

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](mailto:Dhaker.abbes@junia.com)

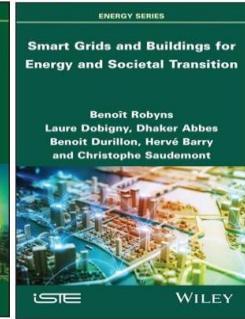
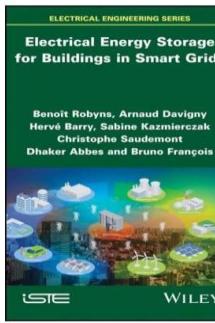
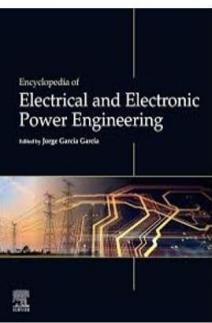
# Intégration de l'IA et des jumeaux numériques dans les réseaux électriques

## 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 : 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

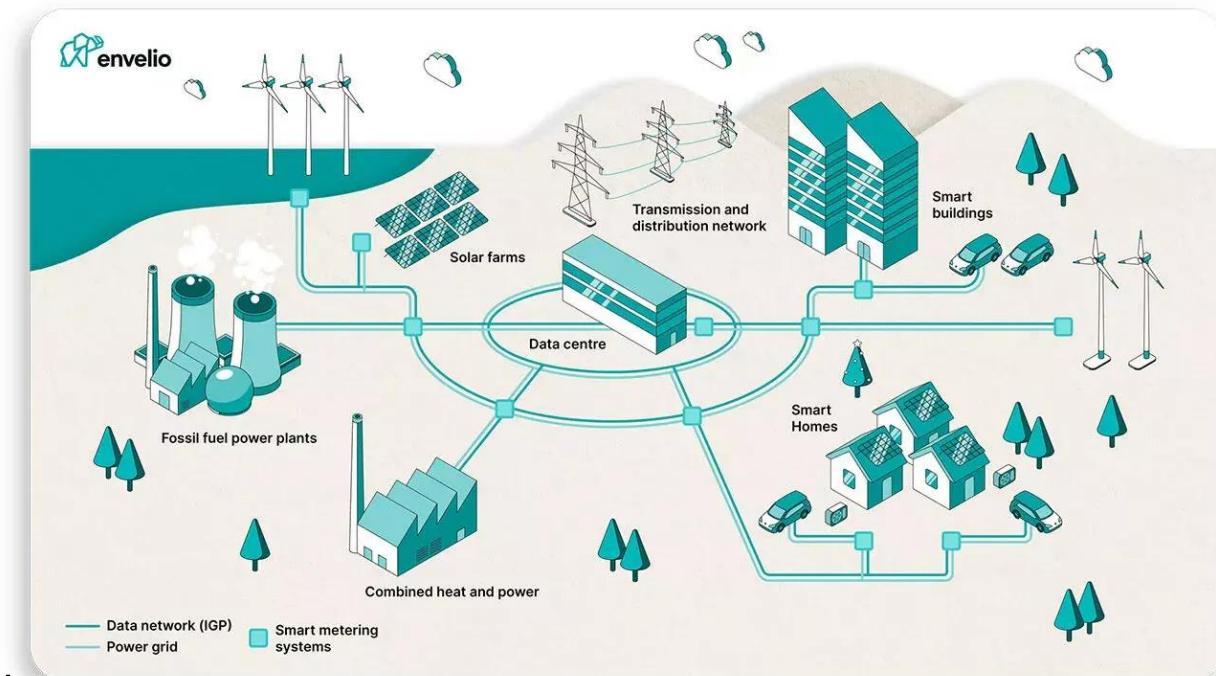
- Contexte et enjeux
- Qu'est-ce qu'un jumeau numérique ?
- Architecture & composantes d'un jumeau numérique
- Synergie : IA + jumeau numérique
- Cas d'application
- Exemples
- Défis techniques, organisationnels & réglementaires
- Conclusion
- Pour en savoir plus

