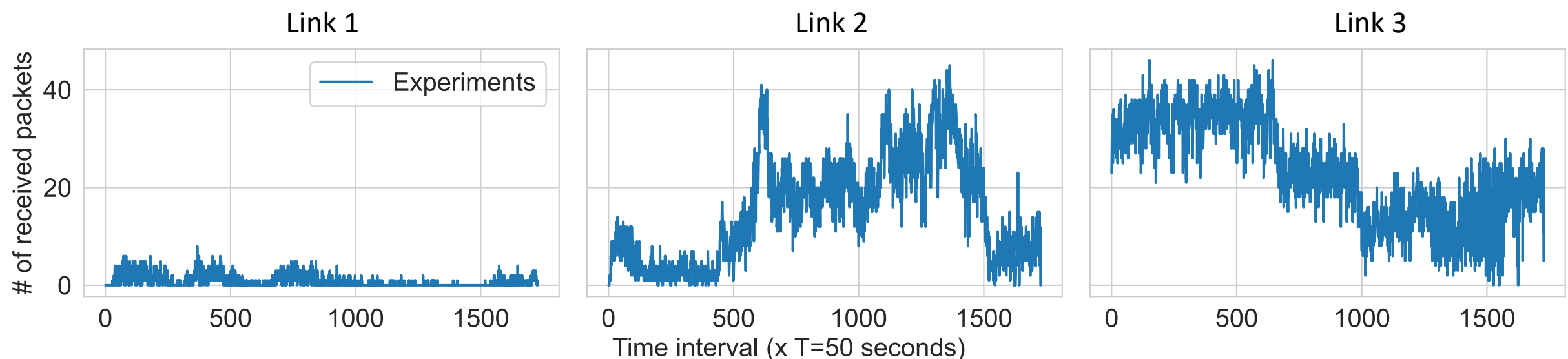
- Comment modéliser la qualité des liens radio d'un réseau ?
 - Dynamisme et hétérogénéité considérables

❖ Verrou scientifique :

- Incapacité des modèles de simulation à capturer le dynamisme des liens
 - Absence de variabilité des conditions radio dans les modèles de propagation

➔ Exemple : Réseau de monitoring en intérieur sur FIT IoT-Lab

- 10 nœuds, 1 paquet par seconde, technologie 802.15.4



- **Si-Mohammed** and Fabrice Théoleyre. “Towards Accurate, Data-Driven and Lightweight Digital Twins for Wireless Networks”. *Submitted to IEEE IoT Journal*.

Modélisation de Transmissions Radio

❖ Problématique :

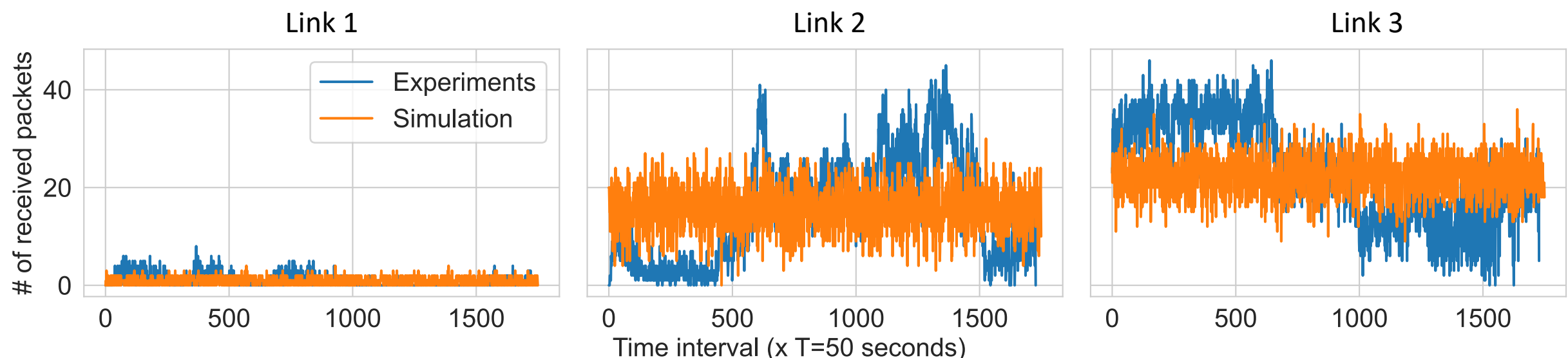
- Comment modéliser la qualité des liens radio d'un réseau ?
 - Dynamisme et hétérogénéité considérables

❖ Verrou scientifique :

- Incapacité des modèles de simulation à capturer le dynamisme des liens
 - Absence de variabilité des conditions radio dans les modèles de propagation

➔ Exemple : Réseau de monitoring en intérieur sur FIT IoT-Lab

- 10 nœuds, 1 paquet par seconde, technologie 802.15.4



- **Si-Mohammed** and Fabrice Théoleyre. “Towards Accurate, Data-Driven and Lightweight Digital Twins for Wireless Networks”. *Submitted to IEEE IoT Journal*.

Modélisation de Transmissions Radio

❖ Contribution : Approche pilotée par les données

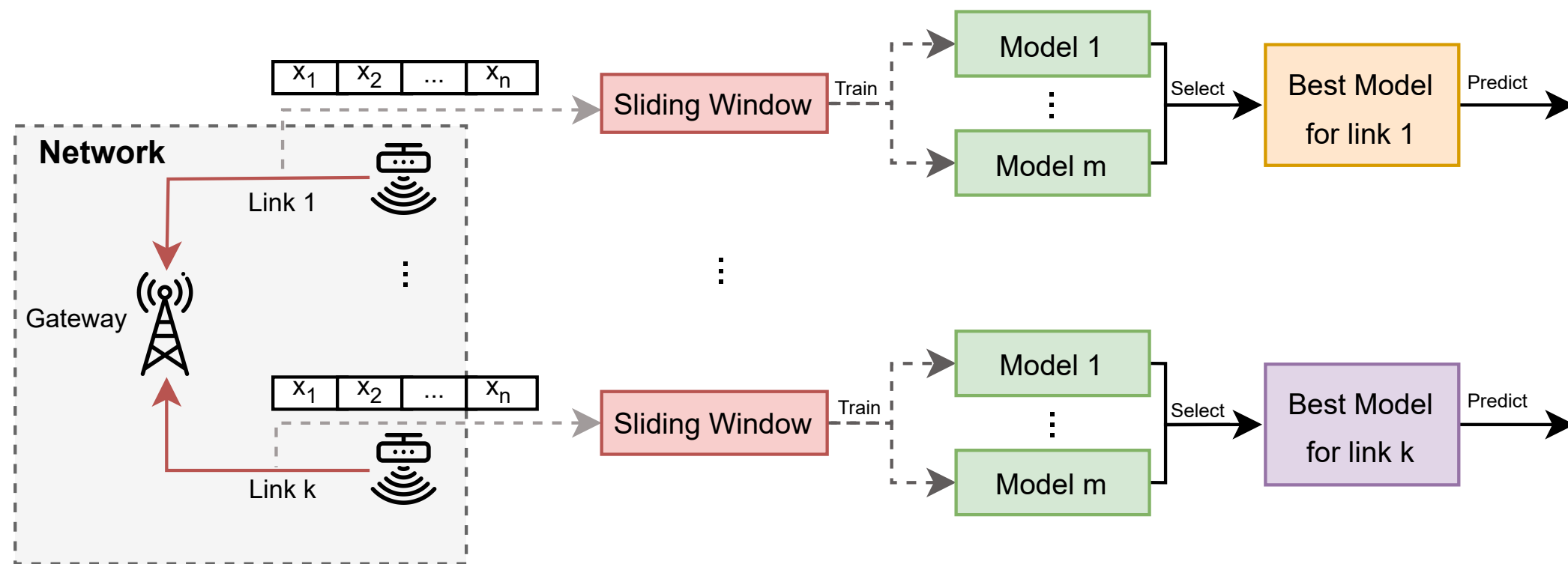
❖ Fonctionnement :

