

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

Les systèmes multi-énergies intelligents

Dhaker ABBES

Professeur, Team-leader, JUNIA École d'ingénieurs – L2EP
(Laboratoire d'électrotechnique et d'électronique de
puissance), Lille, France
Dhaker.abbes@junia.com

Journées Scientifiques Open Lab

Lab-STA & EDST

Les systèmes multi-énergies intelligents

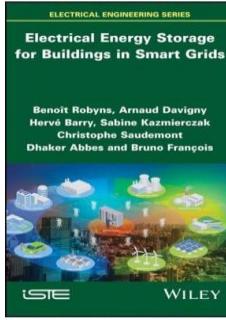
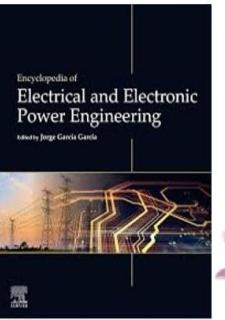
A propos de moi



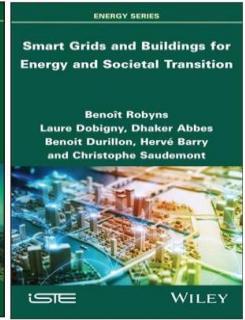
Prof. Dhaker ABBES

- 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

Les systèmes multi-énergies intelligents

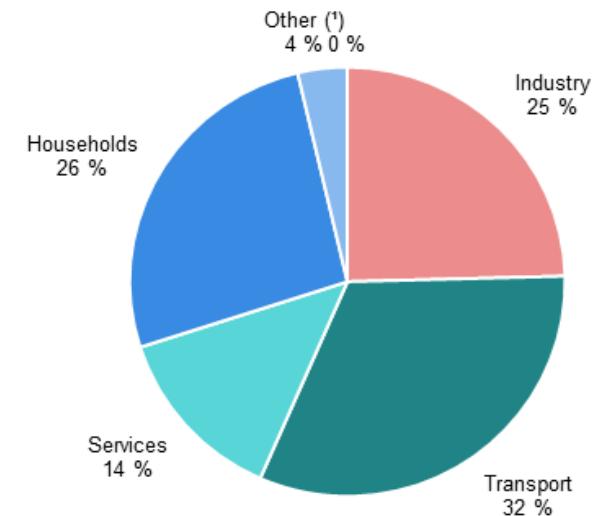
Plan

- Contexte global
- Concepts fondamentaux du multi-énergie
- Intelligence et contrôle avancé
- Cas d'étude
- Conclusion

Contexte global

- ❖ Depuis le **Sommet de Paris (2015)** et les objectifs de neutralité carbone, les systèmes énergétiques doivent évoluer vers trois axes structurants :
 - 1. Décarbonation,**
 - 2. Digitalisation,**
 - 3. Décentralisation.**
- ❖ Les scénarios de l'**AIE (World Energy Outlook, 2024)** et du **GIEC (AR6, 2023)** soulignent que l'**électrification massive** (mobilité, chauffage, industrie) ne peut réussir **sans couplage sectoriel** (*sector coupling*).
- ❖ En Europe, plus de **60 % de la demande finale d'énergie** concerne la **chaleur** et le **transport**, encore largement fossiles.

Final energy consumption by sector, EU, 2023
(% of total, based on terajoules)



(¹) International aviation and maritime bunkers are excluded from category Final energy consumption for transport.
Source: Eurostat (online data code: nrg_bal_s)

eurostat

→ D'où la nécessité d'un système énergétique intégré, combinant plusieurs vecteurs (électricité, chaleur, gaz, hydrogène, etc.), pour mutualiser les ressources et équilibrer les flux.

Contexte global

Limites du paradigme mono-énergie

Historiquement, les filières énergétiques se sont développées en **silos** :

- L'électricité avec ses réseaux AC centralisés,
- Le gaz naturel avec ses infrastructures dédiées,
- Le chauffage urbain et le transport, gérés séparément.

Ce découplage crée :

- Une sous-utilisation des ressources primaires,
- Une rigidité face aux pics de demande,
- Une inefficacité systémique (chaleur fatale non valorisée, stockage non coordonné).

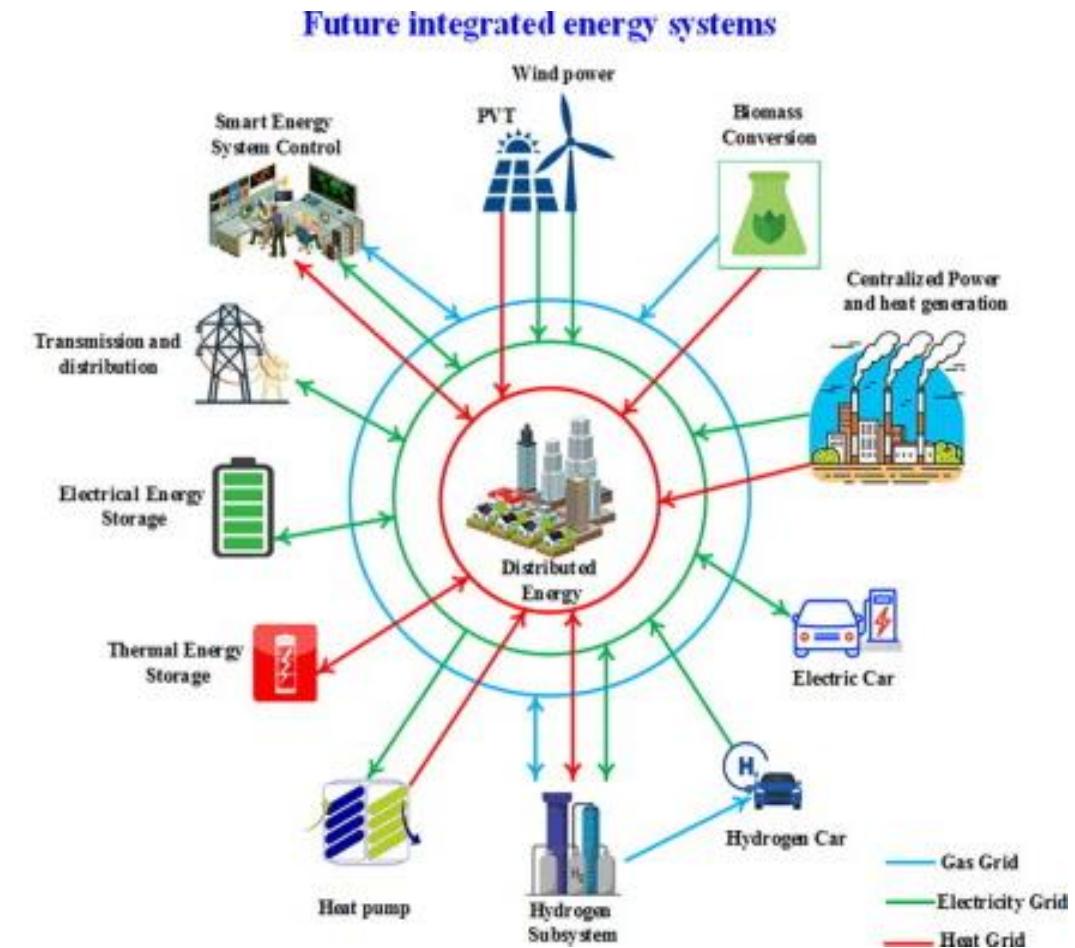
Exemple concret : une centrale électrique à gaz perd environ 50 % de son énergie sous forme de chaleur, alors qu'un réseau de chaleur voisin pourrait la réutiliser.