# 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

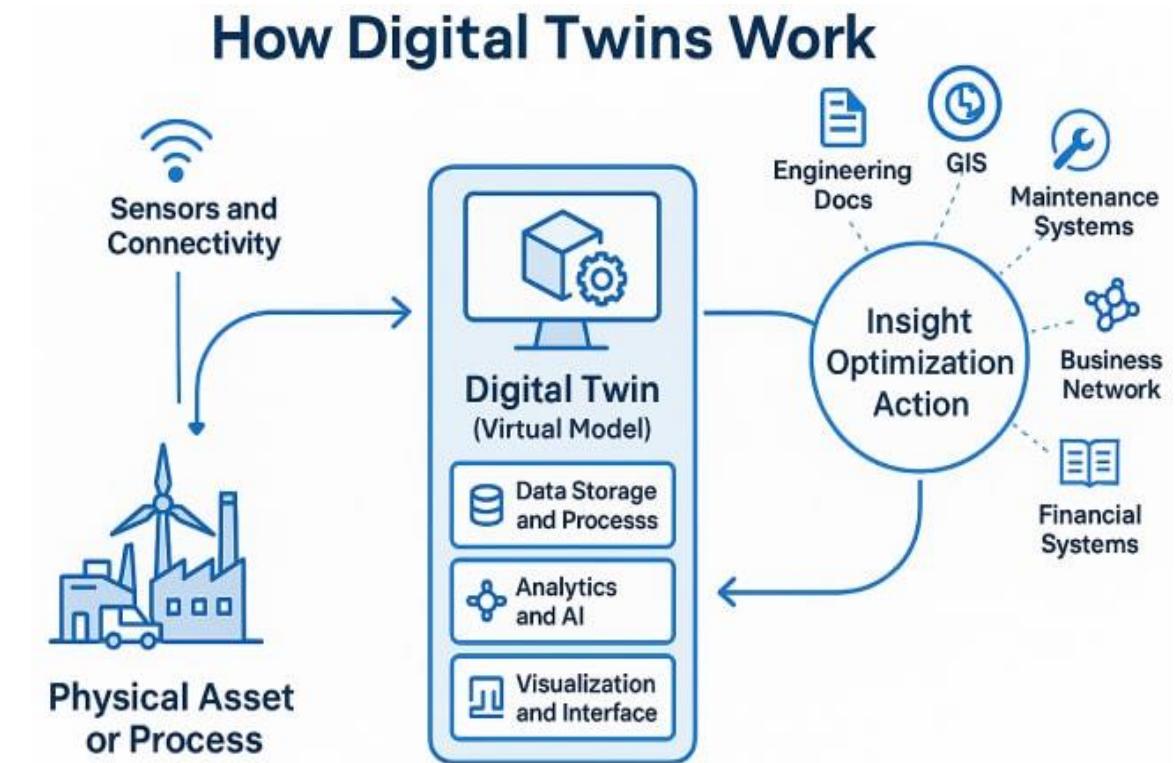
- **Variabilité accrue** de la production renouvelable intermittente, exigeant un pilotage fin en temps réel.
- **Complexité du système** : multiplication des acteurs, des capteurs et des points de connexion.
- **Vieillissement des infrastructures** : de nombreux actifs dépassent 40 ans d'âge, avec un 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>