■ Durant l'entraînement :

- Modélisation individuelle des liens
- Entraînement des modèles sur les mesures de séries temporelles

■ Durant le déploiement :

- Recalibrage continu durant le déploiement
- Choix dynamique du modèle à chaque étape de prédiction



- **Si-Mohammed** and Fabrice Théoleyre. "Towards Accurate, Data-Driven and Lightweight Digital Twins for Wireless Networks". *Submitted to IEEE IoT Journal*.

Modélisation de Transmissions Radio

❖ Résultat :

➔ Prédiction plus précises par rapport aux modèles de simulation

❖ Contributions :

- ✓ Modélisation **individuelle** des liens du réseau
 - Capture de l'hétérogénéité des liens radio
- ✓ Algorithme **adaptatif** pouvant capturer le dynamisme des liens
 - Compromis entre précision et complexité

❖ Perspective :

- **Assouplissement** des hypothèses sur le trafic :
 - Fixe et identique sur les liens
 - Connu à l'avance

Projet de Recherche

❖ **Jumeaux Numériques (JN)** : Approche visant à reproduire le comportement d'un système physique. Il existe deux familles de modèles : Basés sur **la physique**, et pilotés par les **données** [2].

❖ **Dans un environnement réseau :**

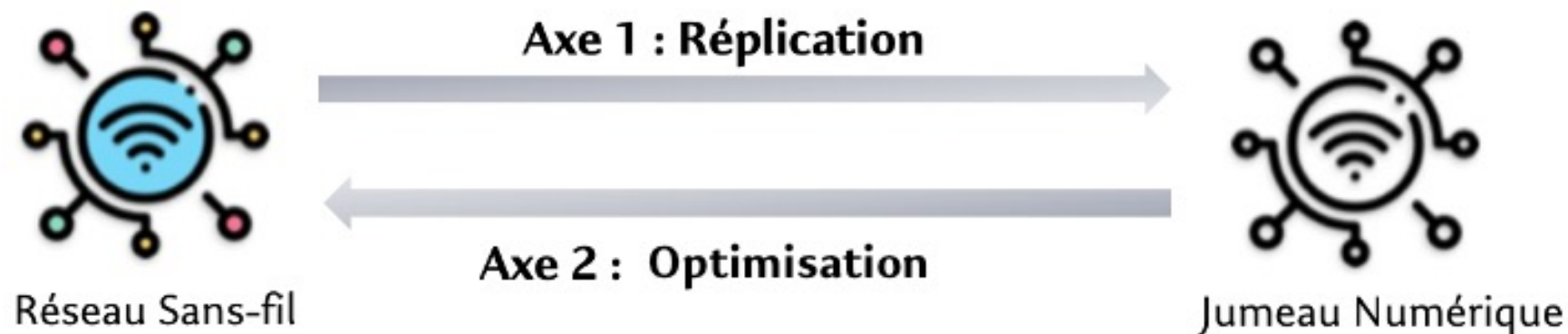
- La **détection** de changements dans l'environnement
- Le test de **configurations** avant le déploiement

➔ **Compromis entre la précision et la complexité des modèles**

■ **Objectifs :**

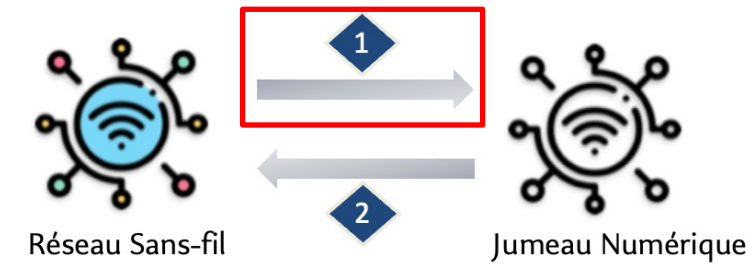
- Concevoir des algorithmes/mécanismes pour développer un jumeau numérique **précis** et **le moins coûteux possible**
- Permettre **l'optimisation automatique** d'un réseau sans-fil sur l'ensemble de la **pile réseau**

Démarche :



[2] Rasheed, A., San, O., & Kvamsdal, T. Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective. IEEE Access (2020).

