

08 novembre 2025
Journées Scientifiques Open Lab
Lab-STA & EDST

Intégration de l'IA et des jumeaux numériques dans les réseaux électriques

Dhaker ABBES

Professeur, Team-leader, JUNIA École d'ingénieurs – L2EP
(Laboratoire d'électrotechnique et d'électronique de
puissance), Lille, France

Dhaker.abbes@junia.com

Intégration de l'IA et des jumeaux numériques dans les réseaux électriques

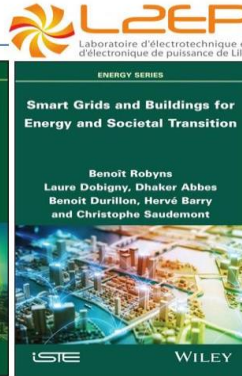
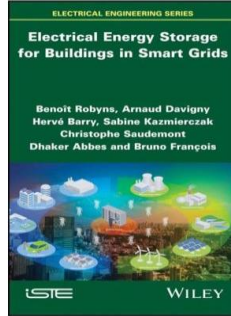
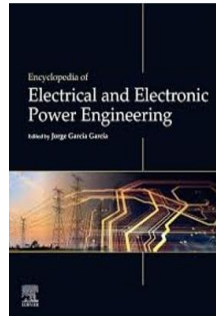
A propos de moi



Prof. Dhaker ABBES

- ❑ Docteur – Ingénieur en Génie Electrique / Automatique
- ❑ Domaines de compétences : Electrotechnique / Réseaux Electriques intelligents
Gestion optimale de l'énergie / Transition Energétique
Optimisation des systèmes énergétiques complexes
- ❑ EC responsable du domaine Energie, Systèmes Electriques et Automatisé, HEI (2013-2024)
- ❑ Responsable de l'équipe Smart Control Systems Junia depuis 2020
- ❑ Responsable de l'équipe Réseaux Electriques du L2EP depuis 2024
- ❑ Certifié développeur de projets innovants de l'IAE de Lille (2015) et Habilité à Diriger des Recherches de l'Université de Lille (2019)

JUNIA HEI



L2EP
Laboratoire d'électrotechnique et d'électronique de puissance de Lille

JUNIA : école des sciences et ingénierie
Membre de l'Université Catholique de Lille
La plus grande université privée (à but non lucratif) de France



Démonstrateur Smart Grid :
expérimentation à l'échelle réelle de puissance

Intégration de l'IA et des jumeaux numériques dans les réseaux électriques

Plan

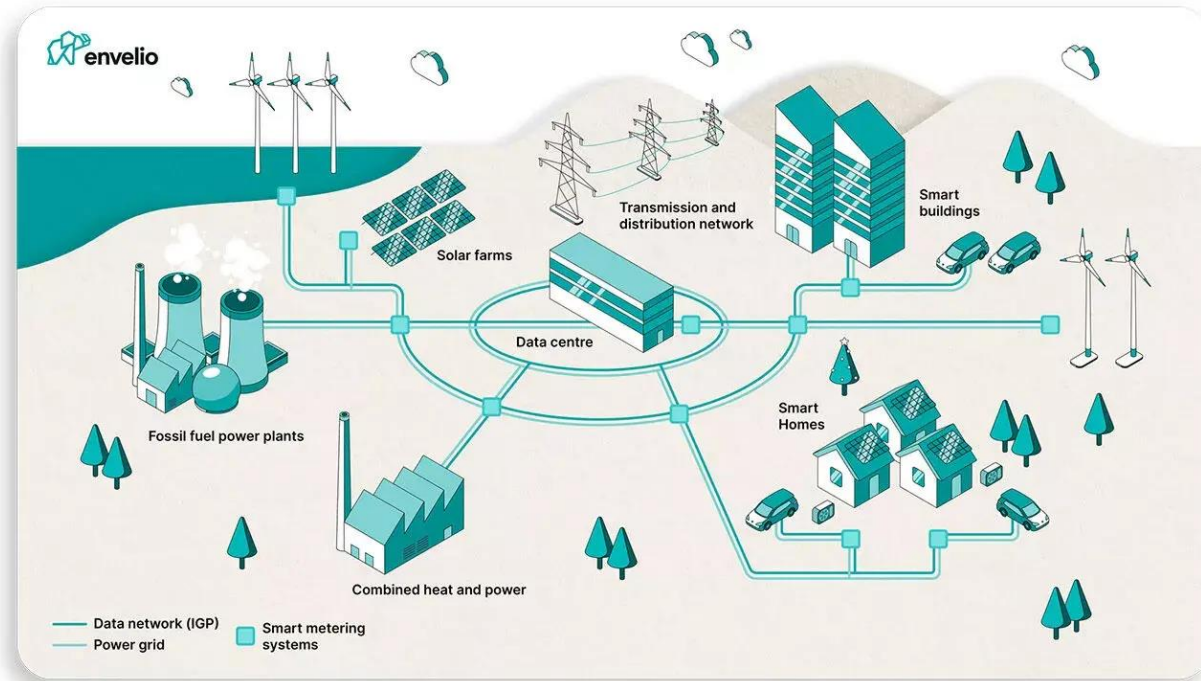
- Contexte et enjeux
- Qu'est-ce qu'un jumeau numérique ?
- Architecture & composantes d'un jumeau numérique
- Synergie : IA + jumeau numérique
- Cas d'application
- Exemples
- Défis techniques, organisationnels & réglementaires
- Conclusion
- Pour en savoir plus

Contexte et enjeux

Une mutation sans précédent du secteur électrique

🌍 Une révolution énergétique mondiale en marche

- ❑ Le système électrique connaît une transformation structurelle profonde, portée par la **transition énergétique** et la **neutralité carbone**.
- ❑ Trois dynamiques majeures s'imposent :
 - **Montée en puissance des énergies renouvelables** (solaire, éolien, hydraulique) — elles représentent déjà plus de 30 % de la capacité mondiale installée et continuent de croître.
 - **Électrification massive** des usages : mobilité électrique, chauffage décarboné (pompes à chaleur), procédés industriels.
 - **Apparition de flux bidirectionnels** : les consommateurs deviennent aussi producteurs (*prosumers*), injectant leur surplus dans le réseau grâce au photovoltaïque, au stockage domestique ou aux véhicules-to-grid.



