

Intégration des Micro-réseaux au Milieu Urbain : Vers des Architectures Modernes et Efficaces

Hocine BELMILI, Directeur de recherche.

*Unité de Développement des Équipements Solaires, UDES, Centre de Développement des Énergies
Renouvelables, CDER, 42415, Tipaza, Algeria.*

h.belmili@cder.dz/hocine.belmili78@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-3445-1427>

Résumé

Le rythme rapide de l'urbanisation exerce une pression croissante sur les réseaux électriques conventionnels, qui peinent à répondre à la demande tout en garantissant durabilité et résilience. La question centrale qui se pose est la suivante : comment répondre à la demande énergétique croissante et durable des villes modernes face aux limites des systèmes électriques centralisés ? Ces derniers rencontrent des difficultés à intégrer une forte part d'énergies renouvelables, à réduire les pertes et à assurer des services fiables aux villes modernes. Dans ce contexte, les micro-réseaux urbains apparaissent comme une solution stratégique. Les micro-réseaux sont des systèmes autonomes, intelligents et flexibles qui permettent la production, le stockage et la gestion décentralisés de l'énergie. Leur intégration avec les sources renouvelables et les outils numériques avancés tels que l'IoT, la blockchain et l'edgecomputing permet une optimisation en temps réel, une gestion de la demande et des échanges d'énergie de pair à pair. Cela améliore l'efficacité énergétique, la fiabilité et l'adaptabilité face aux perturbations du réseau. Au-delà des avantages techniques, les micro-réseaux redessinent le tissu urbain. En rapprochant la production énergétique des lieux de consommation, ils favorisent l'émergence de quartiers à énergie positive, réduisent la dépendance vis-à-vis des réseaux centralisés et soutiennent de nouveaux modèles socio-économiques. Les citoyens évoluent de simples consommateurs vers des « prosommateurs », participant activement aux marchés locaux de l'énergie. Cette dynamique participative renforce la gouvernance, soutient l'équité énergétique et accroît la résilience communautaire. De plus, les micro-réseaux consolident les stratégies d'adaptation au climat, atténuent la précarité énergétique et s'alignent sur les grands objectifs de durabilité mondiaux. Ils ne sont pas seulement des infrastructures, mais aussi des catalyseurs socio-spatiaux, se positionnant comme des piliers essentiels de la transition énergétique dans les villes modernes.

Mots-clés : Micro-réseaux urbains, Réseaux intelligents, Énergies renouvelables, Résilience énergétique, Tissu urbain, Prosommateurs, Transition énergétique.

