

# Le numérique, un levier au service de la transition énergétique



# Présentation



**Audrey VIAL**

- Chef de projet BIM/Data au sein DTI
- Chef de produit de la solution Continium
- 20 ans d'expertise numérique pour le bâtiment
- 15 ans au CSTB



**Peter RIEDERER**

- Ingénieur chercheur spécialisé sur les systèmes énergétiques dans les bâtiments au sein de la DEE
- 28 ans d'expertise en modélisation, suivi sur site et évaluation en laboratoire de systèmes énergétiques

# Les activités clés du CSTB

LA RECHERCHE & EXPERTISE

**pour penser**  
le bâtiment et la ville de demain

L'ÉVALUATION

**pour vérifier**  
l'intégralité des solutions innovantes

LA CERTIFICATION

**pour valoriser**  
la qualité sur le marché

LES ESSAIS

**pour caractériser**  
les performances

LA DIFFUSION DES CONNAISSANCES

**pour soutenir**  
les compétences des acteurs



# Présentation

## La Direction Technologie de l'Information (DTI)

### 3 domaines essentiels

- Jumeaux numériques
- Intelligence artificielle
- Données expertes

### Démarche complémentaire

- Numérique responsable

### 3 acteurs majeurs

- Collectivités publiques
- Gestionnaires de parc
- Industriels

### Nos principales missions

- Conseil et accompagnement alliant expertise métier et numérique
- Solutions numériques bout en bout

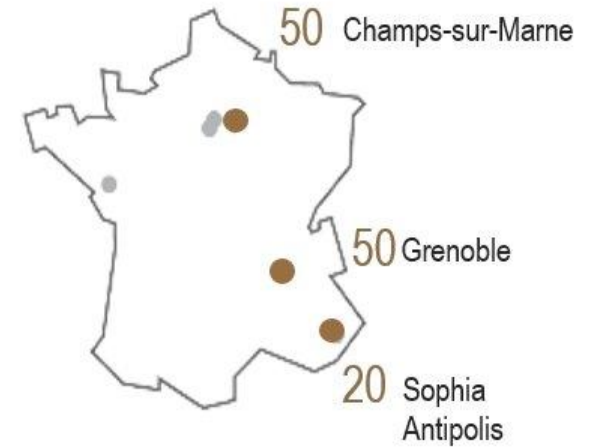
# Présentation

La Direction Energie Environnement (DEE)

Deux enjeux :

**Atténuation du changement climatique**

**Adaptation au changement climatique**



Cinq thématiques opérationnelles :

**Simulation bâtiments / quartiers**

- Cœurs de calcul (COMETH, COMENV, COLIBRI, DIMOSIM...)
- Applications (TRNSYS, RENOPTIM, URBANPRINT, POWERDIS,...)

**Performance en service**

- SEREINE
- Laboratoire semi-virtuel LSV

**Analyse en Cycle de Vie & environnement**

- RE 2020
- Laboratoire des Performances Environnementales (LPE)

