

Séminaire COSMAC
Jeudi 21 novembre 2025

Vers des micro-réseaux intelligents et résilients

Prof. Dhaker ABBES



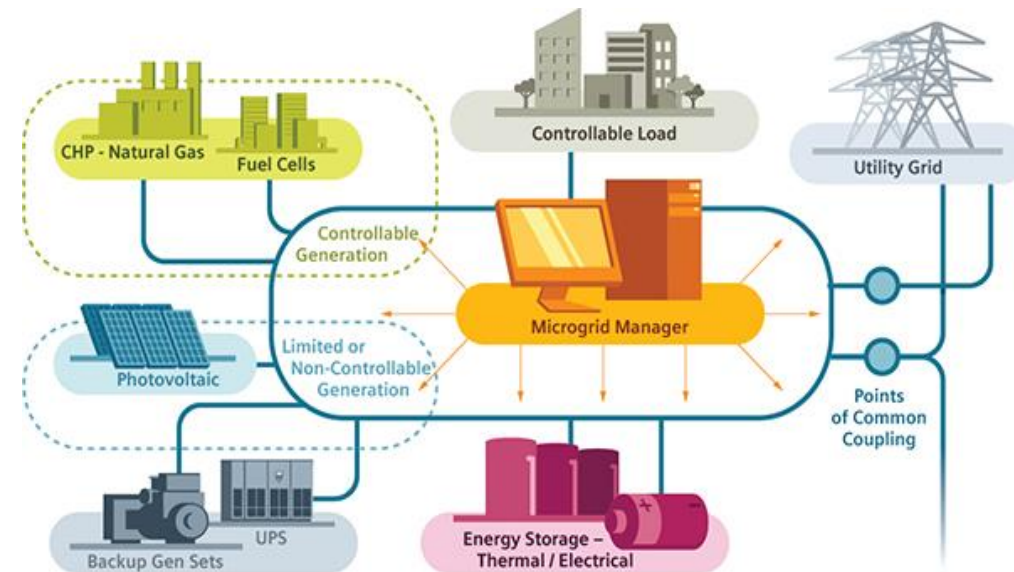
Plan

1. Qu'est-ce qu'un micro-réseau ?
2. Qu'est-ce qu'un micro-réseau Intelligent ?
3. Contrôle intelligent des micro-réseaux
4. EMS (Energy Management System) — Intelligence globale du micro-réseau
5. Résilience des micro-réseaux
6. Conclusion & Perspectives

1. QU'EST-CE QU'UN MICRO-RÉSEAU ?

Micro-réseau = ensemble d'équipements énergétiques

- Fonctionnant en **coordination locale**
- Connectés au réseau ou en mode **îloté**
- Intégrant :
 - production (PV, éolien, cogénération...)
 - stockage électrique, thermique, hydrogène
 - charges contrôlables
 - un système de pilotage local (EMS)



Un micro-système énergétique capable de fonctionner seul.

1. QU'EST-CE QU'UN MICRO-RÉSEAU ?

❖ Cas d'usage

- ❑ Hôpitaux & sites critiques
- ❑ Bases militaires
- ❑ Industries sensibles
- ❑ Zones isolées / villages autonomes
- ❑ Quartiers urbains bas-carbone
- ❑ Universités & campus intelligents



Réseau local de l'Université Catholique de Lille

2. QU'EST-CE QU'UN MICRO-RÉSEAU INTELLIGENT ?

❖ Un **micro-réseau intelligent** (*smart microgrid*) est un **système énergétique local**, capable de **produire, stocker, distribuer et gérer** l'énergie de manière autonome grâce à des technologies avancées de contrôle et de communication.

❖ **Caractéristiques clés :**

◆ **Autonomie énergétique**

- Peut fonctionner **connecté** au réseau principal
- Ou en **mode îloté** lors d'une panne ou d'un événement extrême
- Maintient la tension et la fréquence en local

◆ **Intégration multi-sources**

- Production renouvelable : **solaire, éolien, biomasse**
- Production pilotable : **cogénération, piles à combustible**
- Stockage : **batteries, stockage thermique, hydrogène**

◆ **Conversion de l'énergie**

Onduleurs grid-forming / grid-following, convertisseurs multiports.