Contexte global

💡 Transition vers la Smart Energy

- ❖ Les Smart Grids ont introduit la flexibilité et la communication dans le réseau électrique.
- ❖ Les Systèmes Multi-Énergies Intelligents (SMEI) prolongent cette approche au-delà de l'électricité, en intégrant :
 - le **pilotage coordonné** de plusieurs vecteurs,
 - des **dispositifs de conversion inter-énergies**,
 - et des **systèmes d'information** pour optimiser en temps réel.
- ❖ L'approche Smart Energy transforme la vision du système énergétique :
Ce n'est plus une hiérarchie verticale (production → transport → consommation), mais un **réseau maillé d'échanges énergétiques multi-vecteurs**.
Chaque nœud (bâtiment, micro-réseau, usine, hub) peut simultanément : **consommer, produire, stocker, échanger** différents types d'énergie.

- 💡 On parle alors d'un **Energy Internet**, analogue à Internet : chaque « paquet » d'énergie circule selon la voie la plus efficace.



Concepts fondamentaux du multi-énergie

Définition générale

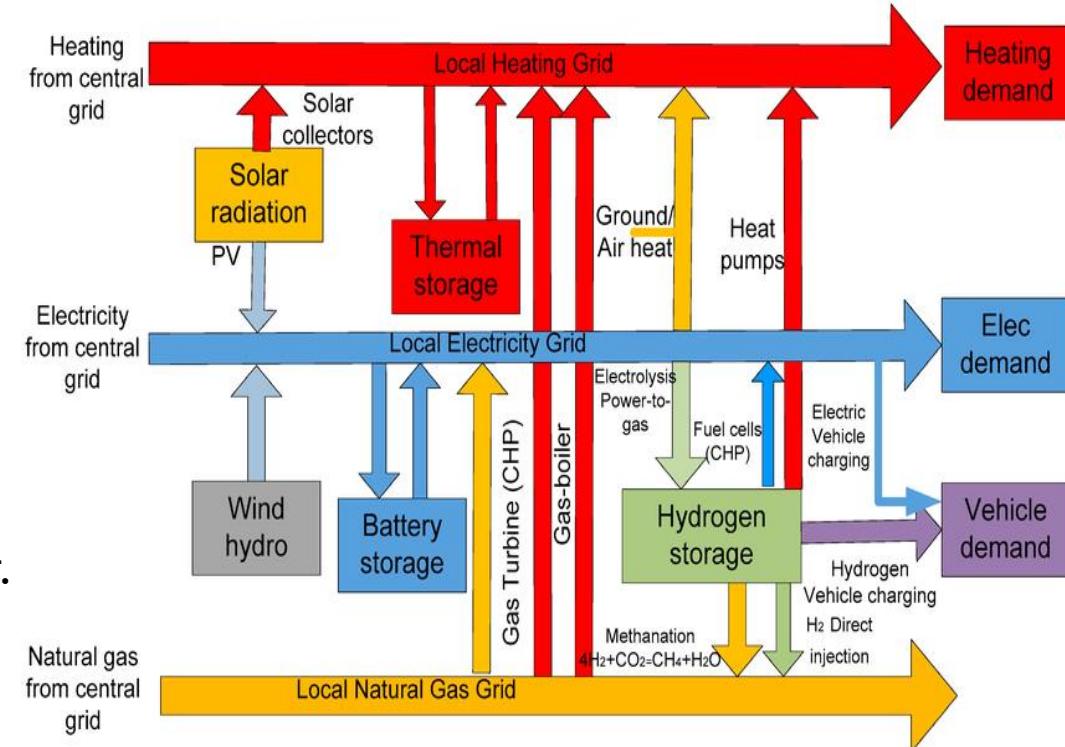
❖ « Un système multi-énergie est un ensemble intégré où différents vecteurs énergétiques (électricité, chaleur, gaz, froid, hydrogène, etc.) interagissent de manière optimale, pour améliorer l'efficacité, la flexibilité et la durabilité du système global. » [2]

❖ Il repose sur deux idées majeures :

1. **Le couplage des vecteurs énergétiques**,
2. **La co-optimisation** des flux entre eux.

Échelles spatiales

1. **Bâtiment** : couplage PV, pompe à chaleur, batterie, micro-CHP.
2. **Quartier / campus** : intégration via *energy hub* et réseau de chaleur.
3. **Ville / région** : interaction entre réseaux électriques, gaziers et thermiques.
4. **Pays / continent** : échange intersectoriel (Power-to-X, hydrogène vert).