**Rénovation**

- Diagnostic multi-critères

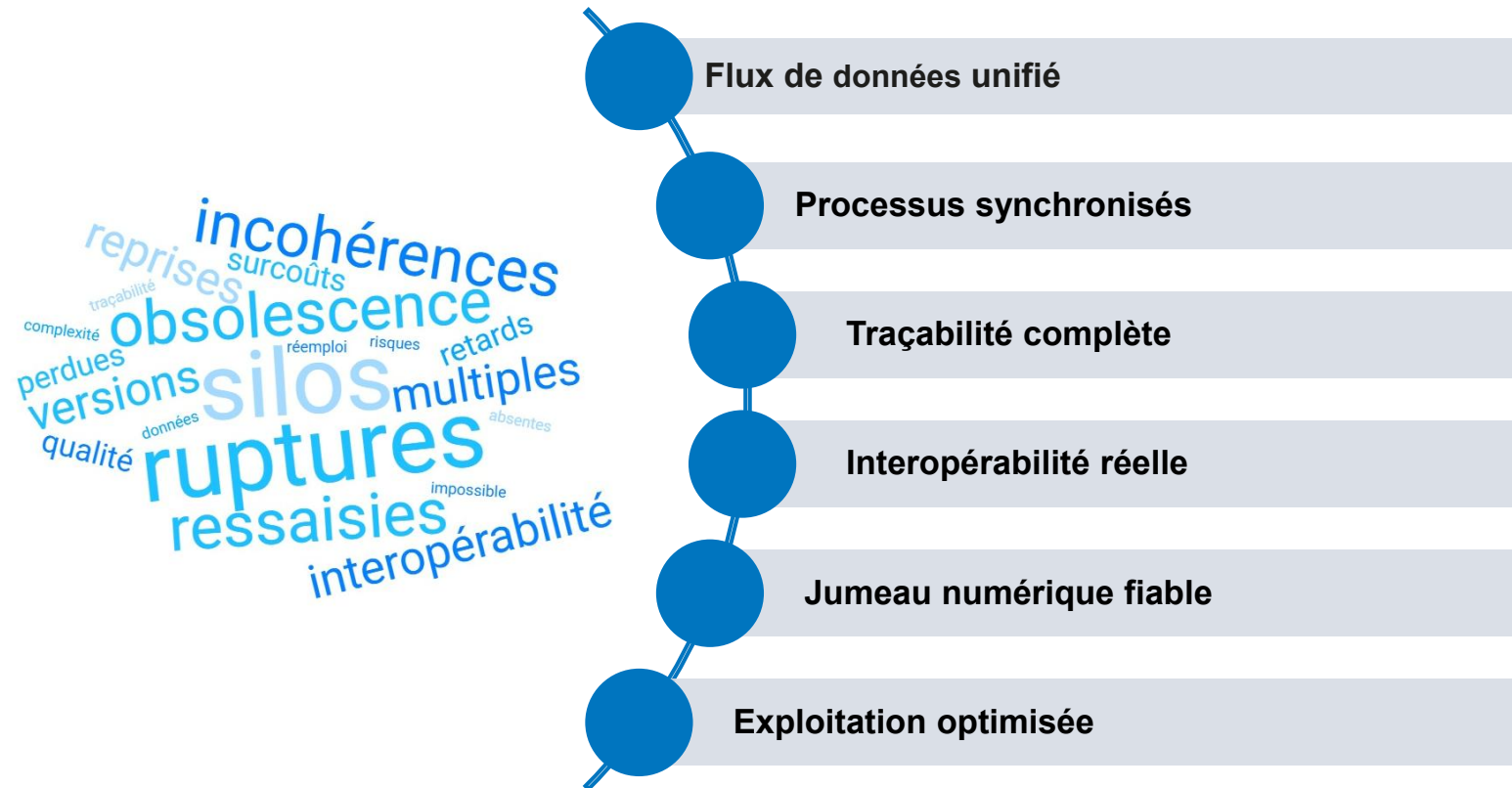
**Données décisionnelles**

- Base de Données Nationale des Bâtiments (BDNB)
- Go-Réno

# Le contexte numérique du bâtiment et de la construction

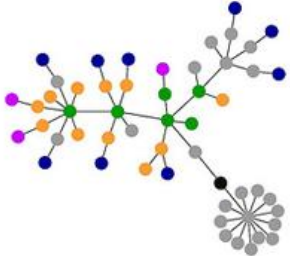


# Le contexte numérique du bâtiment et de la construction



**La Data au cœur  
des enjeux de la  
filière**

# Continium, la clé pour reconnecter une chaîne de valeur fragmentée



BIM4Ren

Simulation énergétique

Incremental  
Renovation  
Partners  
AEGIR

Rénovation à faible  
consommation d'énergie

Matériaux

CUBE ÉTAT  
SAISON 2024-2025

LES MEMBRES DU JURY CUBE ONT L'HONNEUR DE RÉCOMPENSER D'UNE MÉDAILLE DE PLATINE

LE CANDIDAT  
**CSTB**  
LE BÂTIMENT  
SOPHIA ANTIPOLIS

POUR SA PERFORMANCE DE 29,5% D'ÉCONOMIES D'ÉNERGIE DURANT LA SAISON 2024-2025 DU CONCOURS

Logos: Cerema, Direction de l'immobilier de l'État (DIE), Commissariat général au développement durable (CGDD), FTAP, a4m