◆ **Couche communication**

IoT, Wi-Fi industriel, LoRaWAN, protocoles IEC 61850.

◆ **Gestion intelligente**

- **EMS (Energy Management System)** : cœur décisionnel
- Prédiction et optimisation : IA, apprentissage machine
- Pilotage temps réel des flux énergétiques
- Répartition optimale entre sources, stockage et charges

◆ **Flexibilité et pilotage des charges**

- VE, pompes à chaleur, chauffage, électroménagers pilotables
- Déplacement de charge (demand response)

◆ **Résilience accrue**

- Fonctionnement autonome en cas de crise
- Capacités de reconfiguration automatique
- Protection contre cyberattaques et instabilités réseau

3. CONTRÔLE INTELLIGENT DES MICRO-RÉSEAUX

Une architecture de contrôle en couches est indispensable pour assurer stabilité, optimisation et résilience.

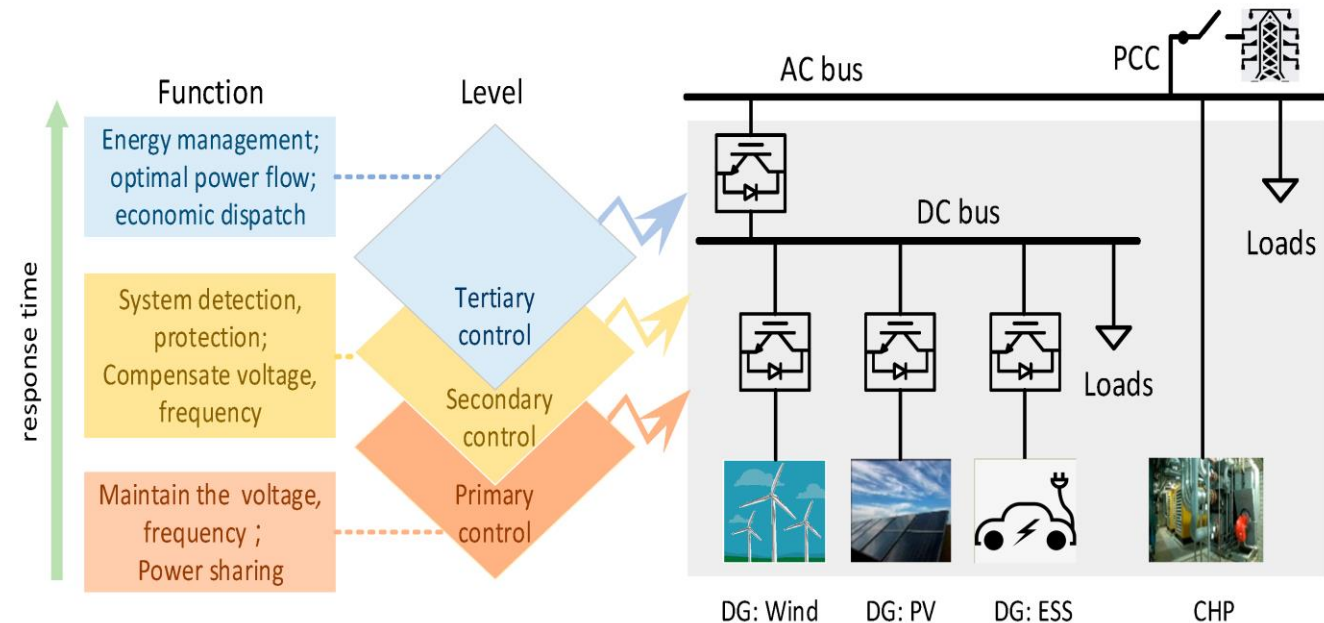
1 Contrôle primaire — Stabilité immédiate (ms à s)

Rôle : maintenir instantanément la tension et la fréquence

- Assuré directement par les **convertisseurs électroniques** (onduleurs).
- Réaction très rapide (millisecondes).
- Utilise des lois locales comme :
 - **droop control (P–f, Q–V)**
 - **virtual inertia / virtual synchronous machines (VSM)**
- Crucial pour le **mode îloté**, où aucun réseau supérieur ne stabilise le système.