Système énergétique multi-énergies [3]

Plus on monte en échelle, plus les interactions deviennent complexes, mais aussi plus les gains de flexibilité sont importants.

Concepts fondamentaux du multi-énergie

✿ Trois niveaux de couplage

Niveau	Description	Exemple
Physique	Conversion d'un vecteur vers un autre	Électricité → chaleur (pompe à chaleur), chaleur → élec (ORC)
Opérationnel	Coordination dynamique entre réseaux	Pilotage conjoint élec/gaz via Power-to-Gas
Économique / Marché	Arbitrage multi-énergie	Trading chaleur-électricité selon les prix instantanés

⟳ Exemples typiques de couplage

- **CHP / CCHP (Cogénération / Trigénération)** : électricité + chaleur (+ froid).
- **Power-to-Gas (P2G)** : conversion de l'électricité excédentaire en méthane ou H₂.
- **Power-to-Heat (P2H)** : stockage thermique via résistances ou pompes à chaleur.
- **Gas-to-Power (G2P)** : turbines à gaz pilotables.
- **Power-to-Hydrogen-to-Mobility (P2H2M)** : électrolyse → piles à combustible → mobilité.

Concepts fondamentaux du multi-énergies

Le concept d'Energy Hub

Un *energy hub* est un modèle conceptuel (Swiss Federal Institute of Technology, Favre-Perrod, 2007 [4]) représentant un nœud où différents flux énergétiques se croisent.

On y trouve :

- des **entrées** : électricité, gaz, biomasse, chaleur, etc.
- des **convertisseurs** : CHP, pompes à chaleur, électrolyseurs, ORC.
- des **sorties** : électricité, chaleur, froid, hydrogène.

Il sert à **modéliser le couplage inter-vecteurs** et à calculer les flux optimaux selon des contraintes économiques et physiques.

Architectures typiques

1. Architecture centralisée : un gestionnaire unique optimise les flux globaux.

2. Architecture distribuée : chaque sous-système (bâtiment, micro-réseau) gère sa propre optimisation et échange avec les autres via un agrégateur.

3. Architecture hiérarchique : combinaison des deux niveaux — *local autonomy + global coordination* .

Intelligence et contrôle avancé

⚙️ Les limites des méthodes classiques

- ❖ Historiquement, le pilotage énergétique reposait sur :
 - des **modèles prédictifs déterministes** (MPC – *Model Predictive Control*),
 - des **optimisations linéaires ou quadratiques** (MILP, QP),
 - des **algorithmes centralisés** basés sur une connaissance parfaite du système.
- ❖ Mais ces approches atteignent leurs limites lorsque :
 1. le système devient **trop complexe** (multi-vecteur, multi-échelle, multi-acteurs) et **incertain** (Un changement de température, une fluctuation du vent, ou un pic de mobilité électrique, et c'est tout le système énergétique local qui doit s'adapter.)
 2. les **données** sont **massives, variables et bruitées**,
 3. et les décisions doivent être prises **en temps réel**, dans un contexte incertain.

🌐 **Exemple concret :** Prenons une communauté énergétique intégrant :des bâtiments équipés de PV et de pompes à chaleur, un réseau de chaleur avec stockage, une station d'hydrogène pour la mobilité.

Chaque sous-système a ses propres contraintes et objectifs (coût, confort, émissions).Une commande centralisée doit résoudre un problème multi-objectifs et multi-échelles : un vrai défi computationnel.

⚠️ Le problème : la combinatoire explose.

Une optimisation déterministe complète d'un réseau urbain multi-énergie peut nécessiter des heures de calcul — incompatible avec un pilotage en quelques secondes.

C'est dans ce contexte que l'intelligence artificielle (IA) et le contrôle distribué deviennent les solutions naturelles.

Intelligence et contrôle avancé

Trois niveaux d'intelligence

Pour maîtriser la complexité du MES, on introduit une **intelligence distribuée** structurée en **trois niveaux complémentaires** :

- 1 Prédiction,
- 2 Décision,
- 3 Coordination.

1 Prédiction – L'anticipation intelligente

Les systèmes multi-énergies nécessitent une anticipation fine de la demande et de la production pour fonctionner efficacement.

L'IA intervient ici sous forme **d'apprentissage supervisé**, à partir de grandes quantités de données historiques (météo, consommation, production).

Outils utilisés :

- **Réseaux de neurones récurrents (RNN, LSTM)** pour la prévision temporelle de charge et de production renouvelable.
- **Réseaux convolutifs (CNN)** pour détecter des corrélations spatiales dans des parcs distribués.
- **Apprentissage hybride** combinant modèles physiques et apprentissage machine (*Physics-informed ML*).

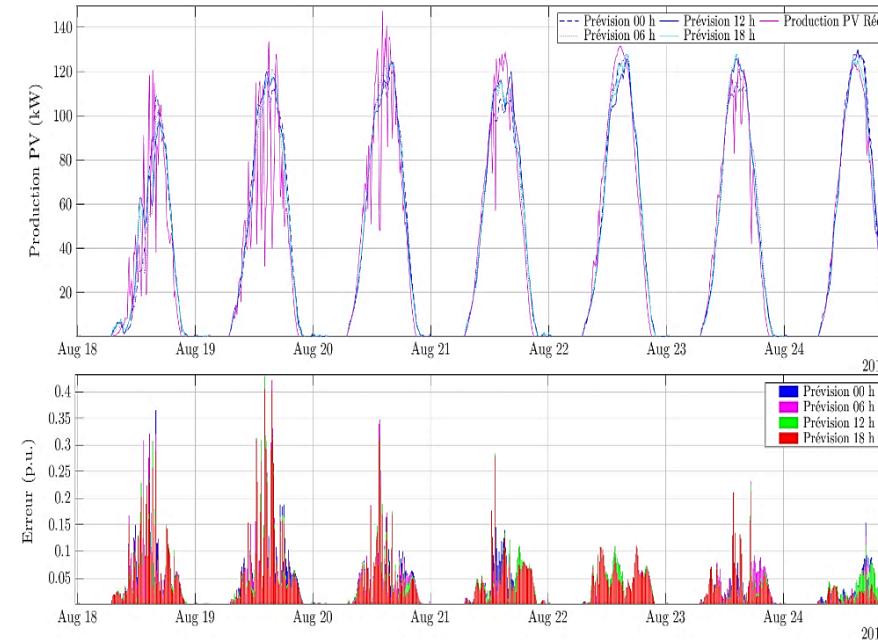
Intelligence et contrôle avancé

Exemples d'applications :

- Prédiction de la demande thermique d'un quartier selon la météo (erreur réduite de 15–20 % par rapport aux modèles ARIMA).
- Prévision multi-horizon de la production PV pour anticiper les flux P2G.