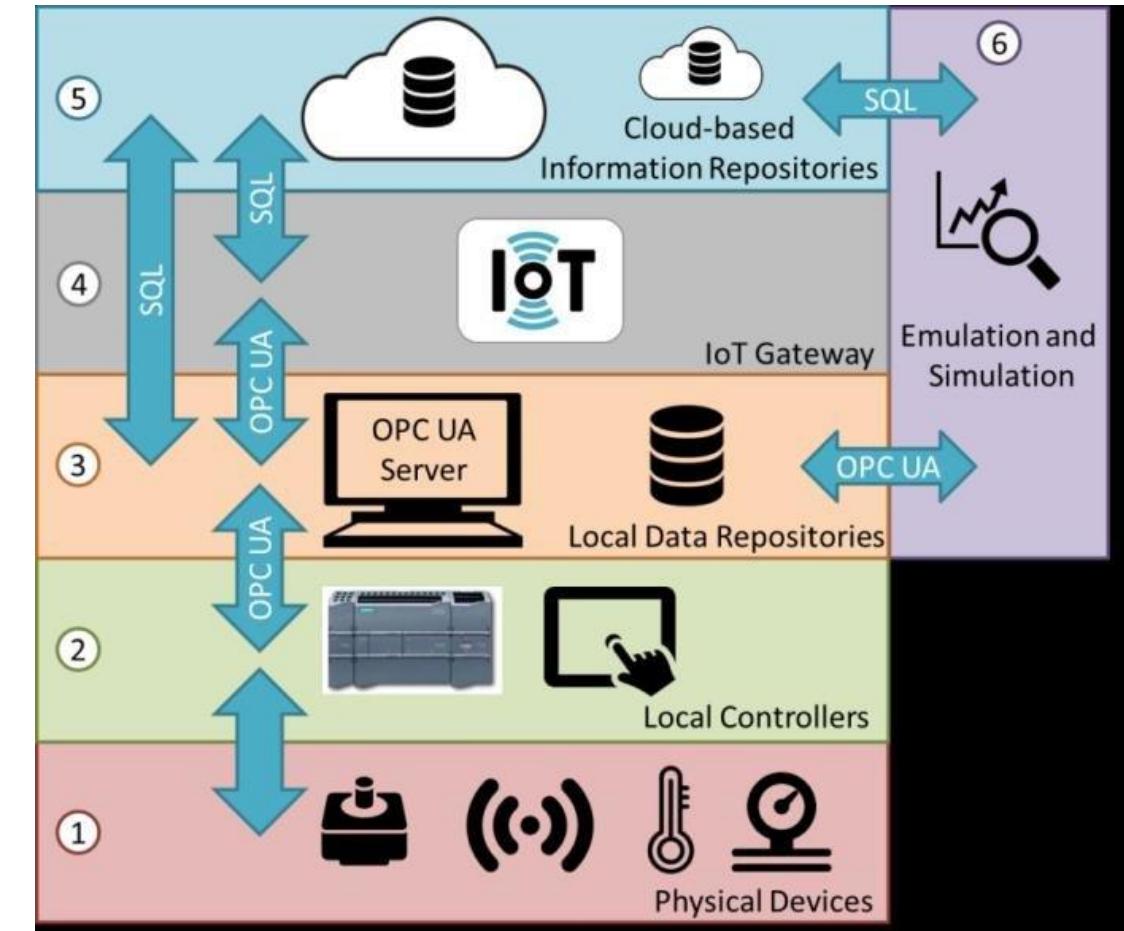
# Architecture & composantes d'un jumeau numérique

## ❖ 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.<sup>7</sup>

# 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 :
  - Déetecter 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.