Projet de Recherche



Axe 1 : Réplique de réseaux sans-fil à l'aide de jumeaux numériques

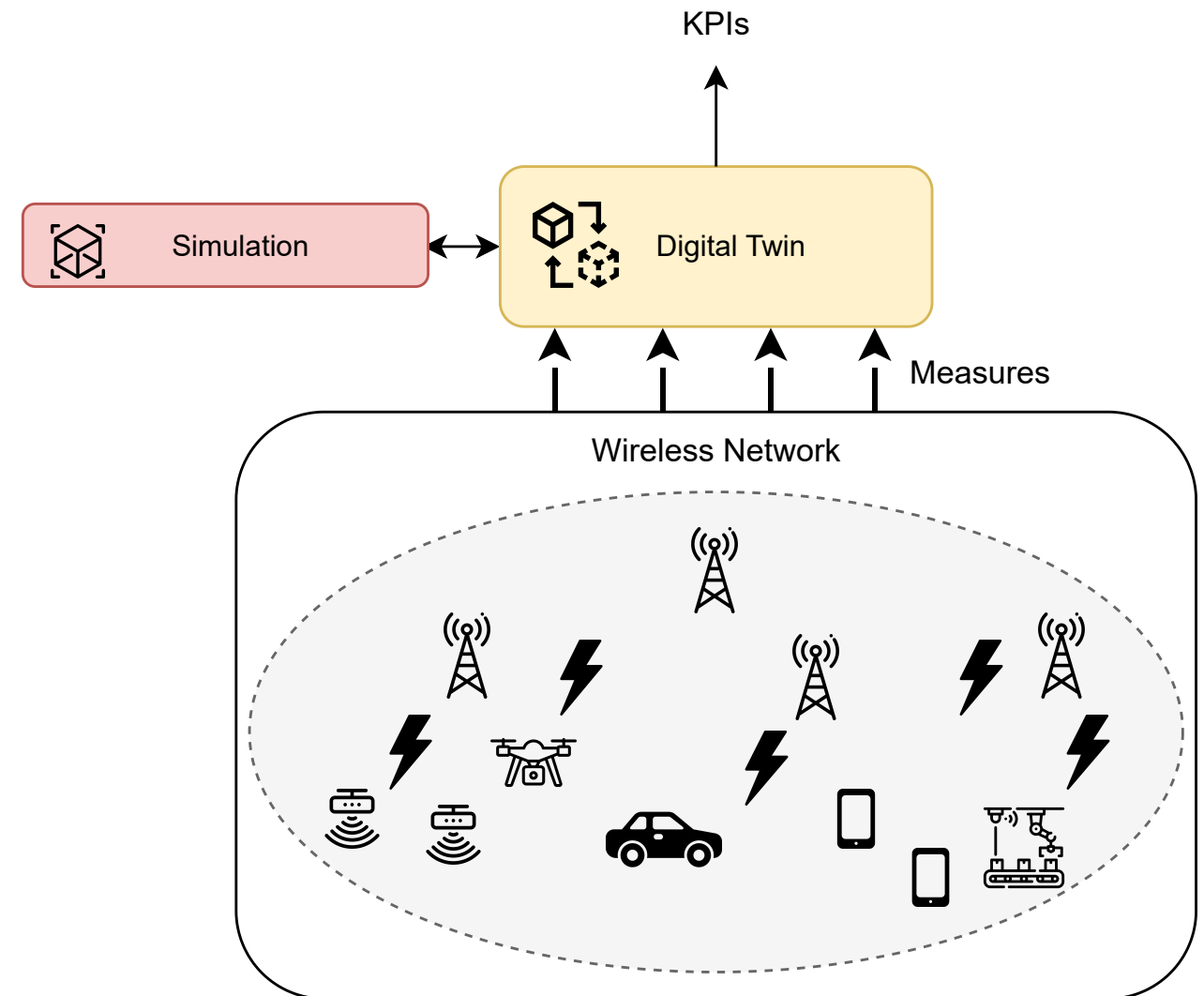
❖ **Objectif :** Efficacité et Fiabilité du processus de Réplication

❖ **Problématique :**

- Comment développer des modèles capables, **à faible coût**, de :
 - **Reproduire** les performances d'un réseau sans-fil ?
 - **Prédire** ses performances futures ?

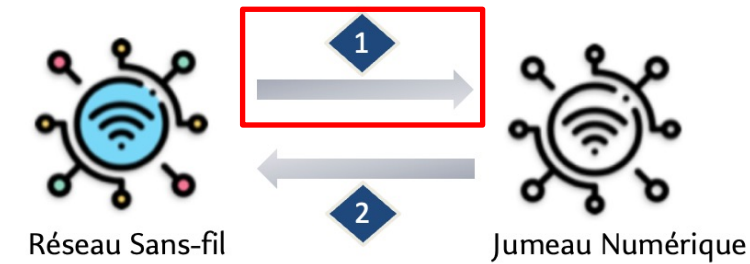
❖ **Verrou scientifique :**

- **Complexité** des modèles basés sur la physique
 - Ray-tracing [2] précis mais coûteux
 - Environnement dynamique



[3] Valenzuela, Reinaldo. "A ray tracing approach to predicting indoor wireless transmission." IEEE 43rd vehicular technology conference (1993).

Projet de Recherche



Axe 1 : Réplique de réseaux sans-fil à l'aide de jumeaux numériques

❖ Approche :

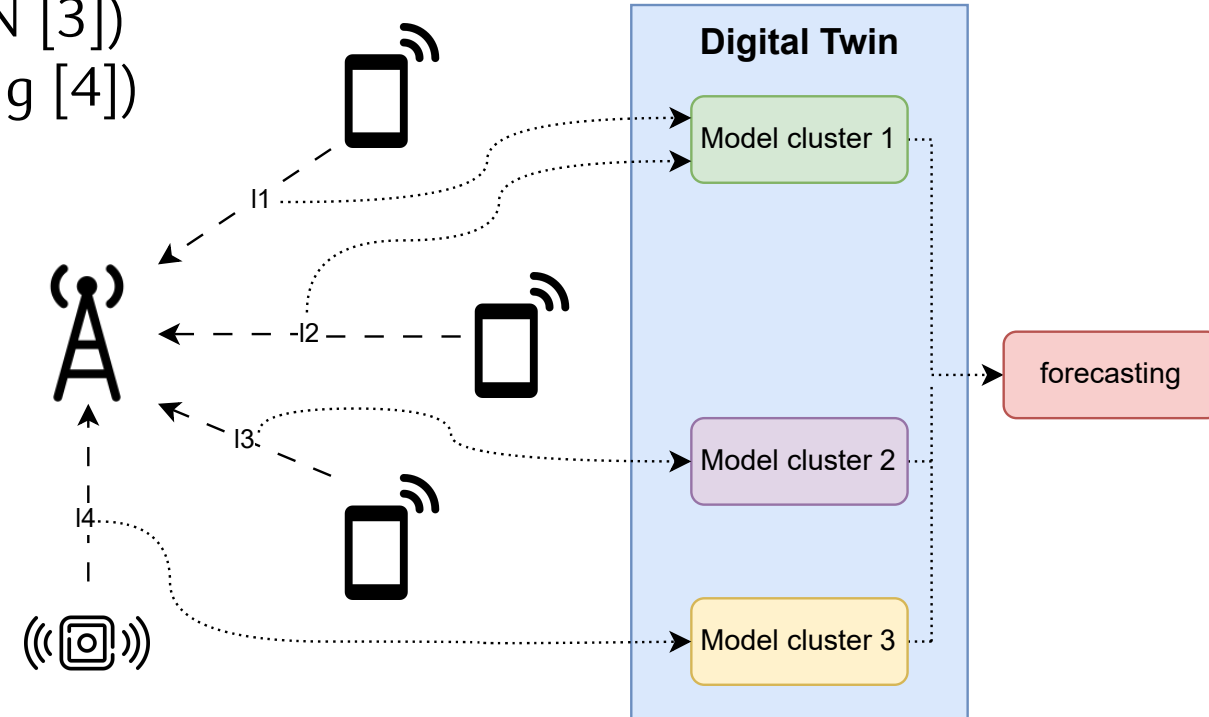
1. Employer des approches pilotées par des données expérimentales
2. Modéliser chaque **famille** de liens radio

❖ Originalité :

- ✓ Capture de l'évolution du réseau (comparé aux GNN [3])
- ✓ Réduction de la complexité (comparé au Ray Tracing [4])
- ✓ Capture des relations entre liens (comparé à [5])

❖ Défis scientifiques :

- Métrologie
 - ➔ Métriques actives/passives, frugalité, etc.
- Groupement de liens
 - ➔ Clustering hiérarchique dynamique
 - ➔ Métriques statistiques + relatives au déploiement

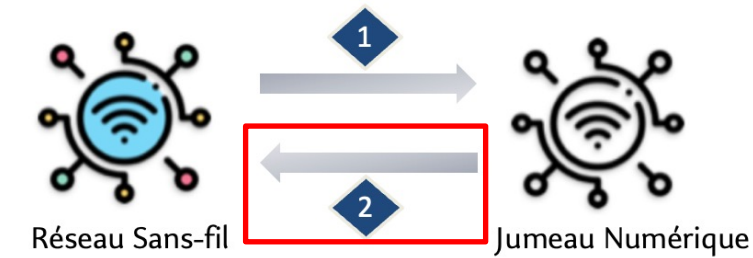


[4] Ferriol-Galmés, M. et al. « RouteNet-Fermi: Network modeling with graph neural networks. » IEEE/ACM transactions on networking (2023).