🎓 Références : [5] LIU, Fang, HUANG, Yucong, WANG, Yalin, et al. *Short-term multi-energy consumption forecasting for integrated energy system based on interactive multi-scale convolutional module*. *Scientific Reports*, 2024, vol. 14, no 1, p. 21382.

[6] Dhaker ABBES, L2EP Junia, *Forecasting the Production and Consumption of Electrical Energy, Smart Grids and Buildings for Energy and Societal Transition*, ISTE, 2024



Résultats des prévisions PV du Rizomm sur 3 semaines a, b, c pendant la période du 18 août jusqu'au 7 septembre 2019. Les prévisions (à 0 h, 6 h, 12 h, 18 h) sont comparées à la production réelle. L'erreur affichée est l'erreur absolue [6].¹²

Intelligence et contrôle avancé

2 Décision – L'optimisation en temps réel

La décision consiste à déterminer **les actions optimales** pour chaque convertisseur, stockage ou charge, en tenant compte :

- des prévisions,
- des contraintes physiques,
- et des signaux économiques (prix, CO₂, disponibilité réseau).

Problématique :

Le système multi-énergie est souvent **non linéaire et fortement contraint**.

Les méthodes déterministes (MILP, MPC) deviennent trop lentes.

Solution possible : apprentissage par renforcement profond (Deep Reinforcement Learning – DRL).

Le DRL permet à un agent de “jouer” avec le système, d’explorer des stratégies et d’apprendre par essais-erreurs à optimiser une récompense (ex. minimiser le coût ou les émissions).

Exemples d’applications :

- Contrôle optimal d'un *hub multi-énergie* [7] : DRL ajuste la répartition entre électricité, chaleur et gaz en temps réel.
- Gestion d'une centrale Power-to-Gas [8] : l'agent DRL décide du moment optimal pour convertir ou stocker.
- Optimisation d'un micro-réseau hybride (PV + batterie + CHP) [9]

Intelligence et contrôle avancé



3 Coordination – L'intelligence collective

Lorsque le système devient **massivement distribué** (bâtiments, micro-réseaux, véhicules, etc.), il est impossible de tout contrôler depuis un centre unique.

On adopte alors une **architecture multi-agents** où chaque entité est un agent autonome, capable de négocier, coopérer ou apprendre localement.

Principes :

- **Autonomie locale** : chaque agent gère ses ressources (PV, stockage, pompes à chaleur).
- **Communication entre pairs ou via agrégateur** : échanges d'informations minimales (prix, demandes, contraintes).
- **Coordination par algorithmes distribués** : ADMM (Alternating Direction Method of Multipliers), consensus, jeu coopératif.

Exemple concret :

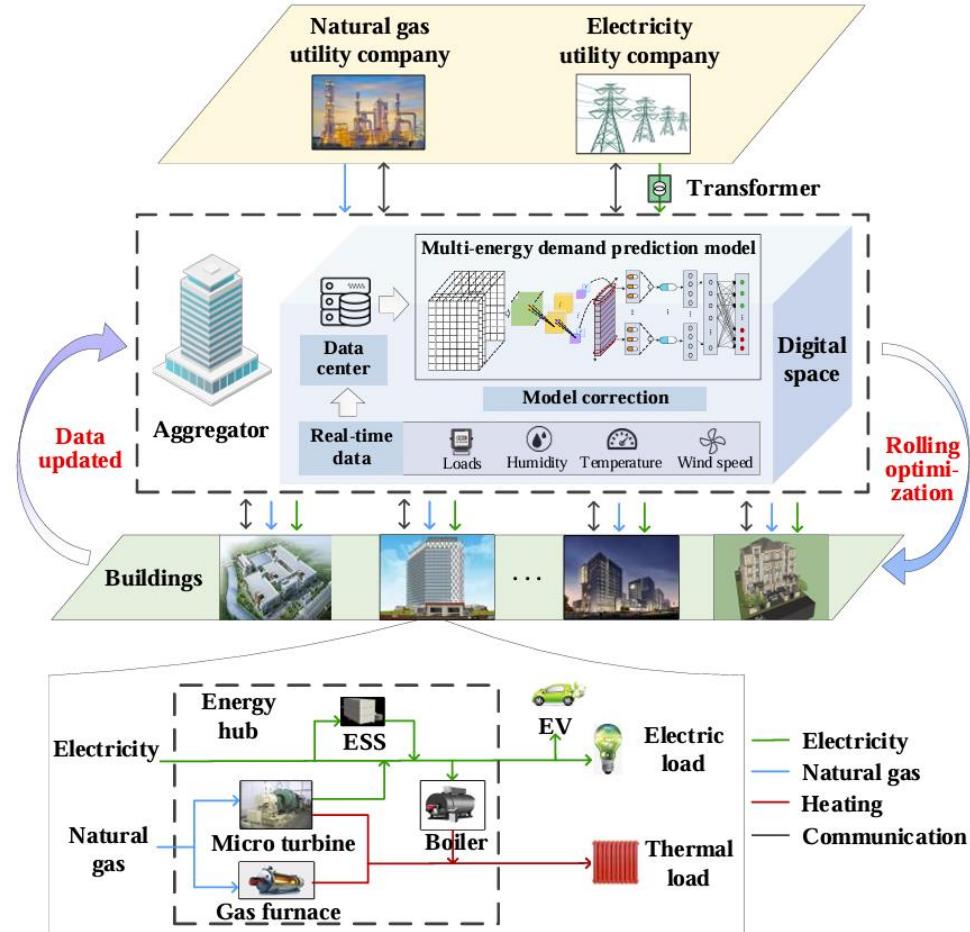
Zheng et Zhou (2021) – *Applied Energy* [10] :

- Proposition d'un **système hiérarchique distribué** : un agrégateur numérique coordonne plusieurs bâtiments multi-énergies via ADMM.
- Chaque bâtiment ajuste sa consommation d'électricité et de gaz pour minimiser son coût individuel, tout en respectant l'équilibre global.
- Résultat : réduction de 12 % des coûts énergétiques et meilleure robustesse aux incertitudes météo.