Espace public

Optimisation énergétique

LIVING LAB  
CSTB  
JOUÉAU NUMÉRIQUE



LIVING LAB  
GARES  
& CONNEXIONS NUMÉRIQUE

BIM Gare Numérique

Seqens  
Groupe ActionLogement

Contrôler la qualité des MN BIM

Rénovation  
Audit, diagnostic et  
planification travaux



Démolition  
Déconstruction et  
gestion des déchets



Approche idéale:  
La démarche innovante basée sur le  
continuum de données

Maintenance  
Maintenance préventive  
et interventions



Programmation  
Programme fonctionnel  
et exigences BIM



Pilotage pour une programmation idéale

SNCF  
GARES  
& CONNEXIONS

Priorisation scénarios aménagement

RENNES  
MÉTROPÔLE

Exploitation  
Gestion technique  
et suivi énergétique



Conception  
Modélisation BIM  
et coordination technique



Suivi de chantier en temps réel

Traçabilité/surveillance

BIM TWIN

BEEYONDERS



Construction

Démonstration de la continuité de la conception à l'exploitation

# Le projet Living Lab

**CSTB** ENERGIE OQAI **ALERTES** 3D LOGIN Assistant IA API 12/05/2026 1

## Gestion des Alertes

Surveillez les indicateurs critiques et gérez les alertes en temps réel.

- Humidité **15**
- CO2 **1**
- Température
- Luminosité **0**
- Nitrogen Dioxide
- Particules Fines 2.5

### Humidité

**Nom du local:** Salle de réunion 501\_A1.00.0  
**Batiment:** 501 - Bâtiment A  
**Occupants:** Salle Reunion B1re (M)

Sélectionnez une période de temps: Dernière 24 heures

Exportez les données

### Surveillance en temps réel des alertes

Les alertes sont générées automatiquement en cas de dépassement des seuils prédéfinis, permettant une gestion proactive du confort et de la qualité de l'air intérieur.

Alertes actives: 1 Dernière MAJ: 12/05/2026 18:24:25 [Actualiser](#)

Alertes actives seulement Capteur: Tous Local: 501\_A1.00.0 Statut utilisateur: Tous

STATUT SYSTÈME	LOCAL	CAPTEUR	VARIABLE	SEUIL DÉC.	DÉBUT	FIN	DURÉE	STATUT UTILISATEUR	COMMENTAIRE	ACTIONS	VISUALISER
● <b>TERMINÉ</b>	501_A1.00.0	ers_co2_8927	Humidité	60 %	11/05/2026 05:02:03	11/05/2026 14:07:01	9h 4m	-	-	Connexion requise	<a href="#">Visualiser</a>

# Présentation de la solution Continium CSTB

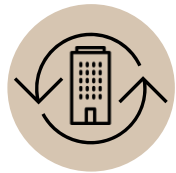


# Contexte et objectifs

## Passer d'un jumeau numérique à un **jumeau énergétique**:

C'est un outil de simulation énergétique fiable, permettant de répondre à des questions énergétiques et de confort thermique. Le jumeau est recalibré régulièrement afin d'être le plus précis que possible.

### Objectifs :



Analyser l'impact de gestes de rénovation éventuels (isolation, systèmes énergétiques, ventilation, ...)