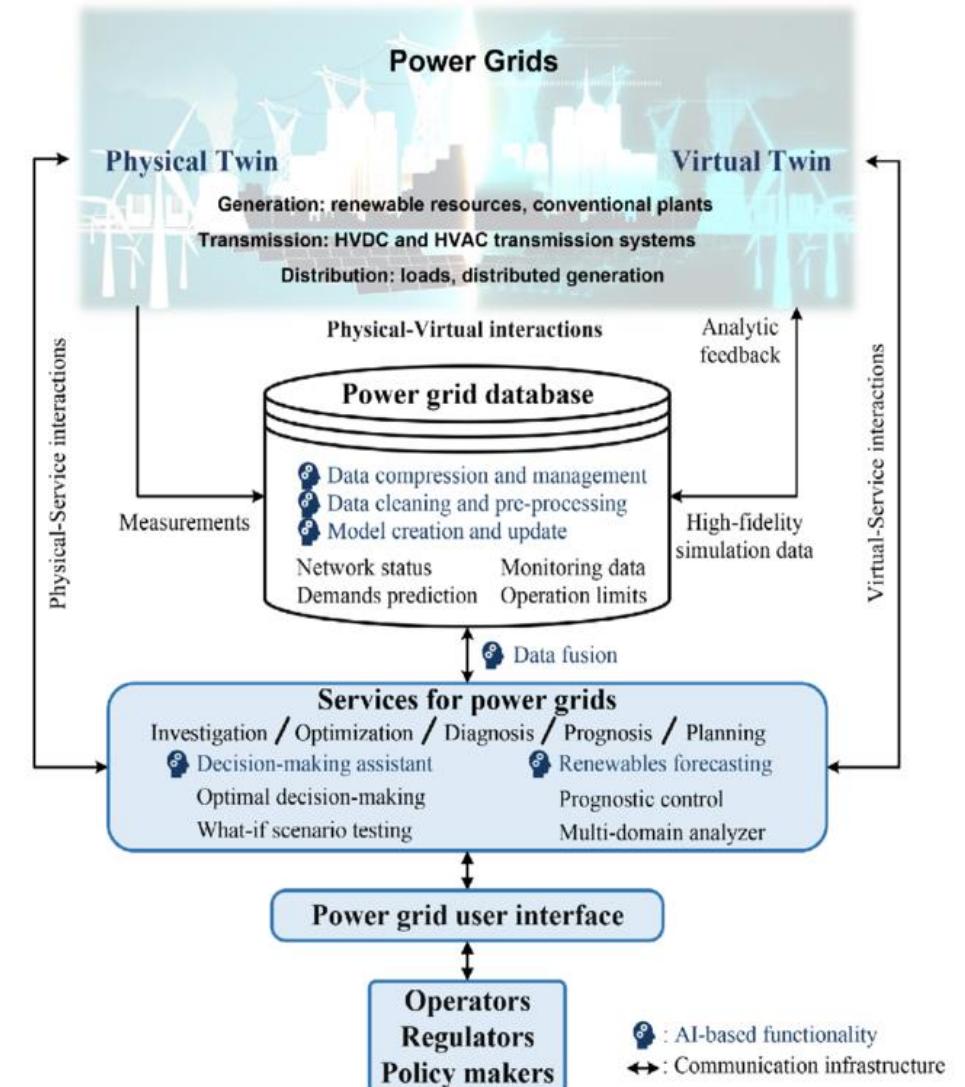


**-> L'intelligence artificielle transforme le réseau électrique en un système plus prévisible, plus agile et plus résilient, capable non seulement de réagir, mais aussi d'anticiper et d'apprendre.**

# 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.**



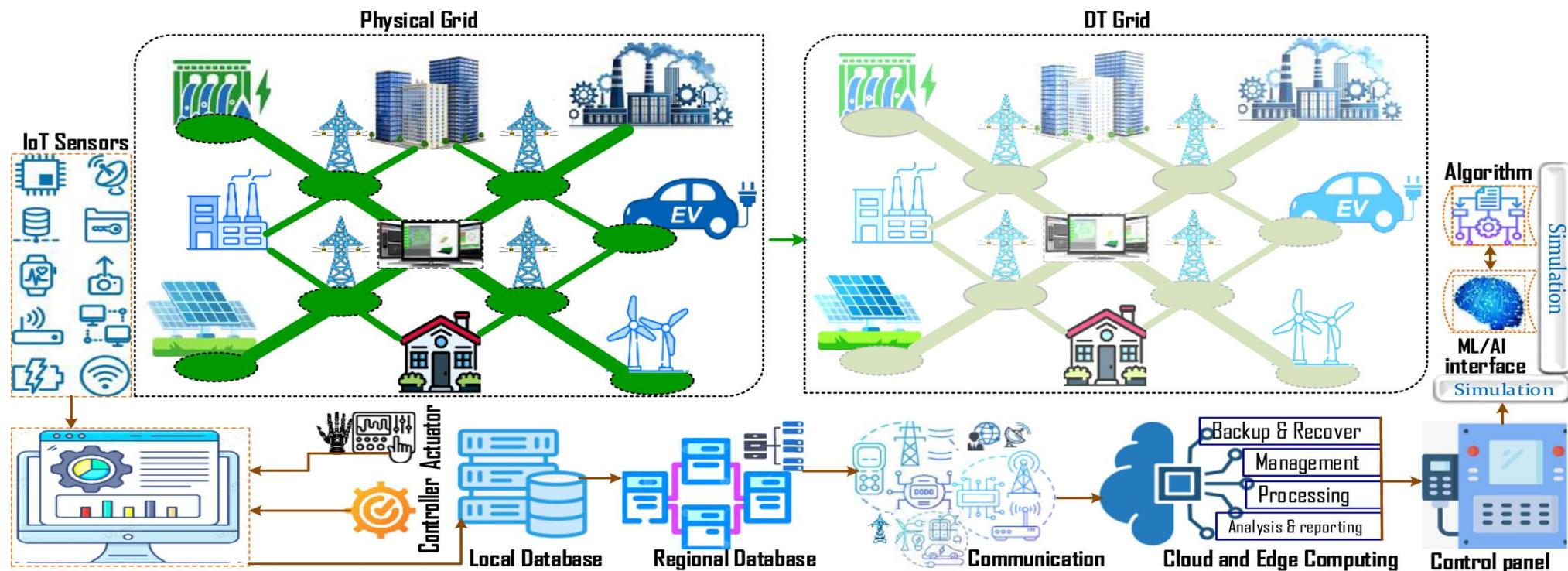
Réseaux électriques intelligents basés sur des jumeaux numériques et l'IA [5]