[5] Ruah, C. et al. « Calibrating wireless ray tracing for digital twinning using local phase error estimates. » IEEE Transactions on Machine Learning in Communications and Networking (2024).

[6] **Si-Mohammed** et Fabrice Théoleyre. "Towards Accurate, Data-Driven and Lightweight Digital Twins for Wireless Networks". **Submitted to** IEEE IoT Journal.

Projet de Recherche



2

Axe 2 : Optimisation de réseaux sans-fil à l'aide de jumeaux numériques

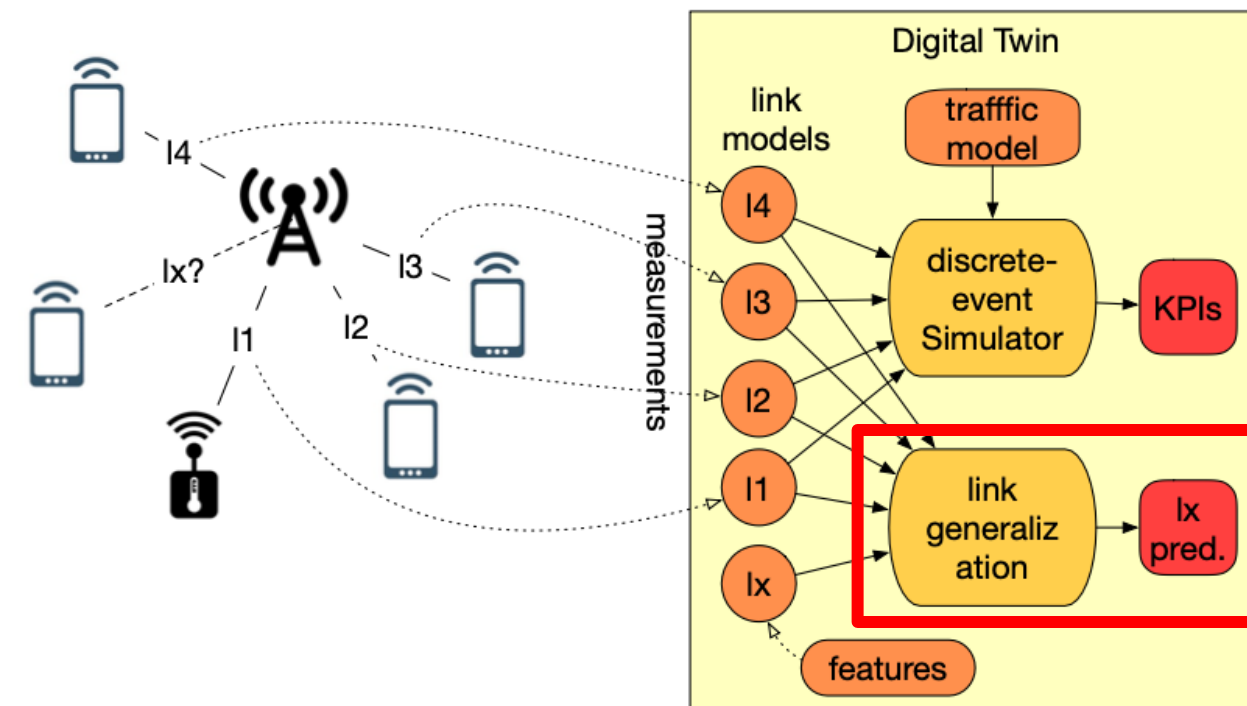
❖ **Objectif :** Optimisation du réseau selon l'évolution de l'environnement

❖ **Problématique :**

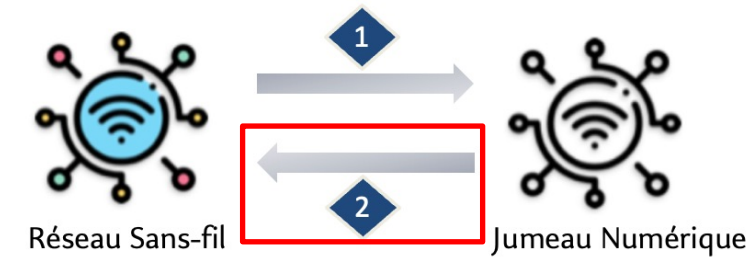
- Comment assurer la précision des modèles pour des scénarios inexplorés ?
 - *What-if* scenarios (protocole, topologie, etc. différents)

❖ **Verrou scientifique :**

- **Difficulté de généralisation précise** des modèles de simulation
 - Relations complexes entre propagation, topologie, trafic, etc.



Projet de Recherche



2

Axe 2 : Optimisation de réseaux sans-fil à l'aide de jumeaux numériques

❖ Approche :