1. Introduction

Au cours des dernières décennies, le monde a connu une accélération sans précédent de l'urbanisation, au point que plus de 68 % de la population mondiale devrait vivre dans des zones urbaines d'ici 2050, selon les projections des Nations Unies (UN DESA, 2019). Cette transformation démographique exerce une pression considérable sur les infrastructures énergétiques conventionnelles, largement fondées sur des systèmes centralisés. Historiquement efficaces, ces derniers révèlent aujourd'hui leurs limites face à l'augmentation continue de la demande, à la nécessité d'intégrer des parts croissantes d'énergies renouvelables intermittentes (solaire, éolien), ainsi qu'aux impératifs de neutralité carbone promus par les grands cadres internationaux tels que l'*Accord de Paris*, le *Green Deal européen* ou encore les *Objectifs de développement durable* (ODD). Dans ce contexte, les micro-réseaux urbains s'imposent comme une solution stratégique et innovante. Conçus comme des systèmes autonomes, intelligents et flexibles, ils associent production décentralisée, stockage local et gestion optimisée grâce à des technologies issues de la quatrième révolution industrielle : Internet des objets (IoT), intelligence artificielle (IA), blockchain et edgecomputing (Lund et al, 2015 ; Parag&Sovacool, 2016). Ces outils numériques permettent non seulement une optimisation en temps réel et une meilleure résilience, mais aussi l'émergence de nouveaux modèles économiques, tels que l'échange pair-à-pair (peer-to-peer) de l'énergie. Au-delà des aspects technologiques, les micro-réseaux urbains exercent une influence profonde sur le tissu urbain. En rapprochant la production énergétique des lieux de consommation, ils favorisent l'émergence de quartiers à énergie positive (Positive Energy Districts) et de modèles socio-économiques inédits où les citoyens deviennent des prosummateurs (prosumers), c'est-à-dire à la fois producteurs et consommateurs d'énergie (Morstyn et al., 2018). Ce changement de paradigme contribue à renforcer la gouvernance locale, à promouvoir l'équité énergétique et à améliorer la résilience communautaire face aux crises. Sur le plan académique, les micro-réseaux urbains apparaissent comme un carrefour interdisciplinaire, à l'interface de l'ingénierie énergétique, de la planification urbaine et des sciences sociales. Ils constituent un champ d'étude privilégié pour analyser comment la technologie peut devenir un levier de transformation socio-spatiale tout en soutenant les politiques d'adaptation au changement climatique. Ainsi, ils contribuent directement à la réalisation des ODD, notamment l'ODD 7 (*énergie propre et d'un coût abordable*) et l'ODD 11 (*villes et communautés durables*). En définitive, les micro-réseaux urbains ne doivent pas être envisagés uniquement comme des infrastructures techniques, mais comme de véritables catalyseurs socio-spatiaux, capables de reconfigurer les relations entre énergie, ville et société, et de s'imposer comme des piliers de la transition énergétique urbaine.

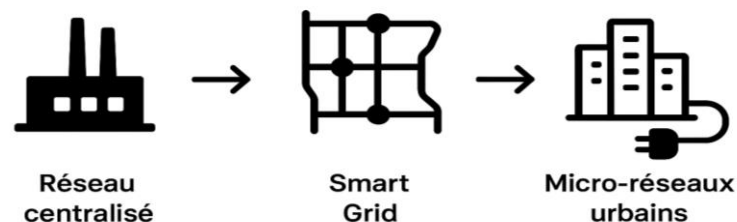


Figure 1 : Évolution du réseau centralisé vers les micro-réseaux urbains (figure établie par l'auteur).

2. Architectures Modernes des Micro-réseaux Urbains

Les micro-réseaux urbains constituent aujourd'hui un levier stratégique de la transition énergétique, en combinant des ressources énergétiques distribuées et des outils numériques de pointe. Les architectures hybrides multi-sources intègrent non seulement le solaire photovoltaïque et l'éolien urbain, mais aussi des systèmes de cogénération à haut rendement et des technologies de stockage avancées, qu'il s'agisse de batteries lithium-ion, de volants d'inertie ou encore de réservoirs d'hydrogène. Cette diversité assure une meilleure flexibilité opérationnelle et permet de compenser l'intermittence des sources renouvelables, tout en garantissant une stabilité de fréquence et de tension indispensable aux environnements urbains denses (Olivares et al.2014;Khodayar, 2017).Au-delà des aspects techniques, la structuration hiérarchique et modulaire constitue un pilier central : elle repose sur des niveaux de contrôle interconnectés (local pour la régulation immédiate, intermédiaire pour la coordination des ressources d'un quartier, et central pour l'optimisation à l'échelle de la ville). Cette approche facilite la scalabilité et la reconfiguration dynamique du micro-réseau face aux besoins croissants, favorisant ainsi une urbanisation durable et résiliente (Guerrero et al. 2011).Par ailleurs, l'intégration avec les smart grids modernes repose sur des protocoles numériques tels que l'Internet des objets (IoT), le edgecomputing et la blockchain. Ceux-ci permettent de transformer le micro-réseau en un système cognitif capable d'optimiser en temps réel la production et la consommation, de participer à des mécanismes de *demand-response* et même de valoriser les surplus via des marchés locaux d'énergie pair-à-pair (Parag&Sovacool, 2016). Ces innovations favorisent l'émergence de nouveaux modèles socio-économiques où les citoyens deviennent des *prosumers*, acteurs actifs de la gouvernance énergétique.Enfin, l'essor de l'intelligence artificielle et du Big Data apporte une dimension prédictive inédite. Les algorithmes de machine learning permettent non seulement d'anticiper les profils de consommation et de production, mais aussi de gérer le stockage de manière proactive et d'identifier rapidement les anomalies ou cyberattaques potentielles. Cette intelligence distribuée renforce l'efficacité énergétique et la cybersécurité des micro-réseaux, tout en contribuant à l'adaptation des villes aux aléas climatiques et aux pics de demande (Lasseter, 2011; Khodayar, 2017).En somme, les micro-réseaux urbains s'imposent non seulement comme des infrastructures technologiques innovantes, mais également comme des catalyseurs socio-spatiaux. Ils redéfinissent les interactions entre énergie et tissu urbain, favorisant des quartiers à énergie positive, plus autonomes et plus résilients face aux défis énergétiques et climatiques mondiaux.Dans ce cadre, les sections suivantes détaillent successivement les principales dimensions constitutives des micro-réseaux modernes, qu'il s'agisse de leur caractère hybride, de leur organisation hiérarchique, de leur intégration aux smart grids, ainsi que de l'apport déterminant de l'intelligence artificielle et du Big Data.