Objectifs :

- Éviter les oscillations de tension.
- Maintenir la fréquence locale stable malgré les variations de charge/production.



Principe du contrôle hiérarchique d'un micro-réseau [1]

3. CONTRÔLE INTELLIGENT DES MICRO-RÉSEAUX

Une architecture de contrôle en couches est indispensable pour assurer stabilité, optimisation et résilience.

2 Contrôle secondaire — Restauration des consignes (s à min)

Rôle : corriger les dérives induites par le contrôle primaire

- Ajuste les valeurs de tension/fréquence pour revenir aux consignes nominales (ex : 50 Hz).
- Fonctionne via une coordination centralisée ou distribuée.
- Peut corriger les oscillations lentes ou dérives dues aux renouvelables.

Objectifs :

- Garantir une **qualité d'alimentation** conforme aux normes.
- Harmoniser le fonctionnement lorsque plusieurs sources sont synchronisées.

3 Contrôle tertiaire — Optimisation & interactions réseau (min à heures)

Rôle : optimiser le fonctionnement énergétique du micro-réseau

• Décisions stratégiques :

- arbitrage entre sources locales, stockage, charges,
- gestion des coûts,
- **acheter/vendre de l'énergie** au réseau principal.

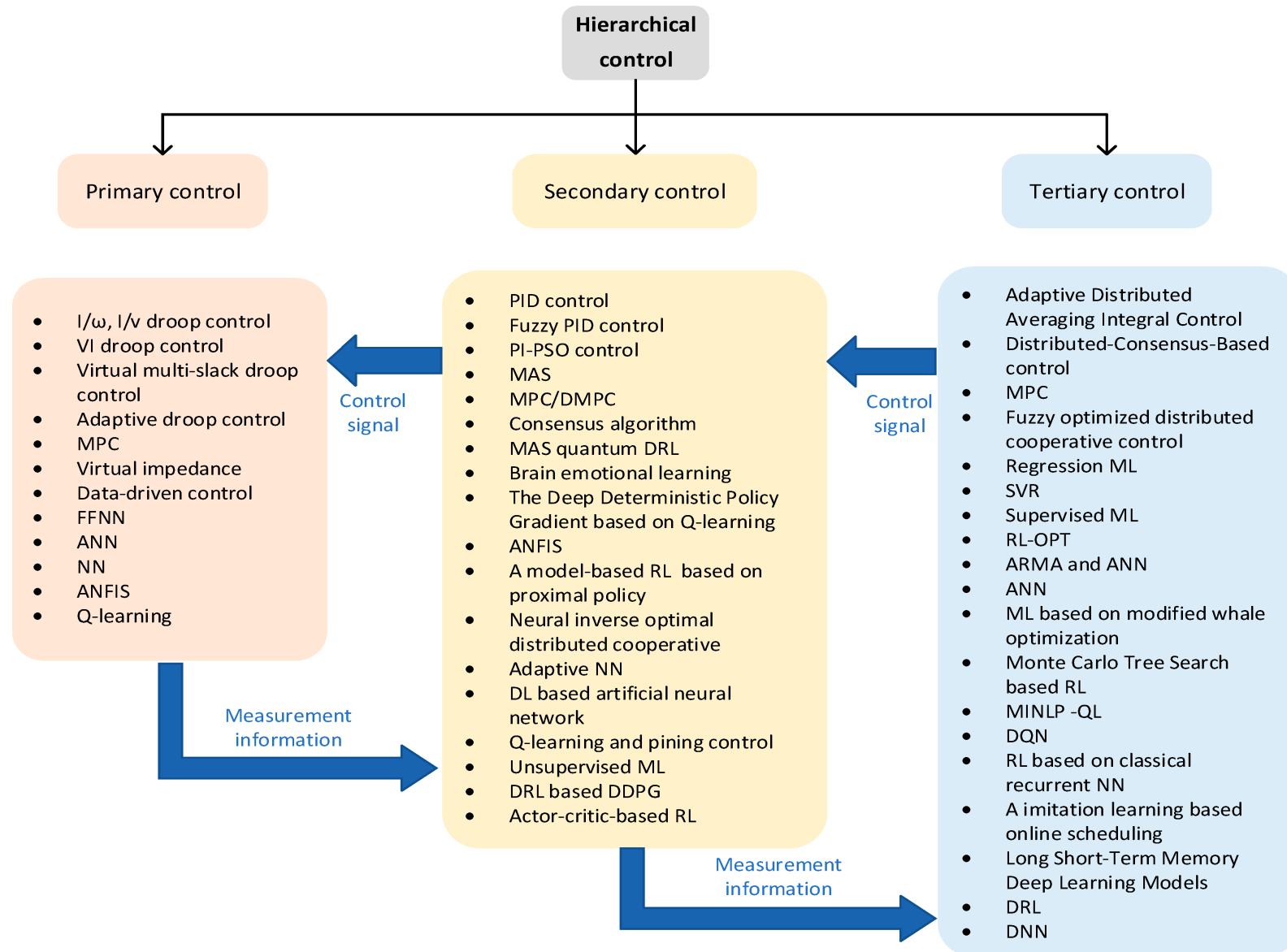
• Peut intégrer des critères :