# 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.**



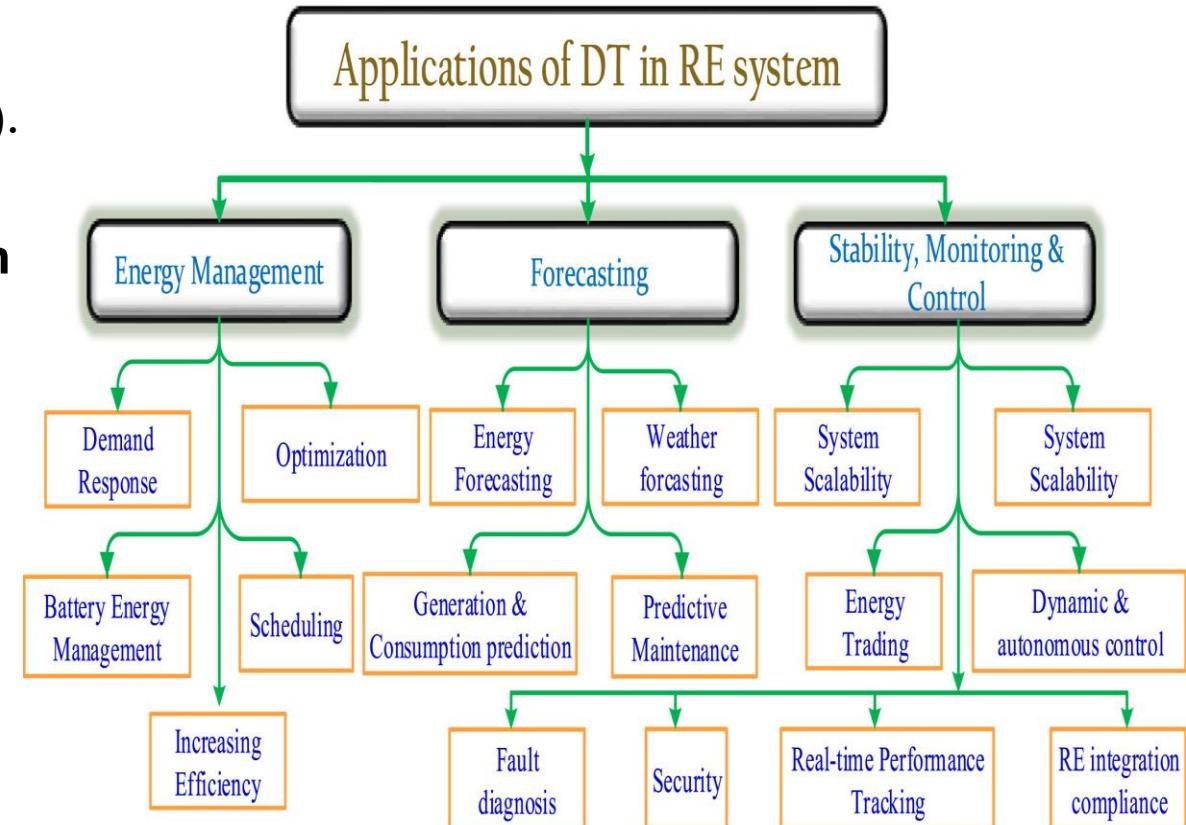
# Cas d'application

## ❖ 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