2.1 Micro-réseaux hybrides multi-sources

Ces architectures intègrent des panneaux photovoltaïques, des éoliennes urbaines, des systèmes de cogénération et du stockage par batteries ou hydrogène. L'objectif est

d'assurer une production décentralisée tout en maintenant une stabilité de fréquence et de tension.

2.2 Architectures hiérarchiques et modulaires

Inspirés des systèmes distribués, ils reposent sur des niveaux de contrôle (local, intermédiaire et central). Cette approche favorise la scalabilité et permet d'adapter progressivement le micro-réseau aux besoins croissants des quartiers intelligents.

2.3 Intégration avec les Smart Grids

Les micro-réseaux urbains modernes s'intègrent dans des smart grids grâce à des protocoles avancés (IoT, blockchain, edgecomputing), permettant l'optimisation en temps réel de la consommation et la monétisation des surplus via le peer-to-peerenergytrading.

2.4 Micro-réseaux à base d'IA et de Big Data

Les algorithmes d'intelligence artificielle assurent une prédiction de la demande énergétique, une gestion prédictive du stockage et une détection d'anomalies. Ces architectures favorisent l'efficacité énergétique par une gestion fine et proactive.

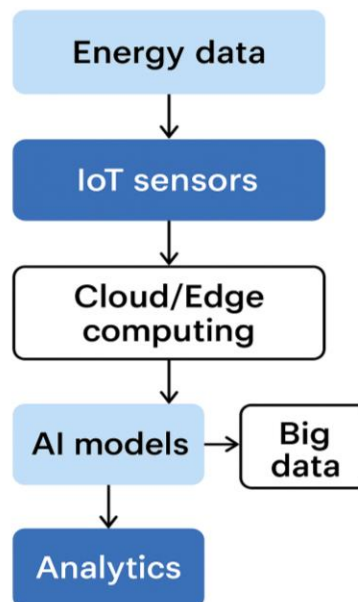


Figure 2 : Flux de données énergétiques avec IA et Big Data, dans les smart micro-réseaux (figure établie par l'auteur).

3. Efficacité Énergétique et Avantages

L'intégration des micro-réseaux dans les environnements urbains représente une étape clé vers la construction de systèmes énergétiques plus durables et intelligents. Ces infrastructures permettent une optimisation de l'utilisation des ressources locales, en réduisant les pertes liées au transport d'électricité et en améliorant l'efficacité énergétique globale (Lopes et al., 2006). Leur architecture décentralisée offre également une flexibilité opérationnelle accrue, grâce à des stratégies de gestion dynamique de la demande et de l'offre, adaptées aux variations temporelles de la consommation (Guerrero et al., 2013). De plus, les micro-réseaux accroissent la résilience énergétique des villes en

garantissant la continuité de service, notamment grâce au mode îloté qui assure l'autonomie lors de perturbations ou de coupures du réseau principal (Olivares et al., 2014).