- coût de l'électricité
- émissions CO₂
- état du stockage
- prévisions PV/éolien

Objectifs :

- Réduire les coûts d'exploitation.
- Maximiser l'autoconsommation locale.
- Valoriser les flexibilités (injections réseau, services système).

3. CONTRÔLE INTELLIGENT DES MICRO-RÉSEAUX



4. EMS (ENERGY MANAGEMENT SYSTEM) — INTELLIGENCE GLOBALE DU MICRO-RÉSEAU

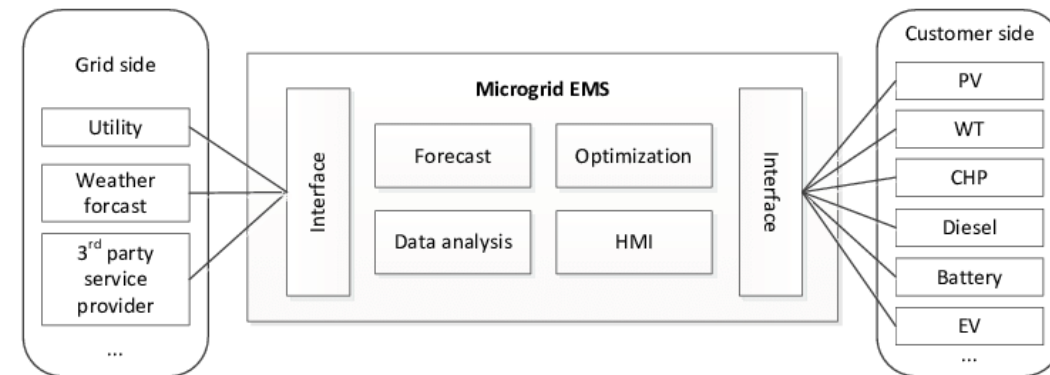
Rôle : cerveau du système

Le EMS supervise l'ensemble des couches de contrôle et intègre des fonctions intelligentes :

- **Prédictions** : charge, PV, éolien (IA / machine learning).
- **Optimisation avancée** :
 - MPC (Model Predictive Control)
 - systèmes multi-agents (MAS)
 - programmation mathématique
- **Gestion multi-vecteur** : électricité, chaleur, hydrogène.
- **Planification** : jours/semaines.
- **Gestion des événements critiques** : coupures, pannes, cyberattaques.