Système électrique intelligent

Contexte et enjeux

Une mutation sans précédent du secteur électrique

Des défis nouveaux et complexes

- **Variabilité accrue** de la production renouvelable intermittente, exigeant un pilotage fin en temps réel.
- **Complexité du système** : multiplication des acteurs, des capteurs et des points de connexion.
- **Vieillesse des infrastructures** : de nombreux actifs dépassent 40 ans d'âge, avec un besoin urgent de modernisation.
- **Flexibilité** : essentielle pour équilibrer production et consommation, intégrer le stockage et la demande pilotable.
- Selon une étude publiée dans *MDPI Sustainability* (2023) [1], **la demande électrique mondiale pourrait croître d'environ 50 % d'ici 2050**, sous l'effet conjugué de l'électrification et de la croissance démographique.

Vers un réseau intelligent, adaptatif et numérique

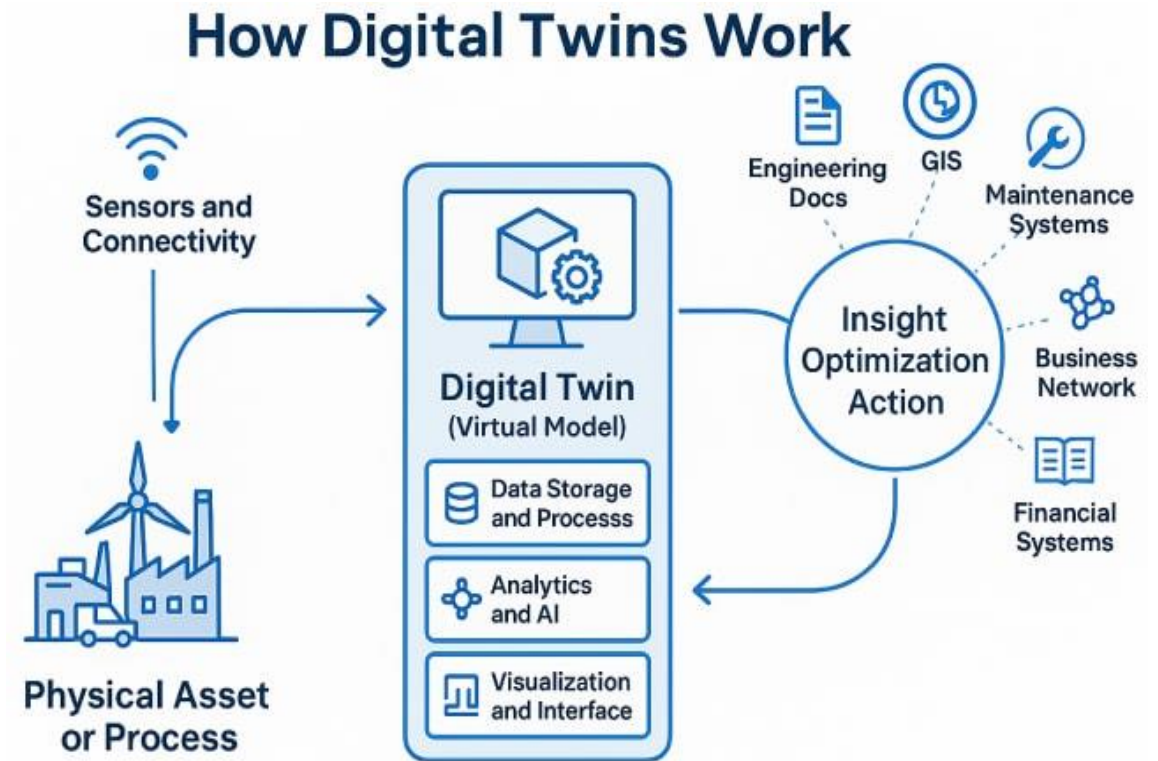
- Le réseau électrique traditionnel, historiquement **centralisé et unidirectionnel**, doit évoluer vers un **écosystème numérique, distribué et interactif**.
- Cela implique :
 - des capteurs temps réel et une connectivité accrue,
 - des outils de simulation et d'analyse prédictive,
 - et surtout, l'intégration de **jumeaux numériques** et de **solutions d'intelligence artificielle** capables de modéliser, prévoir et optimiser en continu.

Qu'est-ce qu'un jumeau numérique (Digital Twin) ?

❖ **Définition (selon International Electrotechnical Commission – IEC) [2] :** « la représentation numérique d'une entité cible avec des connexions de données qui permettent la convergence entre les états physiques et numériques avec un taux de synchronisation approprié ».

❖ **Dans le secteur électrique :** un actif ou un système (transformateur, ligne, sous-station, réseau entier) est modélisé numériquement, connecté en temps réel aux données d'exploitation, permettant simulation, surveillance, diagnostics [3].