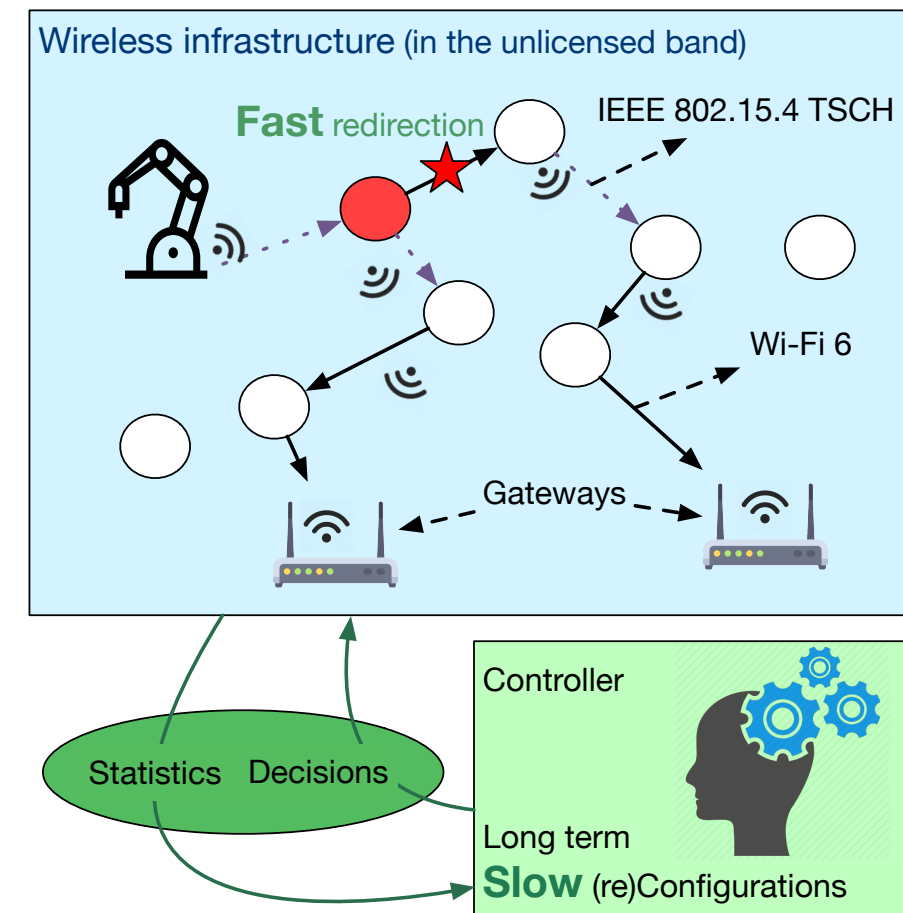
- Création de modèles **agnostiques** à travers des campagnes de mesures

❖ Originalité :

- ✓ **Optimisation** continue sur l'ensemble **de la pile réseau**
 - ➔ Changement de protocole à la volée, topologie etc.

❖ Défis scientifiques :

- Aspect agnostique des modèles de prédiction
 - ➔ Usage de données récoltées pour la généralisation [6]
 - ➔ **Généralisation de domaines/Transfer Learning** [7,8]
- Déclenchement de reconfigurations
 - ➔ Détection d'instabilité, gains/coût, etc.



[7] **S. Si-Mohammed** and F. Théoleyre. Data-Driven Prediction Models for Wireless Network Configuration. In 39th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA) (2025).

[8] G. Blanchard et al., Generalizing from several related classification tasks to a new unlabeled sample. Advances in neural information processing systems (2011).

[9] M. Akrouit et al., Domain Generalization in Machine Learning Models for Wireless Communications: Concepts, State-of-the-Art, and Open Issues. IEEE Comm. Surveys & Tutorials (2023).

Intégration aux laboratoires d'accueil

Laboratoire ICube



Thématiques

- Réseaux sans-fil

- Fabrice Théoleyre
- Julien Montavont
- Thomas Noel

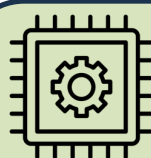
- Métrologie

- Pascal Mérindol
- Jean-Romain Luttringer



Encadrement

- Ghinwa Ismail (thèse)



Plateformes expé.

- SLICES-FR
- Testbed 5G



Apport personnel

- Simulation
- Apprentissage automatique

Laboratoire LIG

❖ Convergence de thématiques de recherche :

- Réseaux IoT : Martin Heusse, Franck Rousseau



Laboratoire IRISA

❖ Convergence de thématiques de recherche :

- Réseaux IoT et 5G : Yassine Hadjadj-Aoul, César Viho



Synthèse

❖ Contributions passées :

- Exploration **efficace** de l'espace de configurations avec des **hypothèses applicatives assouplies**
- Modélisation **individuelle** et **adaptative** des liens du réseau, capturant leur **dynamisme**

❖ Projet de recherche :

1. Axe 1 (~ 3 ans) :

- Méthodologie systématique de **conception** de jumeaux numériques
- Amélioration de la **précision** et la **frugalité** de la **métrologie**
- Affinement de la **modélisation** du réseau (**famille de liens**)

2. Axe 2 (~ 3-5 ans) :

- **Amélioration** de la **précision** de la **généralisation** des modèles
- **Optimisation** automatique sur l'ensemble de la **pile réseau**

Récapitulatif de Candidature

- ❖ **Projet :** Jumeaux Numériques pour des Réseaux Sans-fil Optimisés
- ❖ **Laboratoires :** ICube, LIG, IRISA

Publications Int.

- 4 Journaux + 1 soumis
- 5 Conférences
- 1 Demo

Transfert technologique

- SIFRAN – StackNet
- WT-Tool

Collaborations Internationales



University of Waterloo, Canada



University at Buffalo, USA

TPC & Reviews

- **TPC:** IEEE ISCC 2024/2025, ICNP (Posters/Demos), IEEE VTC 2025
- **Reviews:** IEEE Comm. Magazine, IEEE Access, ICC, ICNC, ITU Journal of FET, Adhoc Net. Computer Net., Computer Comm.

Encadrement/Enseignement

- **1 Doctorat** (depuis Nov. 2024)
- 1 Stage M1
- 1 Stage L2
- 2 TER (M1) + 3 en cours
- **137h (CM/TD/TP)**

Merci pour votre attention

Optimisation de Paramètres de Configurations

Problème : Trouver la configuration C^* qui optimise les métriques de performance.

$$C^* = \arg \max_{C_i \in \mathcal{C}} F(C_i) \quad (1)$$

$$F(C_i) = \text{MADM}\left((f_1(C_i), f_2(C_i), \dots, f_m(C_i)), \mathcal{C}\right) \quad (2)$$

avec :