Objectifs :

- Assurer un fonctionnement **optimal**, **résilient** et **coordonné**.
- Réduire les coûts et améliorer la durabilité.
- Orchestrer les interactions entre tous les composants énergétiques.



Une illustration d'un EMS de micro-réseau [2]

5. RÉSILIENCE DES MICRO-RESEAUX

Résilience ≠ Fiabilité

La **fiabilité** mesure la capacité d'un système à fonctionner sans défaillance.

La **résilience**, elle, mesure la capacité du système à :

→ **encaisser, s'adapter, continuer à fonctionner, et se rétablir** après une perturbation.

Un micro-réseau résilient ne garantit pas l'absence de panne,

 mais garantit la **continuité minimale du service + une récupération rapide.**

1 Résilience structurelle — Redondance & diversification

 **Objectif : éviter les points de défaillance uniques.**

- Multiplication des sources : PV + éolien + cogénération + batterie.
- Stockages hybrides : batterie + thermique + hydrogène.
- Lignes électriques multiples ou topologies maillées.
- Convertisseurs et équipements doublés (N-1).

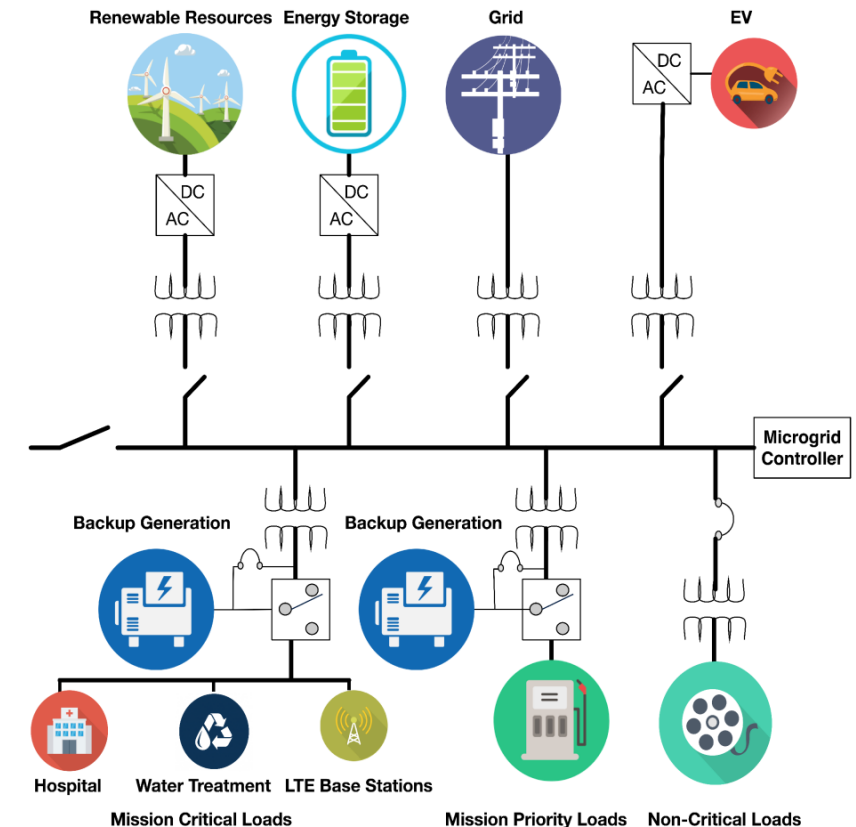
→ Le système peut perdre un composant sans s'effondrer.

2 Résilience opérationnelle — Capacité d'îlotage

 **Objectif : assurer la continuité d'alimentation en cas de choc externe.**

- Déconnexion automatique du réseau principal (fault ride-through).
- Maintien de la stabilité locale (tension/fréquence).
- Priorisation des charges essentielles (hôpitaux, data centers...).
- Fonctionnement autonome prolongé avec ressources locales.

→ Le micro-réseau "survit" même si le réseau principal tombe.