Un autre avantage majeur réside dans la réduction de l'empreinte carbone, rendue possible par l'intégration massive des énergies renouvelables (photovoltaïque, éolien urbain, biomasse) et des solutions de stockage associées (Lasseter, 2011). Enfin, ces systèmes contribuent à renforcer la participation citoyenne en favorisant l'émergence de communautés énergétiques locales, où les habitants deviennent acteurs de la production, du partage et de la consommation d'énergie (Bauwens et al., 2016). Cette dimension sociale et collaborative positionne les micro-réseaux non seulement comme une solution technologique, mais aussi comme un vecteur d'innovation sociétale et de transition énergétique urbaine (Belmili H, et al.2017).

La figure 3, illustre la différence entre un réseau électrique conventionnel centralisé et un micro-réseau urbain en termes de pertes énergétiques. Dans un système classique, l'électricité produite dans des centrales éloignées subit des pertes significatives lors du transport et de la distribution sur de longues distances. À l'inverse, le micro-réseau, en valorisant les ressources locales (solaire, éolien, cogénération, etc.), réduit considérablement ces pertes grâce à une production décentralisée et à une consommation de proximité. La comparaison met ainsi en évidence l'efficacité accrue des micro-réseaux dans l'utilisation optimale de l'énergie produite.

La figure 4, met en évidence la contribution des micro-réseaux à la résilience et à la continuité de l'alimentation électrique. Alors qu'un réseau traditionnel est vulnérable aux pannes généralisées en cas de coupure ou d'incident majeur, un micro-réseau peut basculer en mode îloté, garantissant une alimentation locale autonome. La représentation graphique montre que l'intégration de ressources renouvelables et de systèmes de stockage dans les micro-réseaux permet de maintenir un approvisionnement stable et fiable, même lors de perturbations du réseau principal.

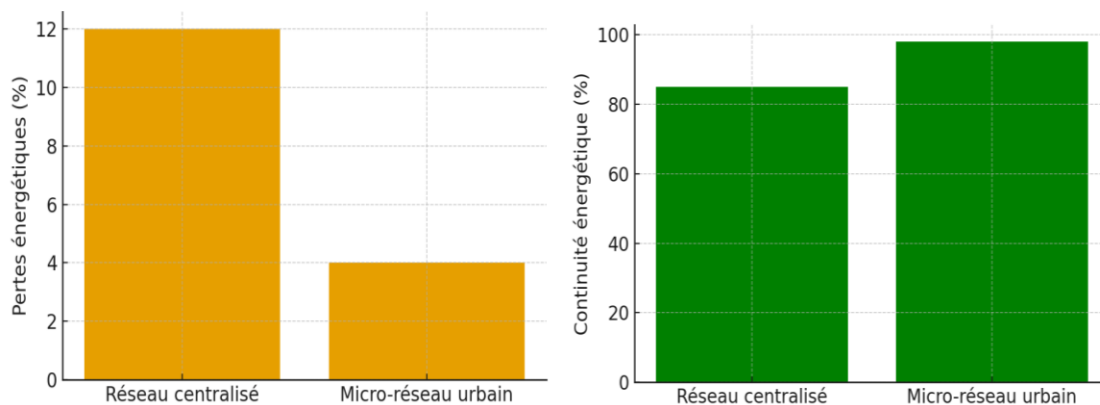


Figure 3 : Comparaison des pertes énergétique, **Figure 4 :** Amélioration de la continuité énergétique. (Figures établies par l'auteur).