.

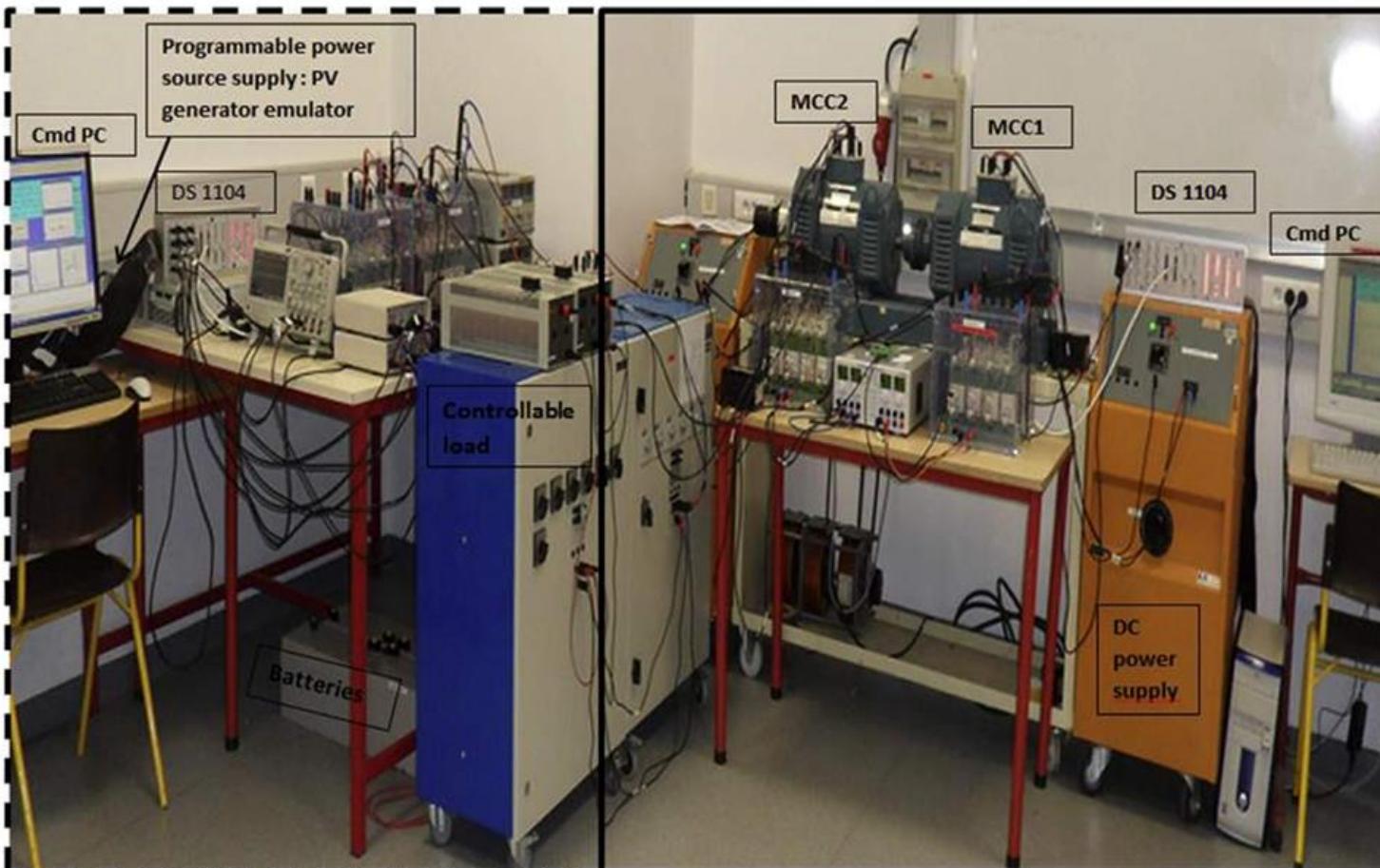


Applications des jumeaux numériques dans les systèmes d'énergies renouvelables [6]