5. RÉSILIENCE DES MICRO-RESEAUX

3 Résilience adaptative — Reconfiguration dynamique

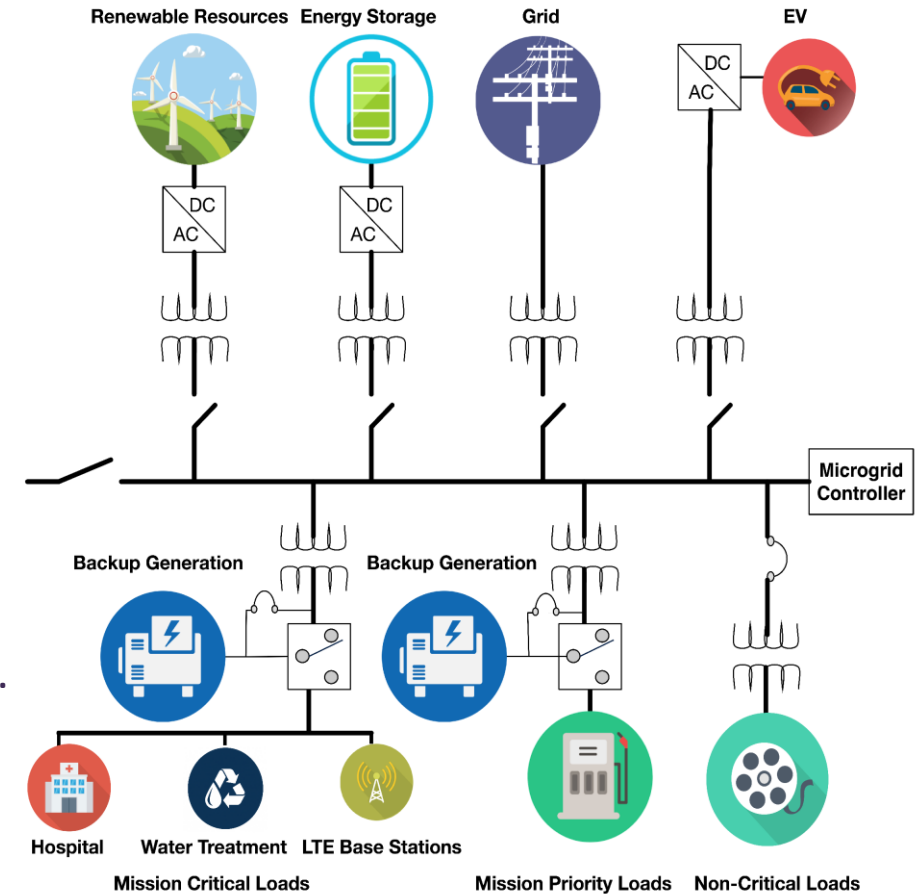
 Objectif : adapter le fonctionnement en temps réel.

- Reconfiguration des flux d'énergie en quelques secondes.
 - Re-ordonnancement des sources selon leur disponibilité.
 - Réaffectation des charges non critiques.
 - Activation automatique du stockage ou de la cogénération.
 - Coordination multi-agents (MAS) pour adaptation distribuée.
- Le micro-réseau se **reprogramme lui-même** pour maintenir un service.

4 Résilience temporelle — Rapidité de récupération

 Objectif : minimiser le temps de retour à la normale.

- Stratégies de redémarrage rapide (**black-start**).
 - Réinsertion synchronisée au réseau principal.
 - Optimisation post-crise (recharge des batteries, remise en ordre des priorités).
 - Réduction du MTTR (Mean Time To Recovery).
- La perturbation a un impact court, limité et contrôlé.



Résilience accrue et
flexibilité

5. RÉSILIENCE DES MICRO-RESEAUX

5 Résilience cyber — Protection face aux cybermenaces

◆ Objectif : empêcher qu'une attaque numérique entraîne une panne énergétique

La cybersécurité est devenue une dimension **centrale** de la résilience des micro-réseaux.