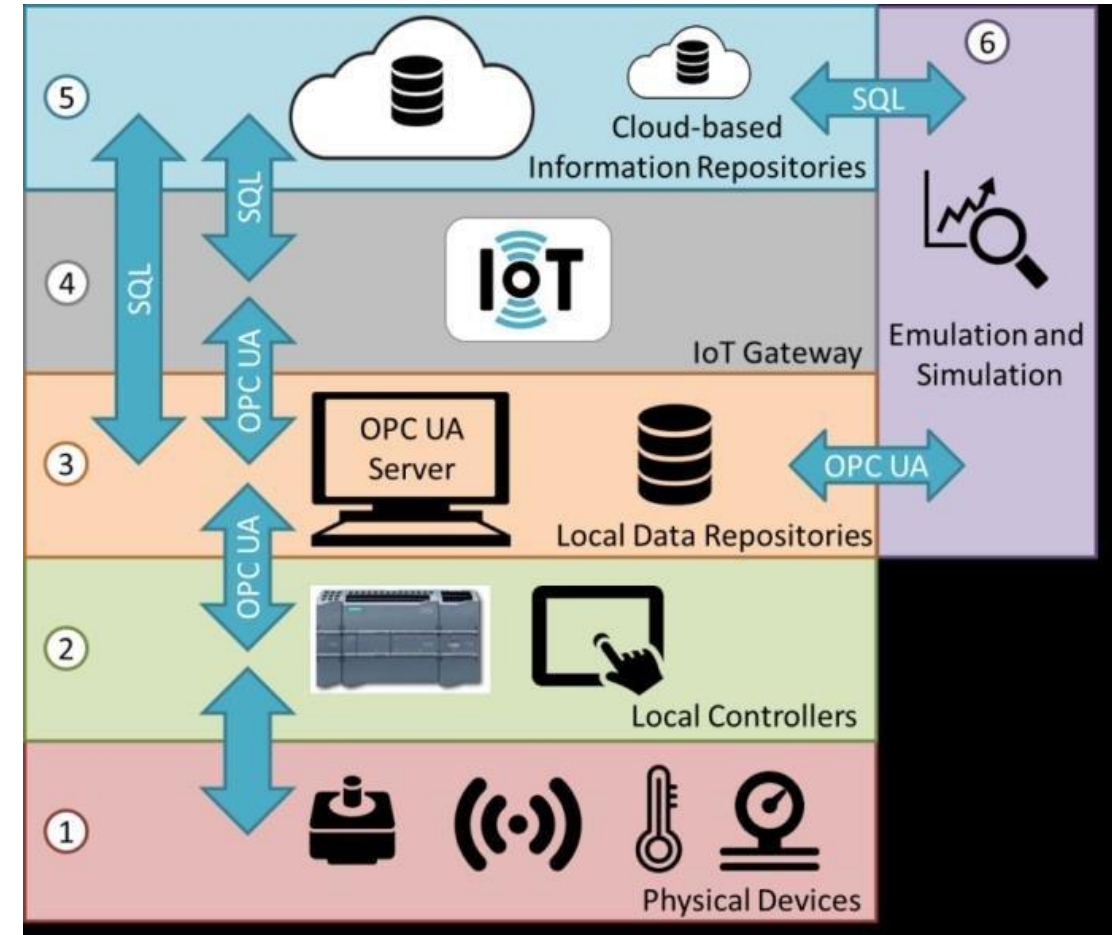
❖ **Différence avec une simple simulation :** un jumeau numérique évolue en temps réel, intègre des données opérationnelles, interagit (feedback) avec le physique. -
> **Le jumeau numérique est bien plus qu'un modèle statique – c'est un miroir numérique actif du système électrique.**



<https://www.opentext.com/what-is/digital-twin>

Architecture & composants d'un jumeau numérique

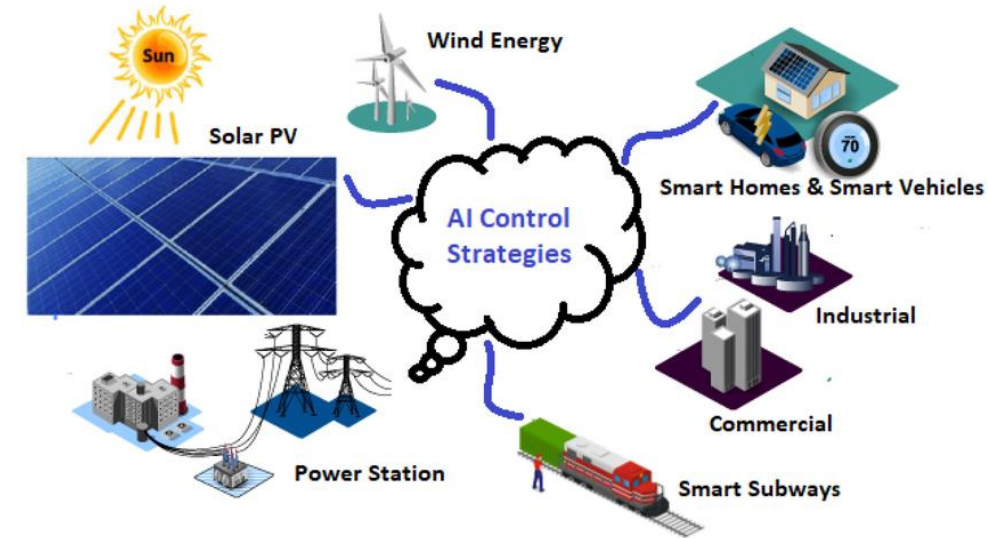
- ❖ **Architecture typique dans le secteur électrique :**
couche physique (capteurs, IoT, SCADA), couche de données et communication, couche de modélisation et simulation, couche services/analytique.
- ❖ **Exigences techniques :** interopérabilité (ex : standards IEC 61850, CIM) ; cybersécurité, latence faible, gouvernance des données.
- ❖ Cette figure [4] illustre l'**architecture à six couches du jumeau numérique**, ainsi que les **flux de données et d'informations** entre ces couches. Elle montre que les données et informations circulent depuis le **système physique**, ou *jumeau physique* (couche 1), vers le **cloud** (couche 5), où elles sont stockées dans un **référentiel d'informations** accessible dans le cyberspace. Les informations peuvent également **circuler en sens inverse**, du cloud vers le jumeau physique. L'architecture comporte, dans sa **quatrième couche**, une fonctionnalité optionnelle de **conversion des données en informations**. Enfin, la **sixième couche** intègre les **logiciels de simulation ou d'émulation**, ainsi que d'autres applications capables d'exploiter les informations issues du jumeau physique pour **réaliser les objectifs des systèmes cyber-physiques de production (CPPS)**.



➤ **Pour exploiter un jumeau numérique, il faut une architecture robuste, intégrée, standardisée et sécurisée.**

L'apport de l'IA au réseau électrique

- ❖ L'IA permet d'analyser **des volumes massifs de données historiques et prévisionnelles** (consommation, production, météo, mobilité, topologie réseau).
- ❖ Grâce à des algorithmes d'**optimisation et d'apprentissage automatique**, elle aide à :
 - Identifier les zones à risque de congestion et les points faibles du réseau.
 - Évaluer différents **scénarios d'intégration d'énergies renouvelables** et de stockage.
 - Proposer des **investissements optimaux** en infrastructures selon les coûts, les impacts carbone et la flexibilité attendue.
- ❖ Dans les réseaux en temps réel, l'IA agit comme un **cerveau d'analyse prédictive** capable de :
 - Détecter des anomalies, pertes ou surcharges avant qu'elles ne deviennent critiques.
 - Ajuster automatiquement la tension, la fréquence ou les flux de puissance pour maintenir la stabilité.
 - Coordonner les ressources décentralisées (photovoltaïque, batteries, véhicules électriques) en temps réel.
- ❖ L'IA facilite ainsi le passage d'une exploitation **réactive** à une exploitation **proactive et auto-adaptative**, où le réseau apprend en continu à s'équilibrer.