Intelligence et contrôle avancé

3 Coordination – L'intelligence collective

Chaque bâtiment devient un agent énergétique intelligent — ensemble, ils forment un système adaptatif.



Architecture hiérarchique pour la gestion coordonnée de bâtiments diversifiés [10]

Intelligence et contrôle avancé

🧠 Les systèmes d'information et d'optimisation en temps réel

La véritable intelligence du **système multi-énergie intelligent (SMEI)** repose sur une **infrastructure numérique intégrée**, parfois appelée **Energy IoT (Internet of Energy)** ou **Energy Cloud**.

Elle assure la **collecte**, la **analyse**, et la **décision** en continu sur l'ensemble des vecteurs énergétiques.

◆ Composantes clés :

• Collecte et supervision des données (Data Layer)

Capteurs, compteurs intelligents, SCADA et IoT collectent les données de flux électriques, thermiques, gaziers ou hydrogène, en temps réel.

Ces données sont la base de la visibilité du système et permettent le *monitoring* et la détection d'anomalies.

• Plateforme numérique d'intégration (Digital Energy Platform)

Interface logicielle où convergent les données des différents vecteurs.

Elle permet la **fusion de données multi-énergies**, leur historisation et leur synchronisation avec les modèles physiques ou numériques (*digital twins*).

• Analyse prédictive et optimisation dynamique

Outils d'IA et d'optimisation avancée (MPC, DRL, optimisation stochastique) pour anticiper les variations de demande et piloter les flux inter-énergies en temps réel.

Par exemple, un *Energy Management System (EMS)* peut décider d'activer un électrolyseur, de stocker la chaleur ou de moduler la consommation selon le prix spot de l'électricité.

Intelligence et contrôle avancé

Les systèmes d'information et d'optimisation en temps réel

Composantes clés :

Cybersécurité et fiabilité des communications

Les SMEI reposent sur des réseaux de communication critiques.

Il est donc indispensable d'intégrer des **protocoles sécurisés** (ex. IEC 62351, ISO/IEC 27001), des **mécanismes de redondance** et des **algorithmes de détection d'intrusion** pour protéger l'intégrité des données et la continuité du service énergétique.

La cybersécurité devient un pilier aussi important que l'efficacité énergétique elle-même.

Interface de décision et visualisation

Les tableaux de bord (dashboards) et systèmes d'aide à la décision (alertes, KPIs énergétiques, économiques et environnementaux) permettent aux opérateurs humains de superviser et de reconfigurer le système en cas d'événement exceptionnel.

Ces couches numériques et de sécurité font du système multi-énergie un véritable organisme vivant : il perçoit, analyse, apprend et agit en continu sur l'ensemble des vecteurs énergétiques.

Cas d'études

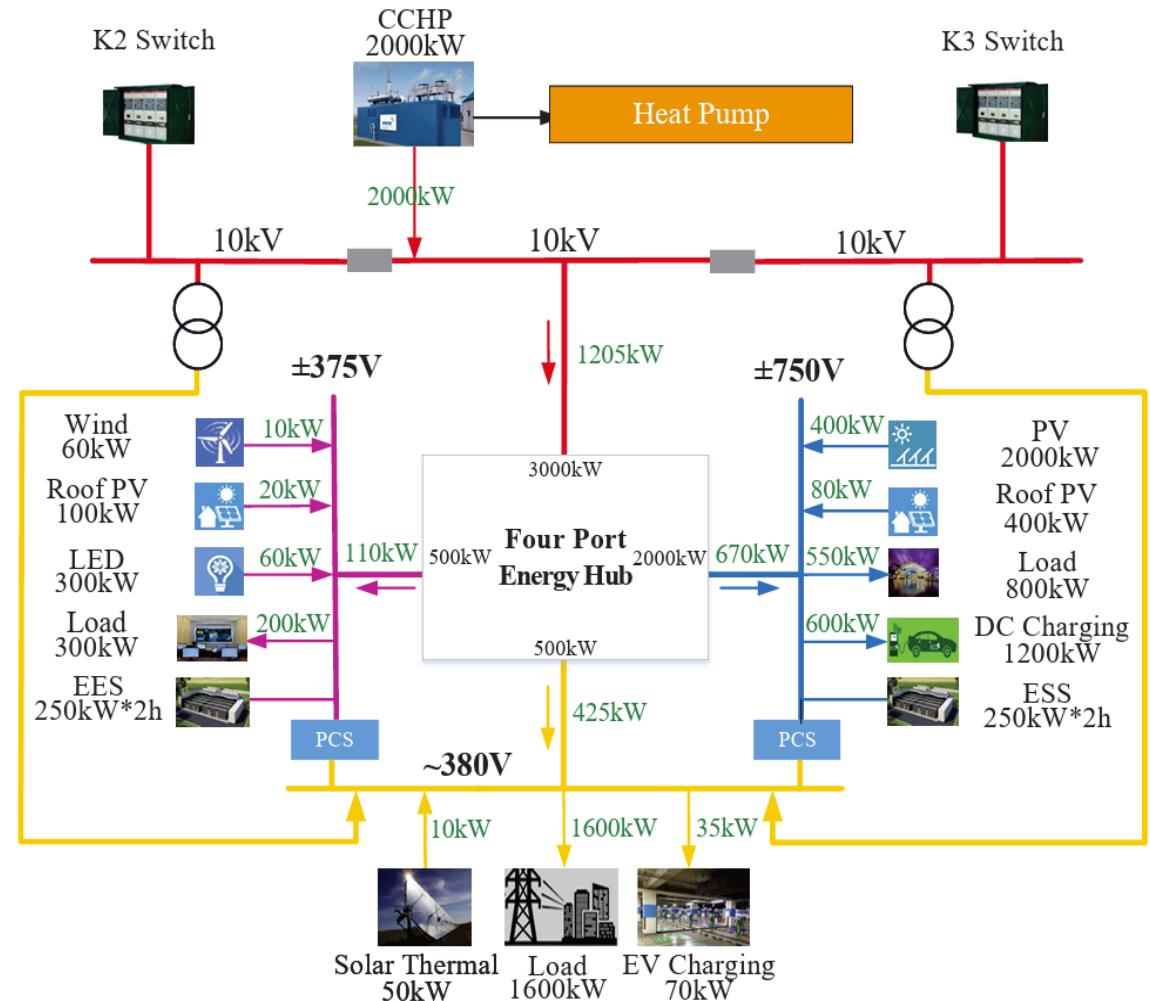
Cas concret : *Tongli Multi-Energy System Project* (IEC, 2023) [11]