Risques :

- Intrusions dans l'EMS ou le SCADA.
- Attaques par falsification de données (False Data Injection).
- Ransomwares bloquant le pilotage.
- Attaques de déconnexion massive (DER spoofing).

Contre-mesures :

- Segmentation du réseau de communication (IT/OT).
- Authentification forte + protocoles chiffrés.
- Détection d'intrusion (IDS/IPS) basée IA.
- Redondance des canaux de communication (4G/5G + fibre).
- Architecture Zero-Trust.

→ Un micro-réseau n'est résilient **que s'il est protégé numériquement**.



6. CONCLUSION & PERSPECTIVES

Conclusion générale

Les **micro-réseaux intelligents** représentent aujourd'hui une brique essentielle de la transition énergétique.

Ils permettent de :

- **intégrer massivement les énergies renouvelables,**
- **assurer une autonomie énergétique locale,**
- **optimiser** la production, le stockage et la consommation,
- **renforcer la résilience** face aux aléas climatiques, techniques et cyber,
- soutenir la **décarbonation** et la **sécurisation** des systèmes énergétiques.

Grâce à l'IA, à l'IoT, aux convertisseurs avancés et à l'intégration multi-vecteur, ils deviennent de véritables **systèmes énergétiques complets, autonomes et adaptatifs**, capables de fonctionner même lorsque le réseau principal est défaillant.

6. CONCLUSION & PERSPECTIVES



Perspectives à moyen et long terme

1 Micro-réseaux interconnectés (networked microgrids)

- Passage du micro-réseau isolé à un **réseau de micro-réseaux** coopératifs.
- Amélioration de la résilience collective grâce au partage d'énergie et de stockage.
- Fonctionnement maillé : plus de robustesse, moins de vulnérabilité aux pannes.

2 Intégration du véhicule électrique — V2G / V2H / V2B

- Le véhicule devient un **stockage mobile** injectant énergie et services réseau.
- Gestion coordonnée de milliers de VE via IA et optimisation distribuée.
- Forte contribution aux services de flexibilité (régulation, réserve rapide).

3 Déploiement de l'hydrogène vert dans les micro-réseaux

- Électrolyse couplée aux excédents PV/éolien.
- Stockage saisonnier et reconversion via piles à combustible.
- Hybridation avec réseaux de chaleur : nouvelles architectures multi-vecteurs.

6. CONCLUSION & PERSPECTIVES

Perspectives à moyen et long terme

4 IA avancée & pilotage autonome

- Systèmes auto-apprenants basés sur :
 - deep learning,
 - reinforcement learning,
 - systèmes multi-agents autonomes.
- Micro-réseau devenant **auto-optimisant, auto-diagnostiquant, auto-réparant**.

5 Cybersécurité énergétique renforcée

- Mise en place de stratégies Zero-Trust pour les micro-réseaux.
- Détection d'intrusions en temps réel par IA.
- Certification et standardisation internationale (IEC, IEEE).
- Sécurisation indispensable à la résilience future.

6 Nouveaux modèles économiques

- Communautés énergétiques locales : partage P2P (peer-to-peer).
- Tarification dynamique temps réel.
- Micro-réseaux commerciaux pour campus, industries, data centers.

3. RÉFÉRENCES

- [1] LI, Sijia, OSHNOEI, Arman, BLAABJERG, Frede, *et al.* Hierarchical control for microgrids: a survey on classical and machine learning-based methods. *Sustainability*, 2023, vol. 15, no 11, p. 8952.
- [2] SHI, Wenbo, LEE, Eun-Kyu, YAO, Daoyuan, *et al.* Evaluating microgrid management and control with an implementable energy management system. In : 2014 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm). IEEE, 2014. p. 272-277.
- [3] ALMALEH, Abdulaziz, TIPPER, David, AL-GAHTANI, Saad F., *et al.* A novel model for enhancing the resilience of smart microGrids' critical infrastructures with multi-criteria decision techniques. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no 19, p. 9756.



merci

JUNIA
GRANDE ÉCOLE D'INGÉNIEURS
Lille - Châteauroux - Bordeaux