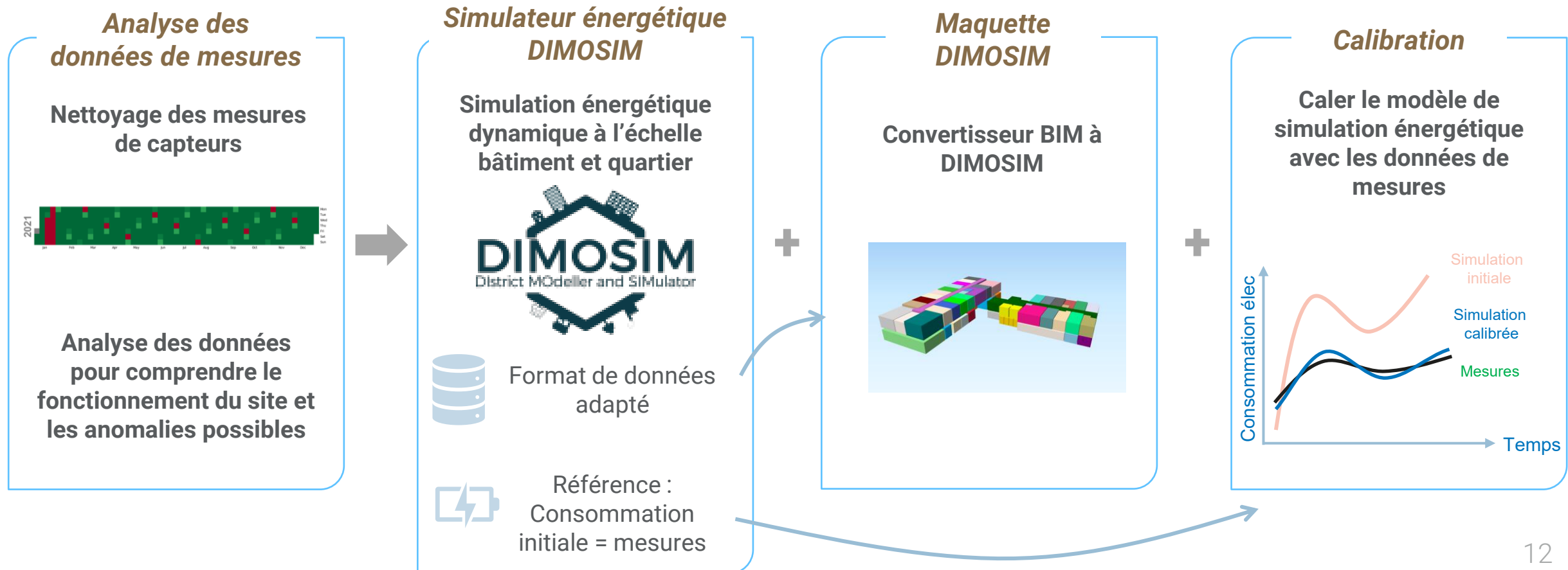
Analyser des stratégies de gestion des systèmes et proposer des améliorations de réglages



Etudier des stratégies de contrôle prédictif des systèmes (flexibilité électrique, confort des occupants...) pour les services généraux et pour sensibiliser les occupants