Le projet “Tongli Multi-Energy System” est une démonstration d'un système multi-vecteur intégré installé à Tongli, dans la province du Jiangsu (Chine).

Quelques faits clés :

- Il intègre plusieurs vecteurs énergétiques : électricité, chaleur, gaz naturel, et hydrogène.
- Il associe des technologies de conversion et stockage multi-vecteur, par exemple : cogénération (CHP/CCHP), électrolyseurs pour production d'hydrogène (Power-to-Gas, P2G), et divers modes de stockage (thermique, électrique, hydrogène).
- Il est conçu pour équilibrer localement les flux énergétiques, réduire les pertes, et augmenter l'efficacité globale du système énergétique de la région pilote.

Résultat : +15 % d'efficacité énergétique, -20 % d'émissions, Stabilité accrue du réseau électrique.



Configuration du projet de système multi-énergie de Tongli [11]

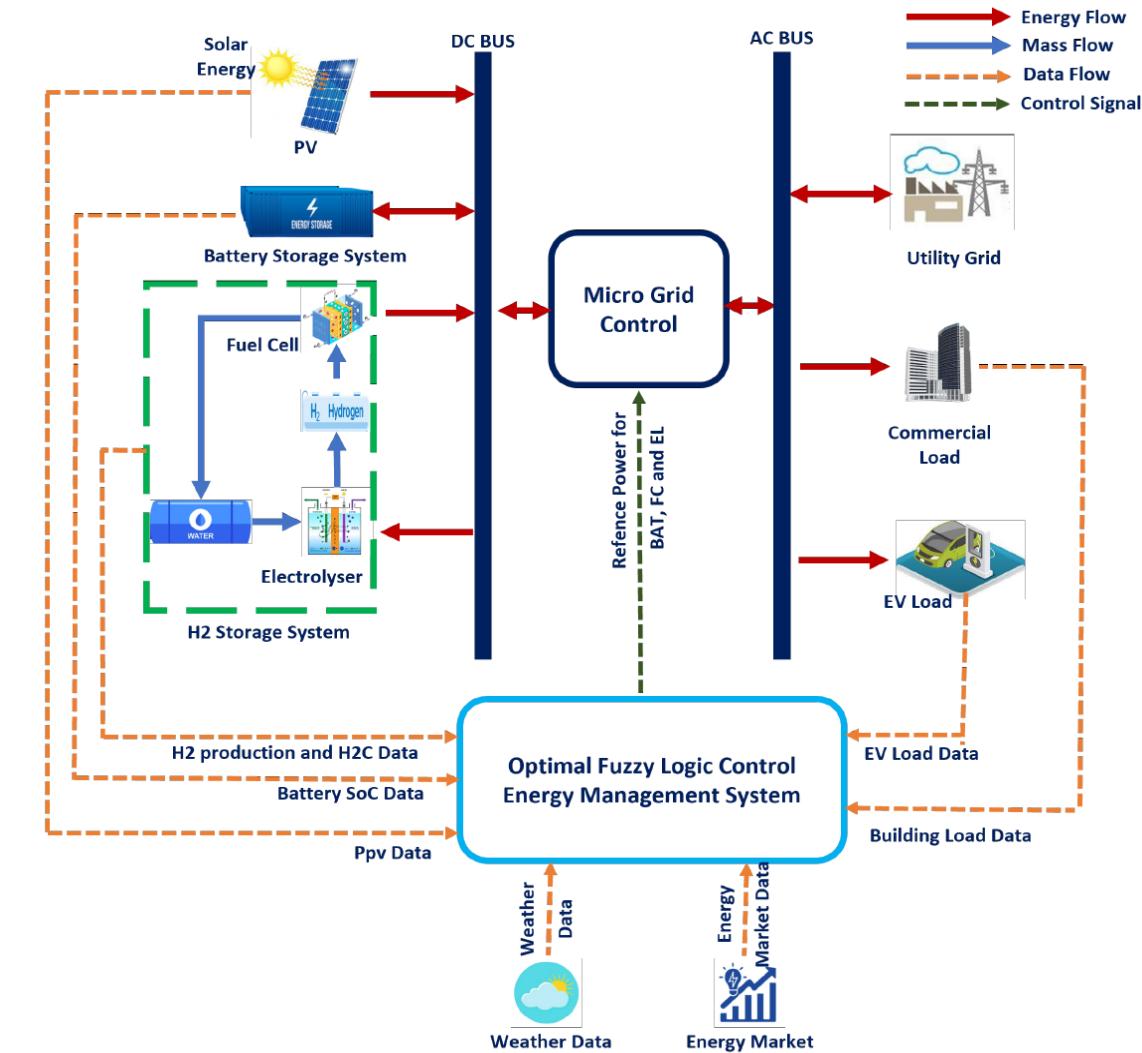
Cas d'études

Projet ANR CRISTAL – L2EP : Conception Optimale d'un Système Multi-énergies Appliquée aux bâtiments Commerciaux – COSMAC [12]

Objectif global

Concevoir un **système multi-énergie optimal** (PV–batterie–hydrogène) pour bâtiments commerciaux avec **recharge de véhicules électriques (EV)** :

- Réduire le **coût annuel de l'énergie** et les **émissions de CO₂**.
- Garantir **fiabilité** et **résilience** face à la variabilité solaire et au comportement stochastique des utilisateurs EV.