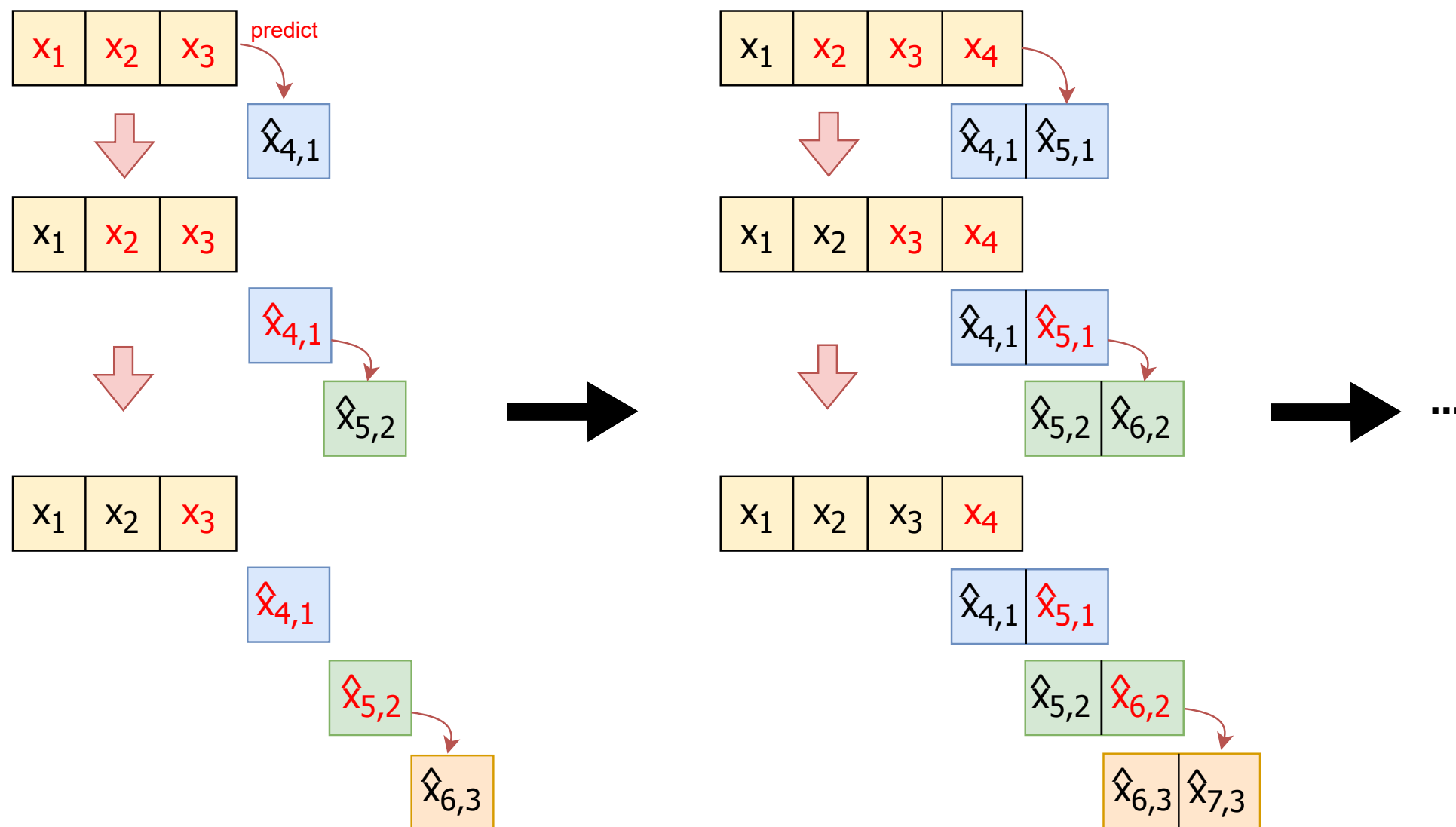
- ▶ C_i : Configuration avec paramètres (p_1, \dots, p_n) , où $p_i \in \mathbb{N}$.
- ▶ \mathcal{C} : Ensemble des configurations possibles.
- ▶ $F(C_i)$: Vecteur de métriques (ex: débit, latence, etc.).
- ▶ MADM : Méthode de scoring multicritères (e.g., **TOPSIS**)

-
- **Si-Mohammed**, et al. « NS+ NDT: Smart Integration of Network Simulation in Network Digital Twin, Application to IoT Networks ». Future Generation Computer Systems, 2024.

Modélisation de Transmissions Radio

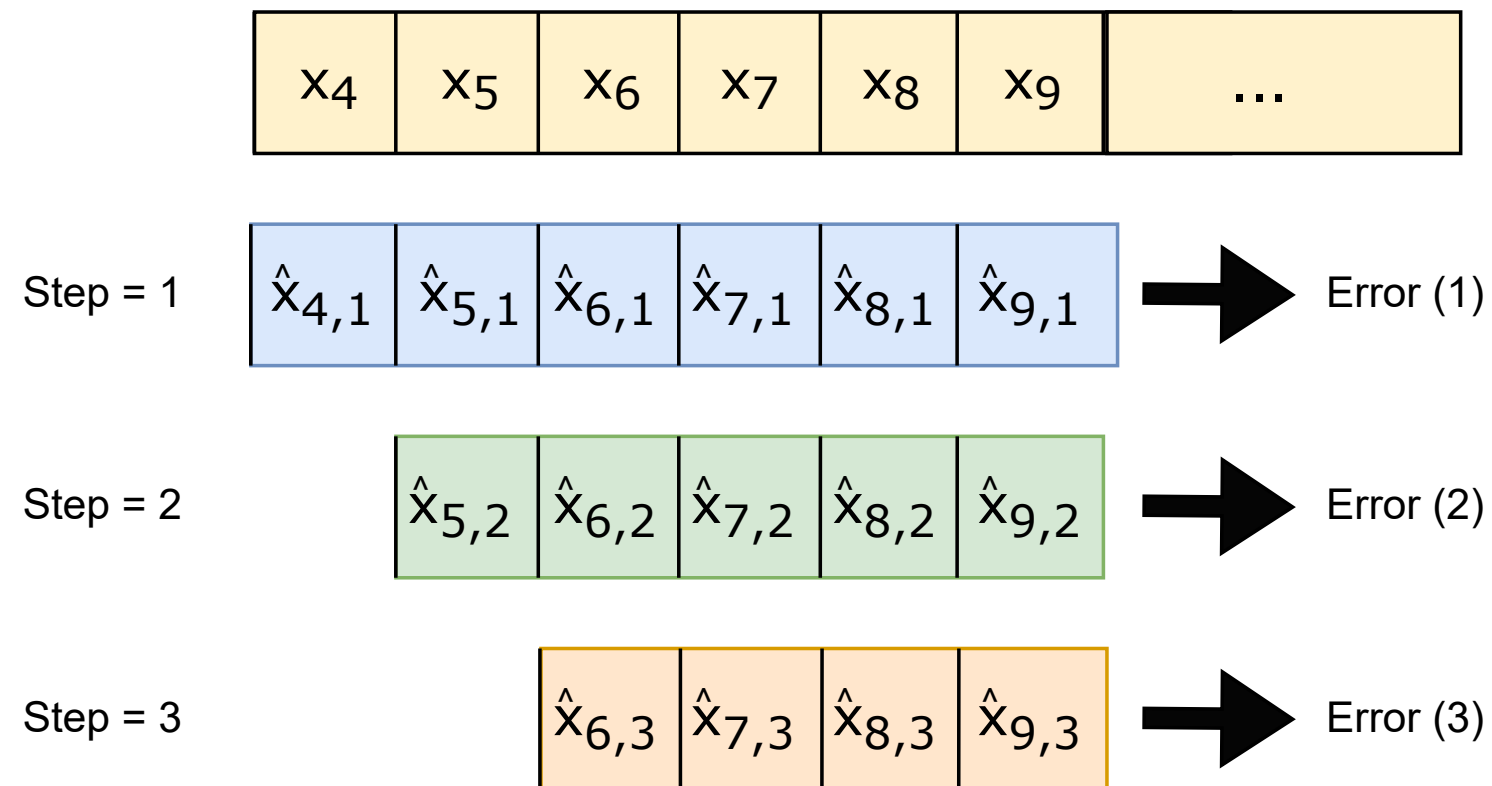
❖ Les prédictions sont faites plusieurs intervalles à l'avance, de façon **réursive**