# Exemples

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

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



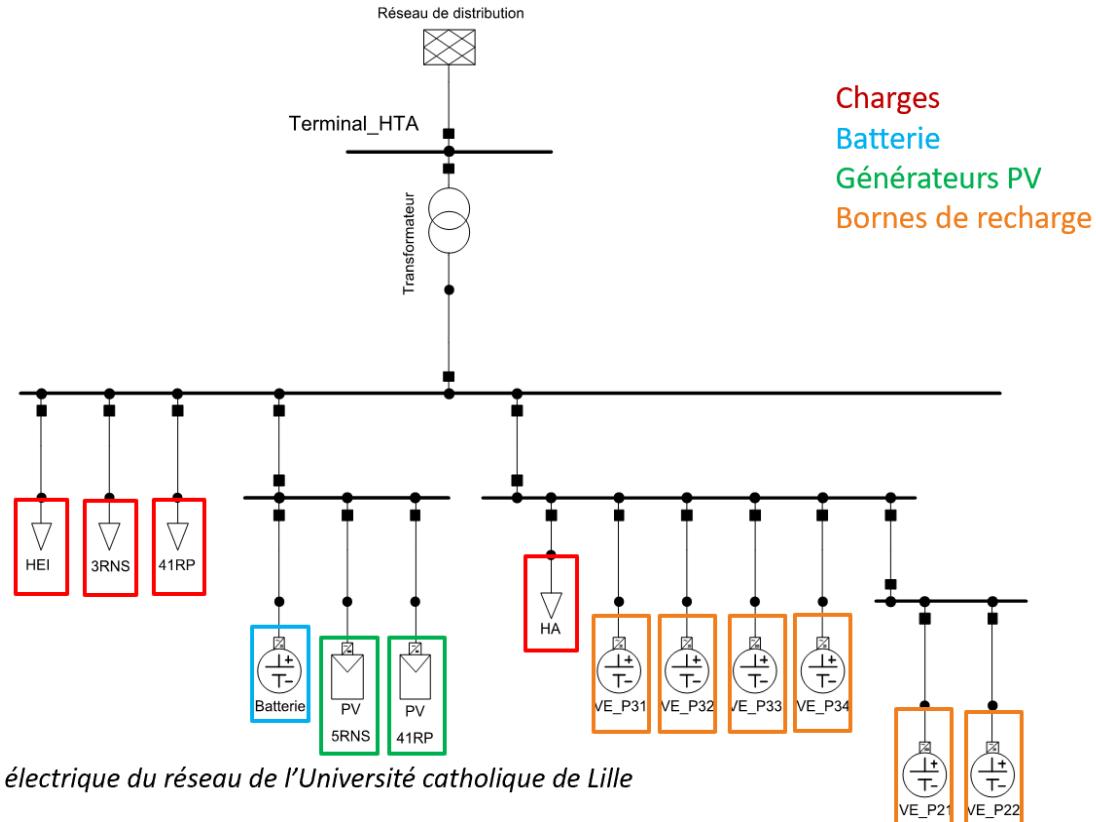
Photovoltaic system simulator

Wind turbine system simulator



# 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**

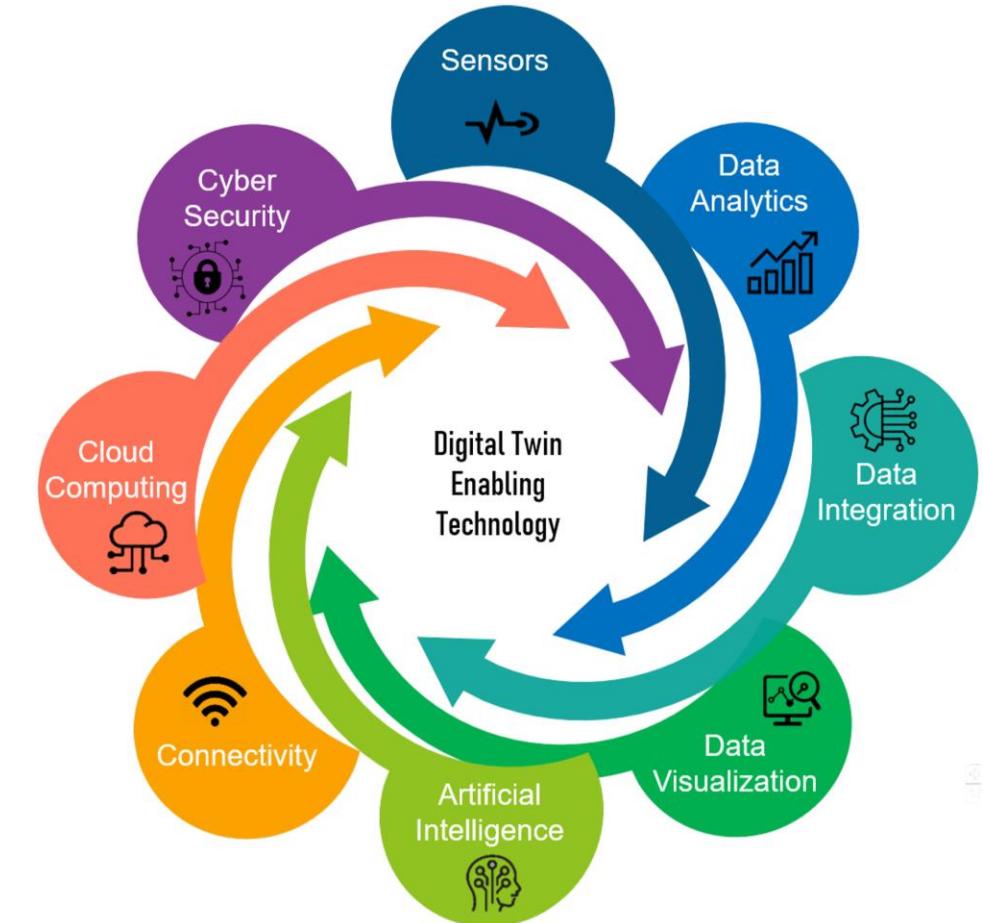
Soutenu le 24 novembre 2022



- **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.