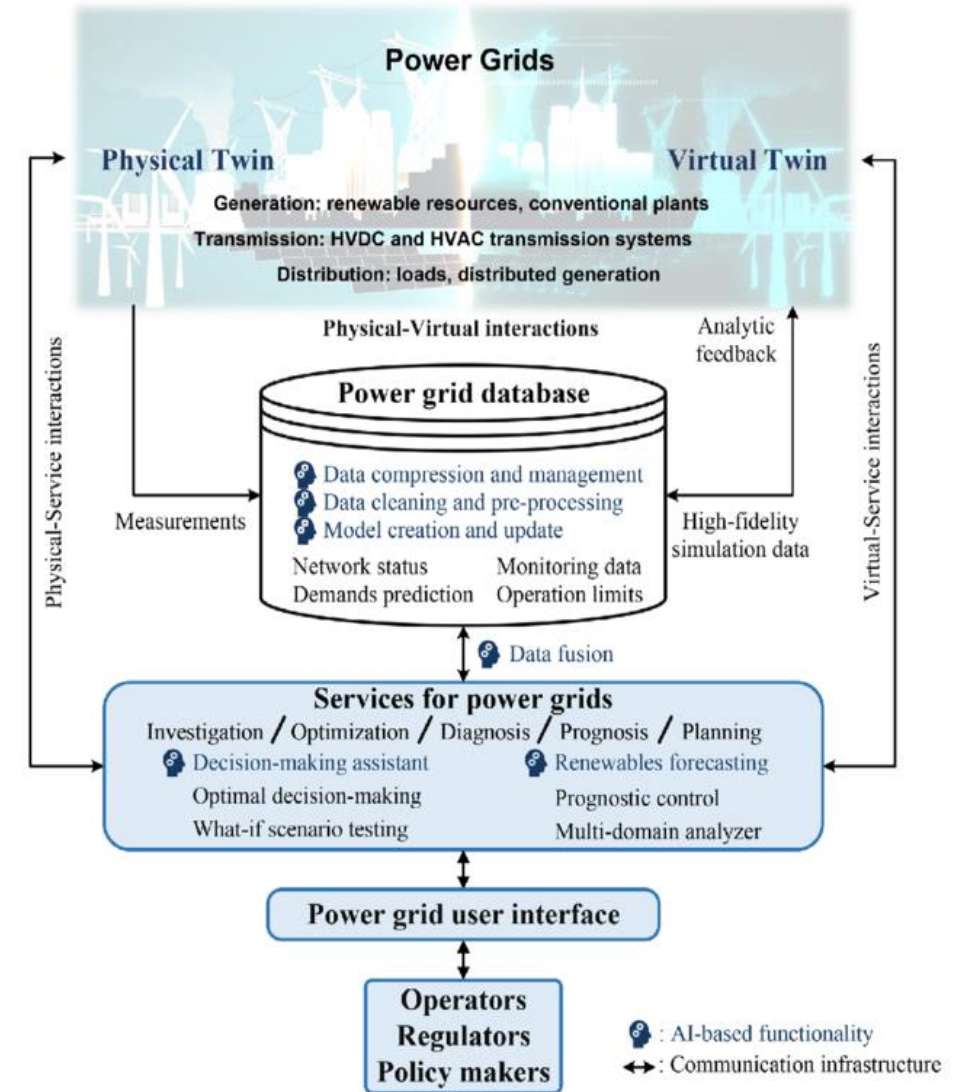


-> **L'intelligence artificielle transforme le réseau électrique en un système plus prévisible, plus agile et plus résilient, capable non seulement de réagir, mais aussi d'anticiper et d'apprendre.**

Synergie : IA + jumeau numérique

- ❖ Le jumeau numérique fournit : modèle contextuel + données en temps réel + simulation de l'actif/système.
- ❖ L'IA exploite ce jumeau pour : apprendre le comportement, détecter tendances, optimiser, proposer des actions prescriptives.

-> L'association IA + jumeau numérique crée une boucle fermée de monitoring-simulation-optimisation-action pour les réseaux électriques.