Cette photographie dans la Figure 5 (Rolf Disch Solar Architecture, Wikimedia2014), illustre une mise en œuvre concrète d'un micro-réseau urbain dans un contexte européen. On y distingue l'intégration de différentes sources d'énergie renouvelable, telles que le

solaire photovoltaïque et l'éolien de petite échelle, couplées à des infrastructures de stockage et de distribution locales. L'image met en évidence l'approche décentralisée du système, où la production est réalisée à proximité immédiate des zones de consommation, ce qui réduit les pertes liées au transport d'électricité et améliore l'efficacité énergétique. Elle illustre également la capacité des micro-réseaux à s'adapter à un environnement urbain dense, tout en conciliant durabilité, fiabilité et esthétique architecturale.



Figure 5.Photo illustrative : Exemple de micro-réseau urbain en Europe.

4. Défis et Perspectives

Malgré le potentiel considérable des micro-réseaux urbains pour assurer une transition énergétique durable, leur déploiement à grande échelle demeure confronté à plusieurs défis structurels et technologiques. Tout d'abord, l'interopérabilité entre différentes technologies et opérateurs constitue un obstacle majeur, en raison de la diversité des standards de communication et de gestion énergétique, ce qui complique la coordination et l'intégration optimale des ressources distribuées. Ensuite, les coûts d'investissement initiaux élevés liés aux infrastructures intelligentes (capteurs, systèmes de gestion avancés, dispositifs de stockage) freinent leur adoption, notamment dans les pays en développement. De plus, l'absence ou l'insuffisance de cadres réglementaires et normatifs adaptés limite l'intégration harmonieuse des micro-réseaux dans les systèmes électriques existants. Enfin, la question de la cybersécurité demeure critique : l'essor de l'Internet des Objets (IoT) et des systèmes distribués accroît la vulnérabilité des micro-réseaux face aux cyberattaques, pouvant compromettre la stabilité et la résilience des réseaux (Zhang et al., 2021; Mahmoud et al., 2023). En revanche, les perspectives de développement sont prometteuses et ouvrent la voie à des innovations majeures. Parmi elles, on distingue la mise en place de micro-réseaux interconnectés à l'échelle des quartiers, permettant une gestion collaborative et une meilleure résilience face aux perturbations du réseau central. L'utilisation des jumeaux numériques (Digital Twins) émerge également comme un outil clé pour la modélisation, la simulation en temps réel et l'optimisation prédictive du fonctionnement des micro-réseaux (Seddaoui, N et al., 2023). Par ailleurs, l'intégration des solutions de mobilité électrique, notamment les concepts de Vehicle-to-Grid (V2G), ouvre de nouvelles perspectives pour le stockage distribué et la flexibilité de la demande énergétique. Ces innovations constituent des leviers stratégiques pour renforcer la durabilité, la fiabilité et la sécurité des micro-réseaux urbains.

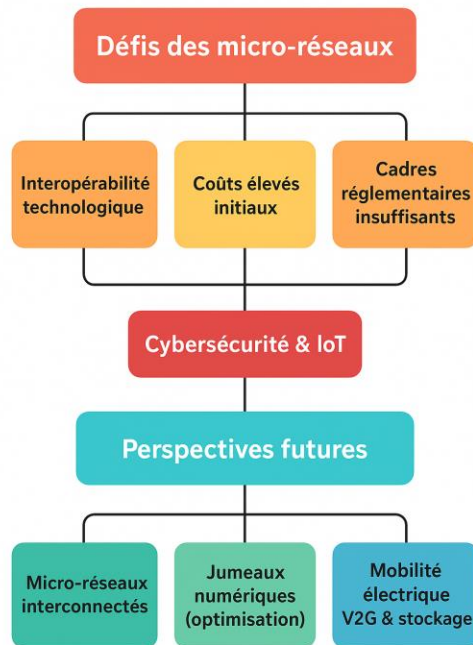


Figure 6 : Schéma conceptuel des défis et perspectives des micro-réseaux urbains (figure établie par l'auteur).