Architecture du système multi-énergie étudié

Cas d'études

Projet ANR CRISTAL – L2EP : **Conception Optimale d'un Système Multi-énergies Appliquée aux bâtiments Commerciaux – COSMAC** [12]

⚙ Méthodologie intégrée

1. Modélisation complète du système

PV, batterie Li-ion, électrolyseur, pile à combustible, réservoir H₂, réseau.

2. Modélisation stochastique de la demande EV

→ basée sur l'arrivée et le départ des visiteurs (modèle probabiliste en deux étapes).

3. Contrôle intelligent – Fuzzy Logic Controller (Mamdani)

→ coordination dynamique PV–batterie–H₂–réseau.

4. Optimisation conjointe (sizing + contrôle)

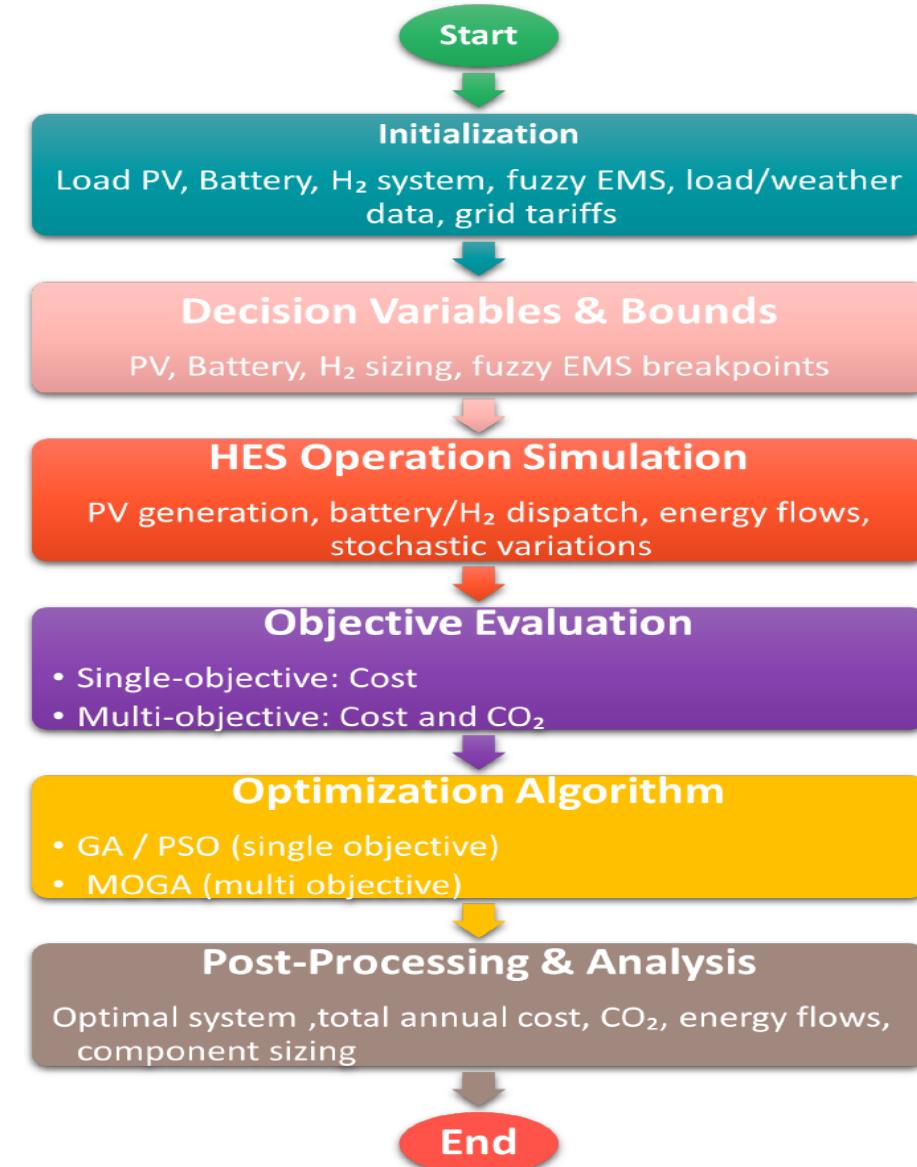
1. Algorithmes : GA, PSO, MOGA.
2. Objectifs : minimiser coût total et émissions CO₂ sous contraintes techniques.

5. Simulation annuelle sous incertitudes réalistes

(±20 % sur irradiance, température, charge bâtiment et EV).

✳ Innovation

- Intégration conjointe **dimensionnement + pilotage intelligent**.
- Prise en compte du **comportement aléatoire des utilisateurs EV**.
- Optimisation **multi-objectif** (économie / environnement).