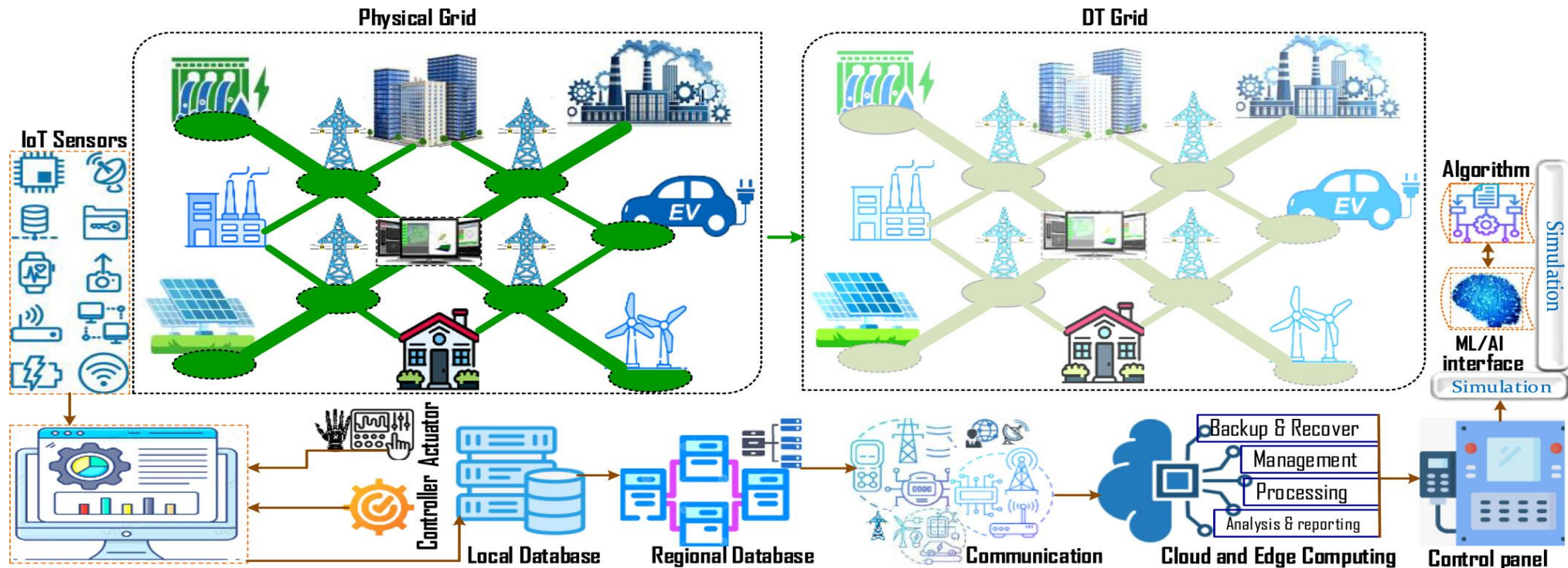


Cas d'application

❖ Cas d'usage : planification réseau

- ❑ Utiliser le jumeau numérique du réseau (ou partie) pour simuler des scénarios d'évolution : intégration d'ENR, stockage, véhicules électriques, contingences [6].
- ❑ Avec l'IA : optimisation de plans, prédiction des congestions, choix de renforcement, évaluation d'impact carbone.

-> En amont, jumeau + IA permettent de réduire les incertitudes et de faire les bons investissements au bon moment.



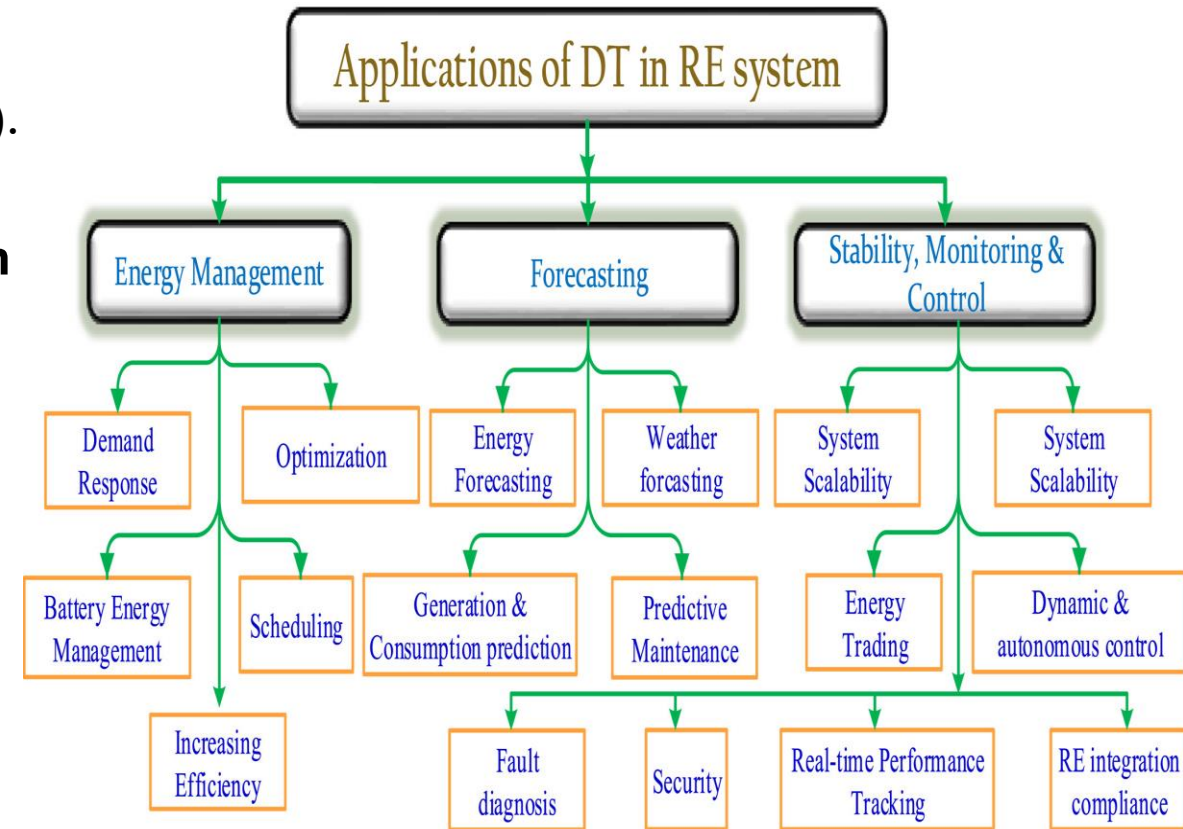
Cas d'application

❖ Cas d'usage : exploitation temps-réel & flexibilité

- ❑ Le jumeau numérique reçoit des données en temps réel (capteurs, PMU, SCADA) pour reproduire l'état courant du réseau.
- ❑ IA active : détection d'anomalies, ajustement automatique de paramètres (tension, réactif, activation de stockage/flexibilité).

❖ Cas d'usage : maintenance prédictive et formation

- ❑ Jumeaux d'équipements : transformateurs, disjoncteurs, protections – suivi du vieillissement, simulation de défaillances, recommandations de maintenance.
- ❑ Formation / test virtuel : environnement HIL (hardware-in-the-loop) ou SIL pour l'entraînement d'opérateurs et l'entraînement d'IA avant déploiement sur le terrain.
- ❑ IA permet de détecter des signatures avant-coureurs de panne, d'optimiser les calendriers de maintenance, de réduire les coûts et indisponibilités.