5. Conclusion

Les micro-réseaux urbains se positionnent comme un pilier central dans la construction de villes intelligentes, durables et résilientes. En intégrant des ressources énergétiques décentralisées, des dispositifs de stockage avancés et des systèmes de gestion intelligents, ils offrent une réponse structurée aux défis croissants liés à la transition énergétique, à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à l'augmentation de la demande urbaine. L'appui des technologies numériques, de l'intelligence artificielle et des solutions de cybersécurité constitue un levier déterminant pour optimiser leur fonctionnement, renforcer leur interopérabilité et garantir leur fiabilité. Ainsi, les micro-réseaux urbains ne se limitent pas à un outil technique, mais deviennent un vecteur stratégique pour concilier innovation énergétique, équité sociale et résilience climatique dans les villes de demain.

Références:

- [1]. United Nations, Department of Economic and Social Affairs (UN DESA). 2019. *World Urbanization Prospects*,
- [2]. Lund, H., Østergaard, P. A., Connolly, D., & Mathiesen, B. V. (2015). Smart energy and smart energy systems. *Energy*, 87, 256-262.
- [3]. Parag, Y., & Sovacool, B. K. (2016). Electricity market design for the prosumer era. *Nature Energy*, 1(4), 16032.
- [4]. Morstyn, T., Farrell, N., Darby, S. J., & McCulloch, M. D. (2018). Using peer-to-peer energy-trading platforms to incentivize prosumers to form federated power plants. *Nature Energy*, 3(2), 94–101.
- [5]. Lasseter, R. H. (2011). Smart distribution: Coupled microgrids. *Proceedings of the IEEE*.
- [6]. Olivares, D. E., Mehrizi-Sani, A., Etemadi, A. H., et al. (2014). *Trends in microgrid control. IEEE Transactions on Smart Grid*.
- [7]. Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Matas, J., de Vicuña, L. G., & Castilla, M. (2011). Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*.
- [8]. Parag, Y., & Sovacool, B. K. (2016). Electricity market design for the prosumer era. *Nature Energy*.
- [9]. Khodayar, M. E. (2017). Deep learning for real-time energy management of microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*.
- [10]. Lopes, J.A.P., Moreira, C.L., & Madureira, A.G. (2006). Defining control strategies for microgrids islanded operation. *IEEE Transactions on Power Systems*.
- [11]. Guerrero, J.M., Chandorkar, M., Lee, T.L., & Loh, P.C. (2013). Advanced control architectures for intelligent microgrids—Part I: Decentralized and hierarchical control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*.
- [13]. Lasseter, R.H. (2011). Smart distribution: Coupled microgrids. *Proceedings of the IEEE*.
- [14]. Bauwens, T., Gotchev, B., & Holstenkamp, L. (2016). What drives the development of community energy in Europe? The case of wind power cooperatives. *Energy Research & Social Science*.
- [15]. H. Belmili, R. Cheikh, T. Smail, N. Seddaoui, R.W. Biara, 2017, Study, design and manufacturing of hybrid vertical axis Savonius wind turbine for urban architecture, *Energy Procedia* Volume 136, Pages 330-335
- [16]. Khencha Khadidja . Biara Ratiba Wided . Belmili Hocine (2022), L'effet De L'orientation Et De L'angle D'inclinaison Des Modules Bipv Sur L'efficacite De La Production D'énergie : Application Sur Batiment En Milieu Aride. *Revue d'Architecture*, Volume 2, Numéro 1, Pages 32-46.
- [17]. Zhang, Y., Wang, J., & Zhao, D. (2021). Resilient urban microgrids: Challenges, models, and solutions. *Applied Energy*, 286, 116491.
- [18]. Mahmoud, M. S., Mohamed, A., & Guerrero, J. M. (2023). Cyber-security challenges in smart grids and microgrids: A comprehensive survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112747.
- [19]. Seddaoui, N., Belmili, H., et al. (2023). “An Efficient Harris Hawk Optimization Strategy for Microgrid Optimal Energy Planning.” *IEEE IREC 2023 Proceedings*.
- [20]. Disch, Rolf. *Solarsiedlung am Schlierberg (Solar Settlement)*, Vauban, Freiburg im Breisgau. Freiburg im Breisgau : Rolf Disch Solar Architecture, Wikimedia Commons. Licence CC BY-SA 4.0, 2014.