❖ **Processus :**



Modélisation de Transmissions Radio

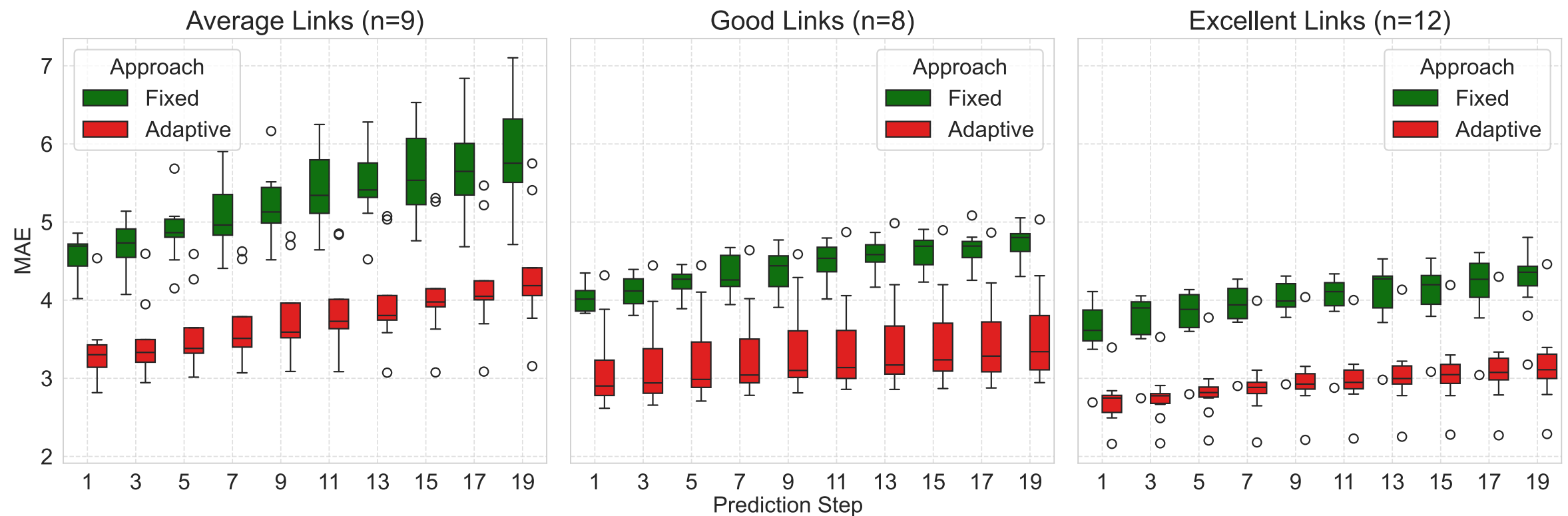
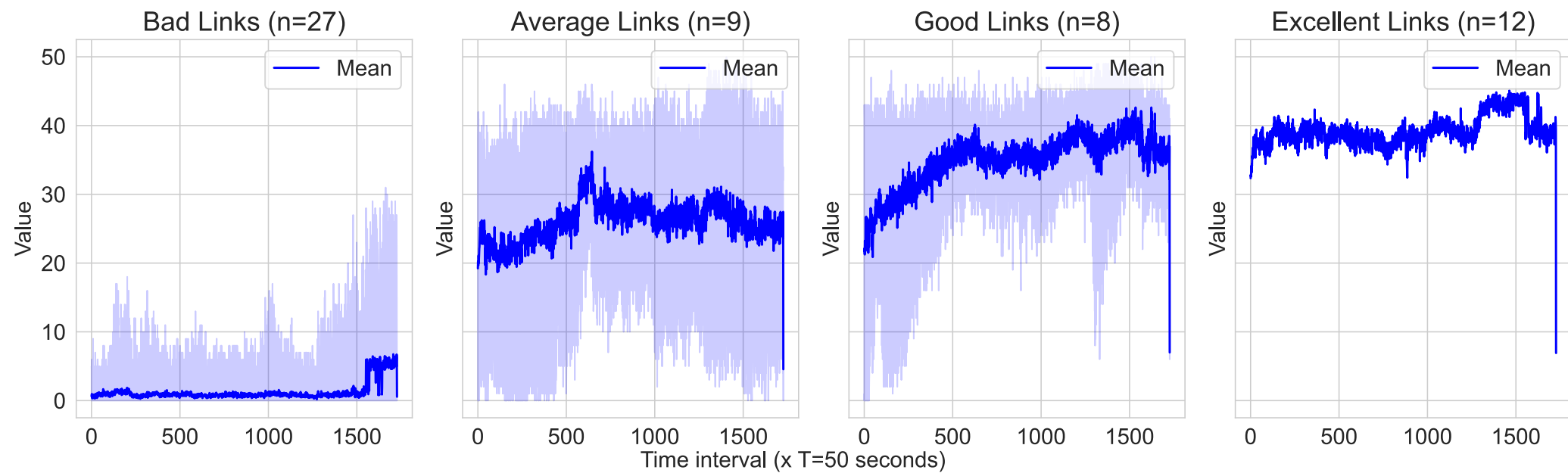
❖ L'évaluation se fait selon l'intervalle de prédiction :



Modélisation de Transmissions Radio

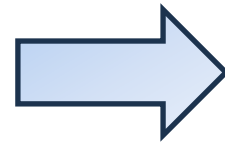
❖ Résultats :

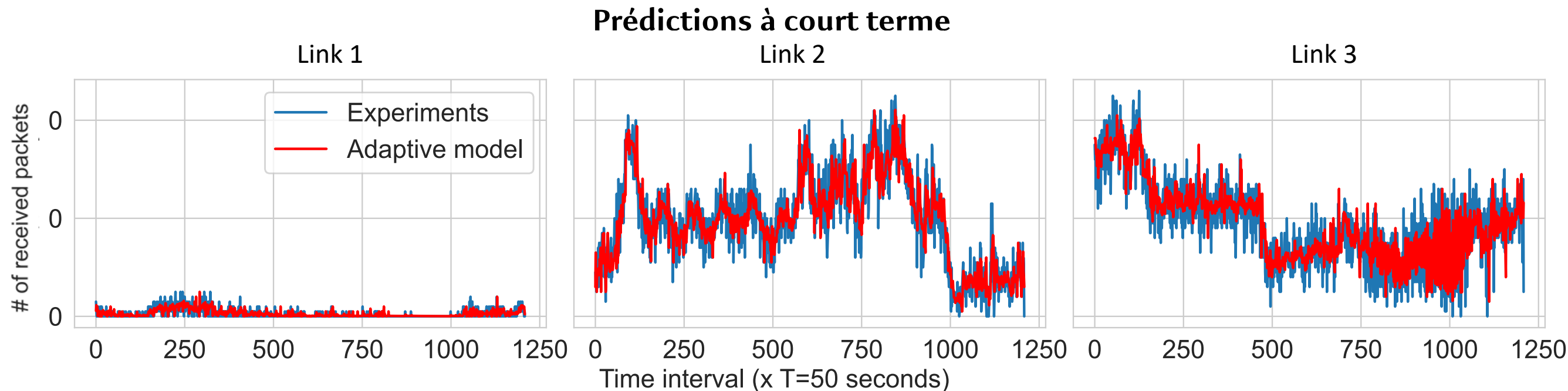
Series Evolution per Cluster



Modélisation de Transmissions Radio

❖ Résultats :

- 
- ✓ Précision dans la prédiction à court et long terme
 - ✓ Efficacité de la modélisation individuelle de chaque lien radio
 - ✓ Précision de l'approche adaptative par rapport à l'approche fixe (mais accroissement linéaire de la complexité)



- **Si-Mohammed** et Fabrice Théoleyre. “Towards Accurate, Data-Driven and Lightweight Digital Twins for Wireless Networks”. *Submitted to* IEEE IoT Journal.