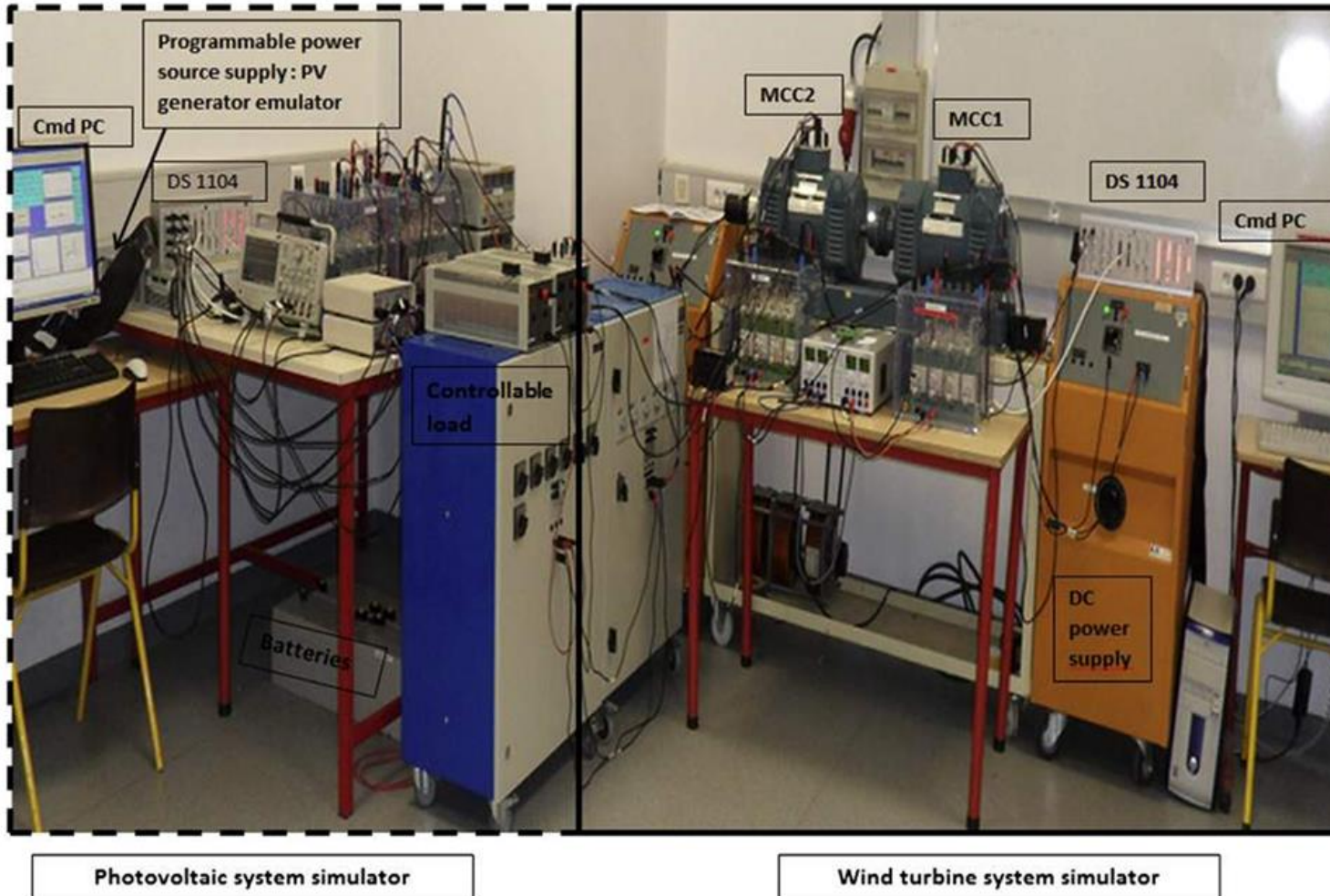


Applications des jumeaux numériques dans les systèmes d'énergies renouvelables [6]

Exemples

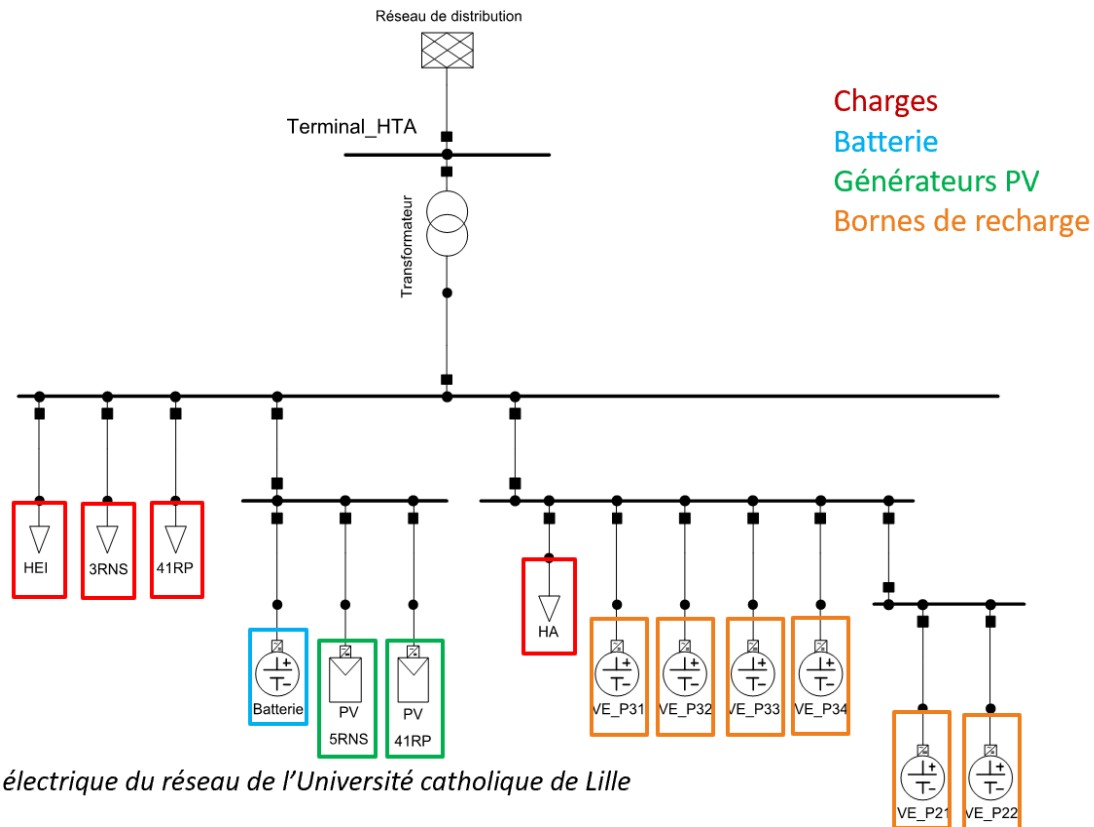
❖ Emulateur éolien et photovoltaïque alimenté par des données météo [8]