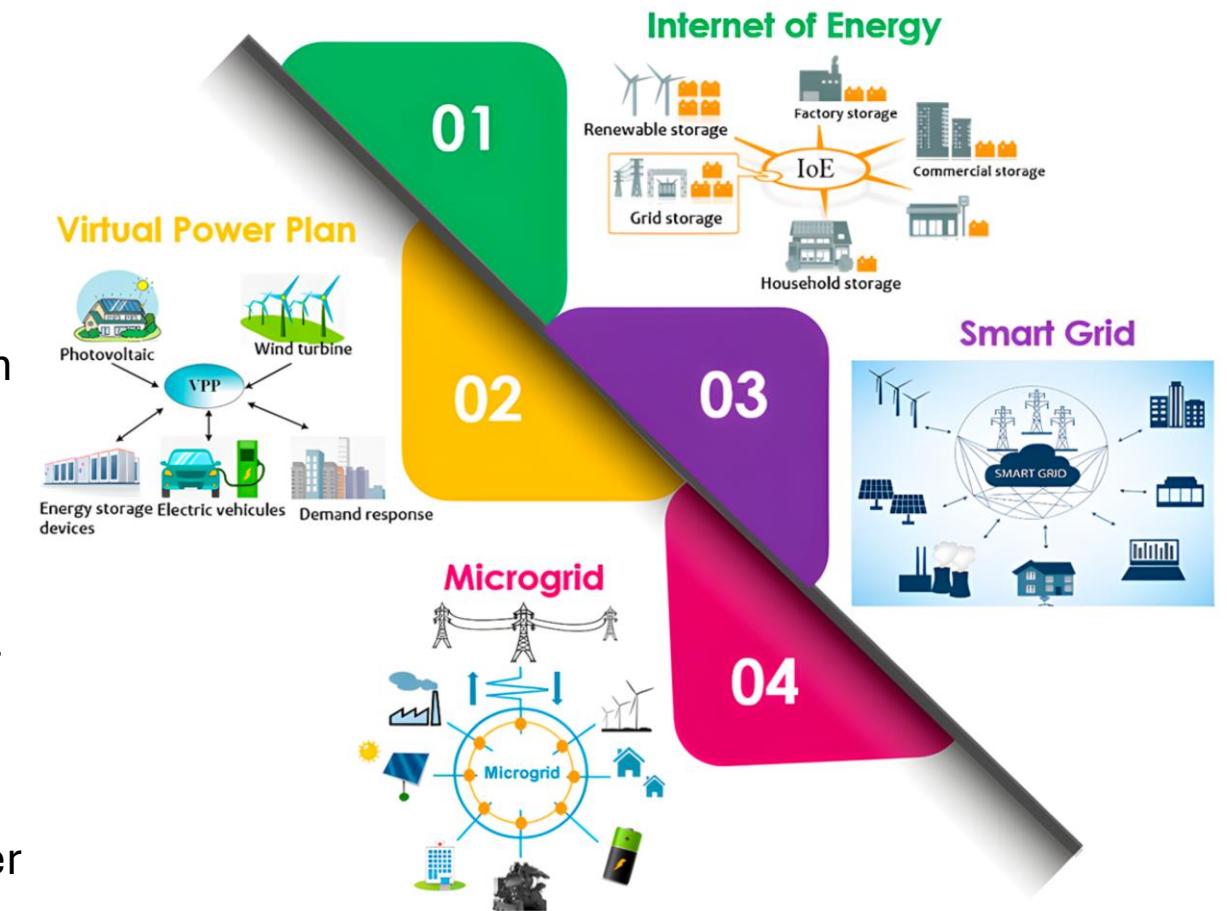
# Défis techniques, organisationnels & réglementaires

- **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 Study, 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] REDELINGHUYSEN, 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, Ibrahem 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.