Positionnement International

❖ Compétiteurs Majeurs :

- **Northeastern University (Colloseum [10]), USA**
 - Plateforme d'émulation à large échelle
- **Virginia Tech (NEWS group), USA**
 - Focus sur des architectures haut-niveau
- **INESC TEC, Portugal**
 - Peu d'intérêt sur les capacités de généralisation



❖ Projets Européens :

- PREDICT-6G [11] (2024-2026, 4 millions EUR)
- 6GTWIN [12] (2023-2025, 6 millions EUR)
 - Les deux projets sont dédiés à la 6G



[10] Villa, D., Tehrani-Moayyed, M., Robinson, C. P., Bonati, L., Johari, P., Polese, M., & Melodia, T. (2024). Colosseum as a digital twin: Bridging real-world experimentation and wireless network emulation. IEEE Transactions on Mobile Computing.

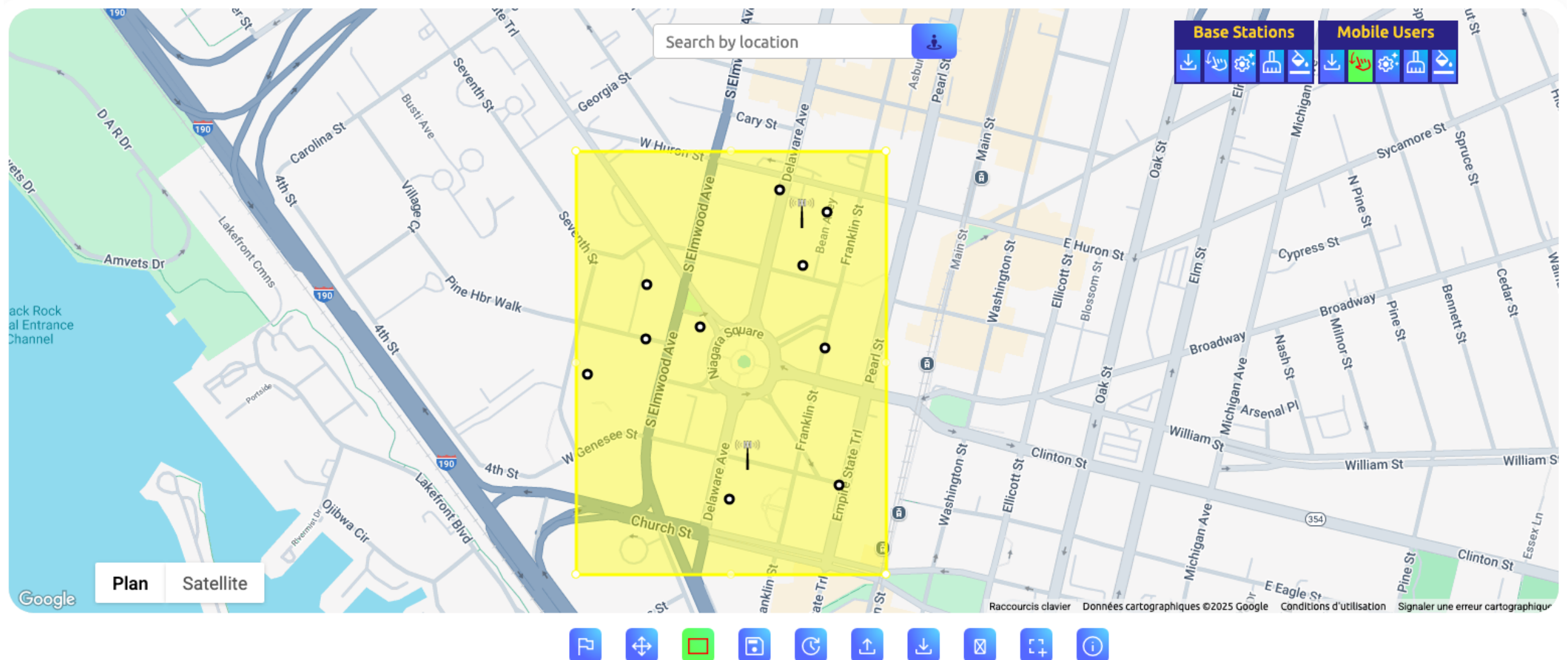
[11] <https://cordis.europa.eu/project/id/101095890>

[12] <https://cordis.europa.eu/project/id/101136314>

Projets annexes

❖ Simulation No-Code de réseaux sans-fil (WTTool)

- Prof. Filippo Malandra
 - Nicholas Accurso, **Samir Si-Mohammed**, Diptangshu De, and Filippo Malandra. « WTTool: A Visual Web-based Topology Generator and 5G Network Simulator with ns-3 (demo) », *Accepted* in **CIoT 2024** - 2024 Conference on Cloud and Internet of Things 2024 .



Encadrements en cours

- Ghinwa Ismail, Doctorante (dir. : F. Théoleyre): **Digital Twins for efficient 5G Networks**
 - Usage de la plateforme Colloseum [13] (<https://colosseum.sites.northeastern.edu/>)
- Léo Piveteau-Wernert, étudiant M1 (TER) : **Différence entre l'expérimentation et l'émulation des réseaux 802.15.4**
 - Focus sur le protocole CSMA/CA sur le FIT IoT-Lab et Cooja
- Pierre Matter, étudiant M1 (TER) : **Étude de l'impact des technologies de communication sur l'optimisation distribuée**
 - Collaboration avec Prof. Adedoyin Inaolaji à University at Buffalo
- Tuna Acikbas, étudiant M1 (TER, avec P. Parrend) : **Analyse dynamique de Malware**
 - Évaluation d'un protocole de détection des logiciels malveillants

[13] Villa, D., Tehrani-Moayyed, M., Robinson, C. P., Bonati, L., Johari, P., Polese, M., & Melodia, T. (2024). Colosseum as a digital twin: Bridging real-world experimentation and wireless network emulation. IEEE Transactions on Mobile Computing.