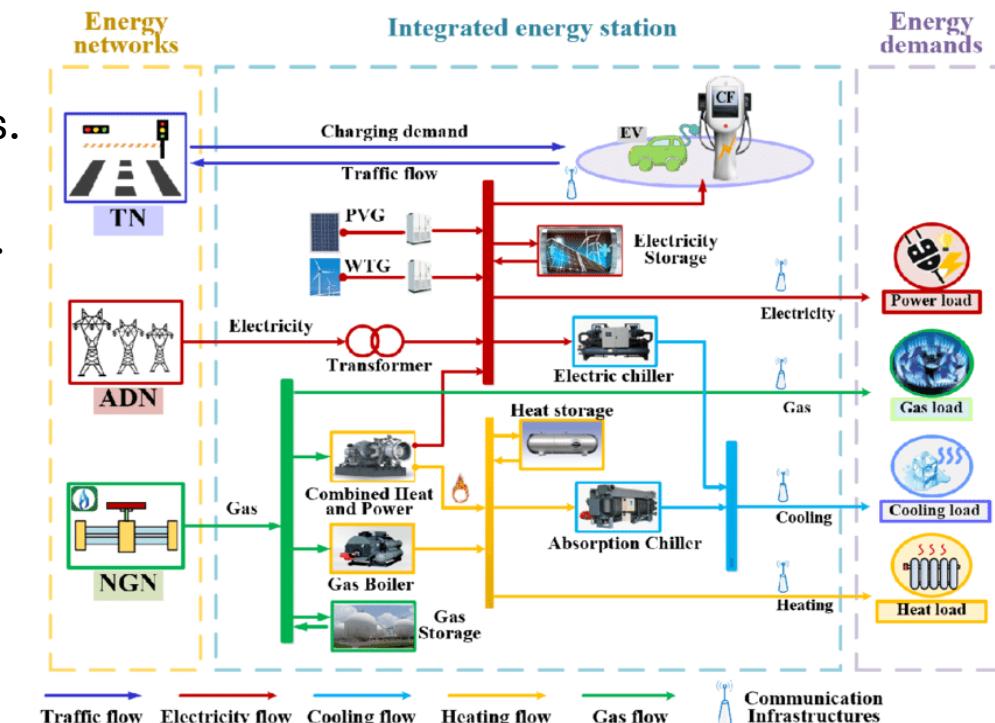
Conclusion

Enjeux actuels

- Techniques** : garantir l'interopérabilité et les standards (IEC, IEEE).
- Économiques** : créer de nouveaux modèles de marché multi-énergies.
- Environnementaux** : mesurer le bilan carbone multi-vecteur.
- Sociétaux** : renforcer gouvernance locale, cybersécurité et confiance.

Perspectives

- Blockchain** : échanges automatiques d'électricité et de chaleur.
- Jumeaux numériques** : prévision, maintenance, formation.
- Communautés énergétiques** : stockage, mobilité, chaleur intégrée.
- IA distribuée** : coordination entre bâtiments, réseaux et usagers.



Structure d'un système énergétique intelligent et interconnecté (électricité, gaz, transport) [13]

L'avenir de l'énergie ne sera pas seulement électrique — il sera **multi-énergétique, interconnecté et intelligent**.

Pour en savoir plus

❖ Références

- [1] ELADL, Abdelfattah A., EL-AFIFI, Magda I., EL-SAADAWI, Magdi M., et al. A review on energy hubs: Models, methods, classification, applications, and future trends. *Alexandria Engineering Journal*, 2023, vol. 68, p. 315-342.
- [2] MANCARELLA, Pierluigi. MES (multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models. *Energy*, 2014, vol. 65, p. 1-17.
- [3] ONEN, Patrick Sunday, MOKRYANI, Geev, et ZUBO, Rana HA. Planning of multi-vector energy systems with high penetration of renewable energy source: a comprehensive review. *Energies*, 2022, vol. 15, no 15, p. 5717.
- [4] GEIDL, Martin, KOEPPEL, Gaudenz, FAVRE-PERROD, Patrick, et al. Energy hubs for the future. *IEEE power and energy magazine*, 2007, vol. 5, no 1, p. 24-30.
- [5] LIU, Fang, HUANG, Yucong, WANG, Yalin, et al. Short-term multi-energy consumption forecasting for integrated energy system based on interactive multi-scale convolutional module. *Scientific Reports*, 2024, vol. 14, no 1, p. 21382.
- [6] Dhaker ABBES, L2EP Junia, *Forecasting the Production and Consumption of Electrical Energy, Smart Grids and Buildings for Energy and Societal Transition*, ISTE, 2024
- [7] Zhang, G., Hu, W., Cao, D., Zhang, Z., Huang, Q., Chen, Z., & Blaabjerg, F. (2022). A multi-agent deep reinforcement learning approach enabled distributed energy management schedule for the coordinate control of multi-energy hub with gas, electricity, and freshwater. *Energy Conversion and Management*, 255, 115340.

Pour en savoir plus

❖ Références

- [8] SAGE, Manuel, AL HANDAWI, Khalil, et ZHAO, Yaoyao Fiona. The Economic Dispatch of Power-to-Gas Systems With Deep Reinforcement Learning: Tackling the Challenge of Delayed Rewards With Long-Term Energy Storage. In : *Energy Sustainability*. American Society of Mechanical Engineers, 2025. p. V001T02A005.
- [9] SHUAI, Hang, AI, Xiaomeng, FANG, Jiakun, et al. Double Deep Q-learning Based Real-Time Optimization Strategy for Microgrids. arXiv preprint arXiv:2107.12545, 2021.
- [10] ZHENG, Ling, ZHOU, Bin, CAO, Yijia, et al. Hierarchical distributed multi-energy demand response for coordinated operation of building clusters. *Applied Energy*, 2022, vol. 308, p. 118362.
- [11] International Electrotechnical Commission (IEC). Multi-Energy Coupling Systems: Technology and Market Outlook. April 2023. URL : https://iec.ch/system/files/2023-04/iec_tmop_multi-energy_coupling_en_hr_0.pdf
- [12] KHAN, Aqib, BRESSEL, Mathieu, DAVIGNY, Arnaud, et al. A Comparative Study of Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization for Hybrid Renewable Systems with Battery and Hydrogen System. In : The 26th European Conference on Power Electronics and Applications. 2025.
- [13] XIE, Shiwei, HU, Zhijian, WANG, Jueying, et al. The optimal planning of smart multi-energy systems incorporating transportation, natural gas and active distribution networks. *Applied Energy*, 2020, vol. 269, p. 115006.