

# Apprentissage par Renforcement Multi-Agents et IA Agentique pour l'Allocation Dynamique de Ressources dans les Réseaux Industriels 6G

## 1. Contexte scientifique

L'émergence de l'Industrie 5.0 impose une mutation radicale des infrastructures réseau. La 6G ne se contente plus d'offrir du débit ; elle doit intégrer nativement une intelligence distribuée pour gérer des flux de données hétérogènes avec des exigences de latence ultra-faible et une fiabilité critique.

Face à l'explosion du volume de données et à la complexité croissante des systèmes cyber-physiques, les approches centralisées deviennent progressivement inefficaces. Dans ce contexte, les systèmes multi-agents et les approches d'apprentissage automatique ont récemment démontré leur potentiel pour permettre une gestion autonome et adaptative des ressources réseau, notamment pour l'optimisation du network slicing et la gestion intelligente des infrastructures de communication (Shakya *et al.*, 2025 ; Salhab *et al.*, 2021a).

Ces travaux s'inscrivent dans la continuité des recherches menées par l'équipe sur les réseaux intelligents, l'apprentissage automatique appliqué aux réseaux et la gestion énergétique des systèmes distribués, notamment à travers plusieurs contributions scientifiques récentes (Alsalloum *et al.*, 2022 ; Alsalloum *et al.*, 2020).

## 2. Problématique scientifique

Le défi majeur de cette thèse est de passer d'une automatisation rigide à une autonomie cognitive. Alors que les SMA traditionnels optimisent des fonctions numériques, l'IA Agentique (basée sur des modèles de raisonnement type SLM/LLM) permet aux agents de comprendre des politiques réseau complexes et de planifier des actions à long terme.

La problématique centrale repose sur l'hybridation de ces deux mondes : comment coordonner des agents apprenants (via du RL : Reinforcement Learning) via des mécanismes mathématiques stables (Théorie des Jeux) tout en garantissant la confidentialité des données industrielles (Apprentissage Fédéré) ?

## 3. Objectifs de la thèse

L'objectif est de concevoir des architectures d'IA distribuée pour les réseaux 6G industriels en combinant :

- IA Agentique et SMA : Utilisation de capacités de raisonnement pour l'orchestration du *network slicing* (Salhab *et al.*, 2021b).
- Apprentissage par Renforcement Multi-Agent (MARL) : Pour l'allocation dynamique et temps réel de la bande passante (Feriani *et al.*, 2021).

- Théorie des Jeux : Modélisation des interactions stratégiques entre nœuds pour atteindre des équilibres de performance et d'équité (Brik *et al.*, 2024).
- Apprentissage Fédéré (FL) : Entraînement collaboratif des modèles sans compromettre la souveraineté des données de l'usine (Nguyen *et al.* 2021), (Adjewa *et al.*, 2025).

#### 4. Planning prévisionnel (36 mois)

Période	Phase	Objectifs Clés
Année 1	<b>État de l'art et Modélisation</b>	État de l'art sur la 6G et les SMA, définition du modèle de Théorie des Jeux et choix du simulateur (ex : NS-3, OMNET++, ..).
Année 2	<b>Développement et Hybridation</b>	Mise en œuvre du framework MARL ; Intégration de la brique "IA Agentique" pour le raisonnement ; Mise en place de l'Apprentissage Fédéré ; Étude de performances des approches proposées.
Année 3	<b>Validation et Rédaction</b>	Tests de scalabilité ; Optimisation de l'efficacité énergétique ; Rédaction du manuscrit et soutenance.

#### 5. Références

1. Shakya J., Chopin M., and Merghem-Boulahia, L., et al. (2025). *MultiAgentNetSim: Empowering Next-Generation Network Modeling with Multi-Agent Simulation*. IEEE Communications Magazine.
2. Brik B., Esseghir M., and Merghem-Boulahia, L., (2024). *On Adjusting Data Throughput in IoT Networks: A Deep Reinforcement Learning-Based Game Approach*. IEEE IoT Journal.
3. Adjewa, F., Esseghir, M., and Merghem-Boulahia, L. (2025). *LLM-based Continuous Intrusion Detection Framework for Next-Gen Networks*. IEEE IWCMC 2025.
4. Feriani A., Hossain E. (2021). *Single and Multi-Agent Deep Reinforcement Learning for AI-Enabled Wireless Networks: A Survey*. IEEE Communications Surveys & Tutorials.
5. Nguyen D.C et al. (2021). *Federated Learning for Industrial Internet of Things in Future Industries*. IEEE Wireless Communications.

6. Alsalloum H., Rahim R., Merghem-Boulahia L. (2022). *Contribution-based energy-trading mechanism: A multi-level energy management approach*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Elsevier, 136, 107668.
7. Salhab N., Langar R., Rahim R., Cherrier S., Outtagarts A. (2021a). *Autonomous Network Slicing Prototype Using Machine-Learning-Based Forecasting for Radio Resources*. IEEE Communications Magazine, 59(6), 73–79.
8. Nazih Salhab, Rami Langar, Rana Rahim (2021b). *5G network slices resource orchestration using Machine Learning techniques*. Computer Networks, Volume 188, 107829, ISSN 1389-1286.
9. Hala Alsalloum, Leila Merghem-Boulahia, Rana Rahim (2020). *Hierarchical system model for the energy management in the smart grid : A game theoretic approach*. ELSEVIER - Sustainable Energy, Grids and Networks.