D. Abbes et al./Simulation Modelling Practice and Theory 42 (2014) 53–72



Exemples

❖ Modélisation du réseau électrique de l'Université Catholique de Lille avec PowerFactory [9]



Exemples



CENTRALE LILLE

THESE

Présentée en vue
d'obtenir le grade de

DOCTEUR

En

Spécialité : Génie Electrique

Par

Egonnumi Lorraine CODJO

DOCTORAT délivré conjointement par CENTRALE LILLE et FACULTÉ POLYTECHNIQUE DE
L'UNIVERSITÉ DE MONS

Titre de la thèse :

**Data-based investigations of Low Voltage Distribution Systems:
Machine Learning Applications for the monitoring of the network
under ageing and variable atmospheric conditions**

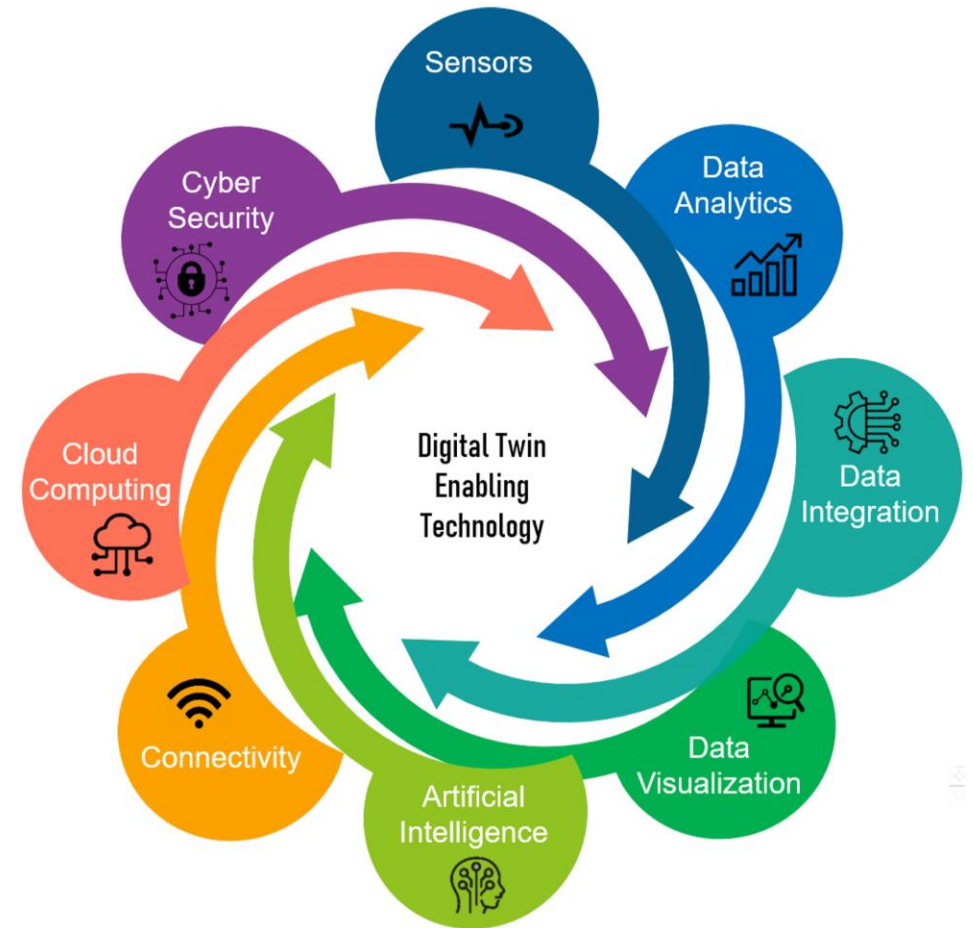
Soutenu le 24 novembre 2022



- ❑ **Exploitation des données de comptage intelligent (Linky, etc.)** pour reconstruire la topologie du réseau et identifier ses impédances.
- ❑ **Modélisation probabiliste** du comportement des câbles selon la température et l'environnement, via des **simulations Monte Carlo** et des calculs de **Load Flow** (flux de charge).
- ❑ **Analyse du vieillissement des câbles** (dégradation de l'isolation) et de son impact sur les profils de tension du réseau.
- ❑ **Application du Machine Learning (ML)** pour :
 - détecter les **dégradations précoces** des câbles,
 - **classer l'état de santé** des lignes,
 - et **prédire les pannes** à partir de données temps réel.

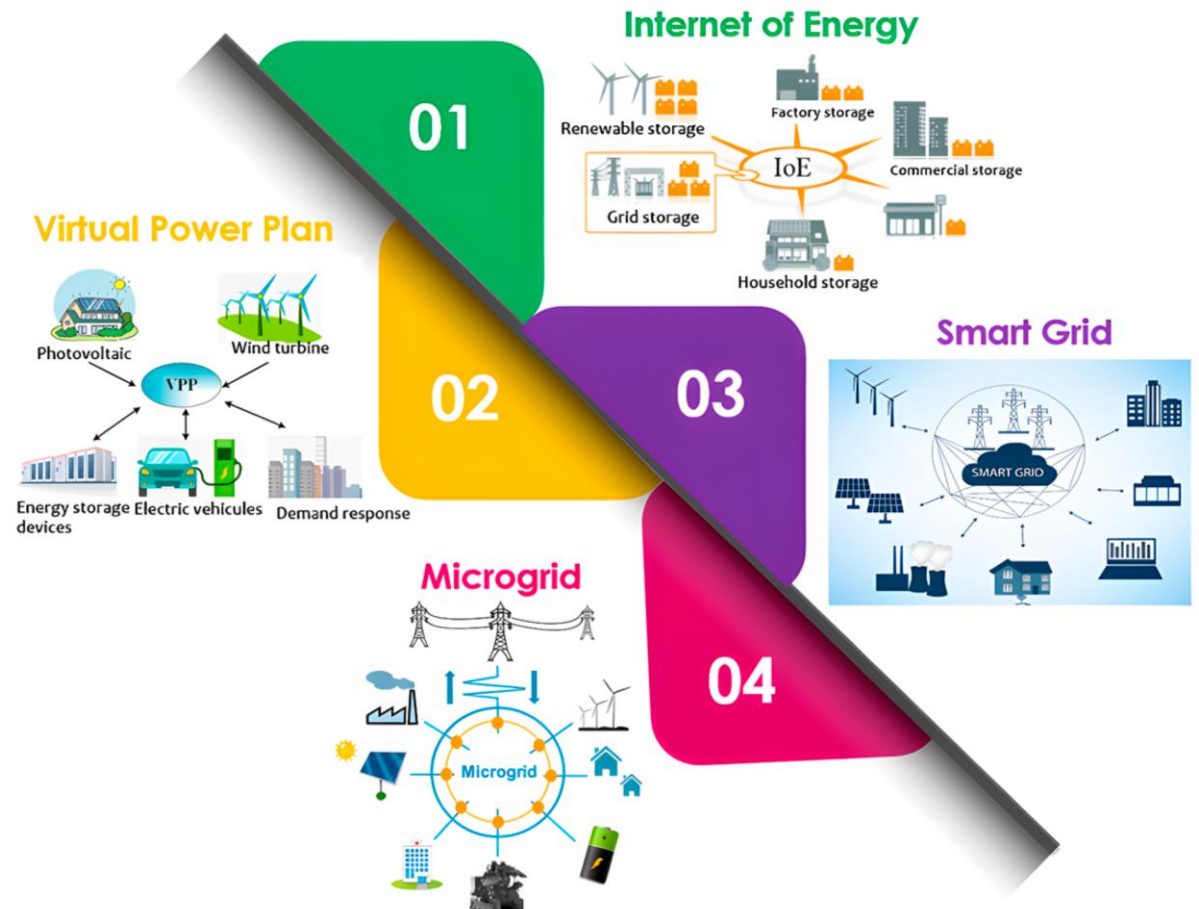
Défis techniques, organisationnels & réglementaires

- ❑ **Techniques** : interopérabilité des systèmes, latence, intégration de données hétérogènes, cyber-sécurité, modèles précis.
- ❑ **Organisationnels** : gouvernance des données, propriété, culture numérique, compétences IA et jumeau, gestion du changement.
- ❑ **Réglementaires/éthiques** : protection des données, souveraineté numérique, transparence de l'IA (ex : “explainability”), conformité RGPD.
- ❑ **Perspectives** : standardisation (IEC, VDE, T&D Europe), jumeaux inter-sectoriels, IA générative



Conclusion

- ❑ Le réseau de demain : intelligent, adaptatif, résilient, décarboné – rendu possible par l'intégration de l'IA et des jumeaux numériques.
- ❑ Le jumeau numérique + IA sont un socle stratégique : surveillance temps réel, simulation, optimisation, action automatique.
- ❑ Les technologies sont mûres mais leur mise en œuvre nécessite une approche globale (technique + humaine + réglementaire).
- ❑ Invitation à l'action : lancer des projets pilotes, structurer les données, former les équipes, adopter les standards.



Progrès dans les innovations des réseaux électriques [7]

Pour en savoir plus

❖ Références

- [1] SONG, Zhao, HACKL, Christoph M., ANAND, Abhinav, *et al.* Digital twins for the future power system: An overview and a future perspective. *Sustainability*, 2023, vol. 15, no 6, p. 5259.
- [2] ENTSO-E Technopedia, Digital Twins (DT), <https://www.entsoe.eu/technopedia/techsheets/digital-twin-dt/>
- [3] VDE ETG Stydy , The Digital Twin in the Network and Electricity Industry, <https://www.vde.com/resource/blob/2293228/3e50b3417c8777c85e9e33cb3e1e9ebc/vde-study-the-digital-twin-in-the-network-and-electricity-industry-data.pdf>
- [4] REDELINGHUYS, Anro, BASSON, Anton, et KRUGER, Karel. A six-layer digital twin architecture for a manufacturing cell. In : *International Workshop on Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing*. Cham : Springer International Publishing, 2018. p. 412-423.
- [5] SHEN, Zhiwei, ARRAÑO-VARGAS, Felipe, et KONSTANTINOU, Georgios. Artificial intelligence and digital twins in power systems: Trends, synergies and opportunities: [version 2; peer review: 2 approved]. *Digital Twin*, 2024, vol. 1, no 3, p. 11.
- [6] AL-SHETWI, Ali Q., ATAWI, Ibrahim E., EL-HAMEED, Mohamed A., *et al.* Digital Twin Technology for Renewable Energy, Smart Grids, Energy Storage and Vehicle-to-Grid Integration: Advancements, Applications, Key Players, Challenges and Future Perspectives in Modernising Sustainable Grids. *IET Smart Grid*, 2025, vol. 8, no 1, p. e70026.

Pour en savoir plus

❖ Références

[7] MCHIRGUI, Nabil, QUADAR, Nordine, KRAIEM, Habib, et al. The applications and challenges of digital twin technology in smart grids: A comprehensive review. *Applied Sciences*, 2024, vol. 14, no 23, p. 10933.

[8] ABBES, Dhaker, MARTINEZ, André, CHAMPENOIS, Gérard, *et al.* Real time supervision for a hybrid renewable power system emulator. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2014, vol. 42, p. 53-72.

[9] STEPHANT, Matthieu. *Optimisation de l'autoconsommation dans une communauté énergétique locale via une blockchain*. 2021. Thèse de doctorat. HESAM Université.