# Méthodologie de construction d'un jumeau énergétique

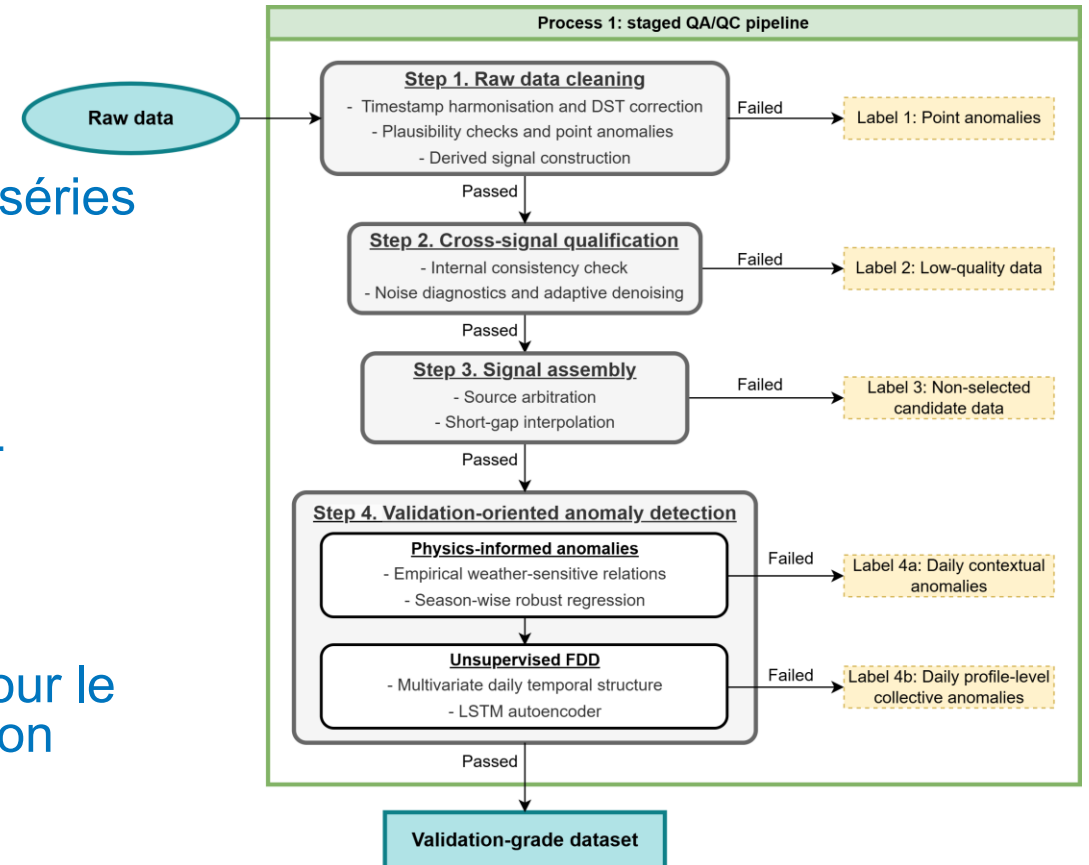
## Etapes principales



# Analyse de validité des données de mesure - 1

## Vérifier et corriger les données de mesure

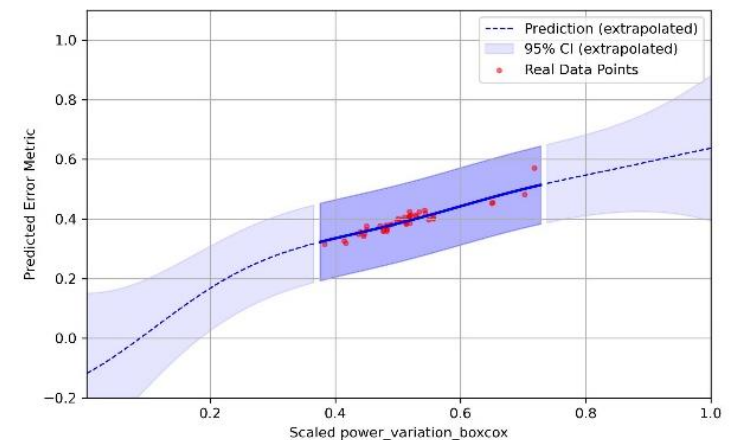
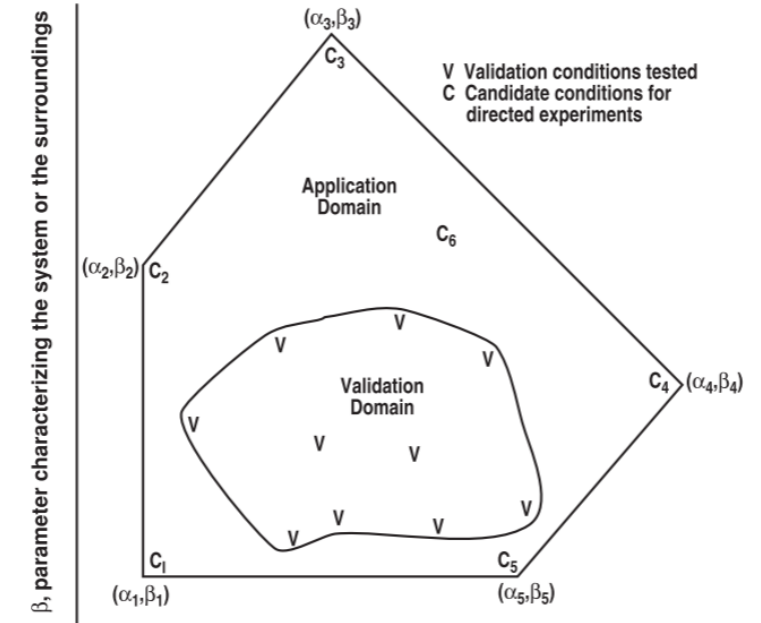
- Nettoyage données brutes et harmonisation des séries temporelles
- Vérification d'incohérences et corrections :  
... bruit de mesure, vérification de la physique, etc.
- Elimination des valeurs impossibles
- Vérification de la représentativité des données pour le domaine d'application (e.g. vacances, périodes non représentatives ou avec gestion atypique)



# Analyse de validité des données de mesure - 2

Vérifier le domaine de validité des données de mesure

- S'assurer que les données de mesure de validations correspondent au cas d'usage du modèle
- Mise en place d'une méthode d'extrapolation de validation (Process Gaussien)
- Quantification de l'erreur de prédiction lors de l'utilisation en dehors des plages de validation

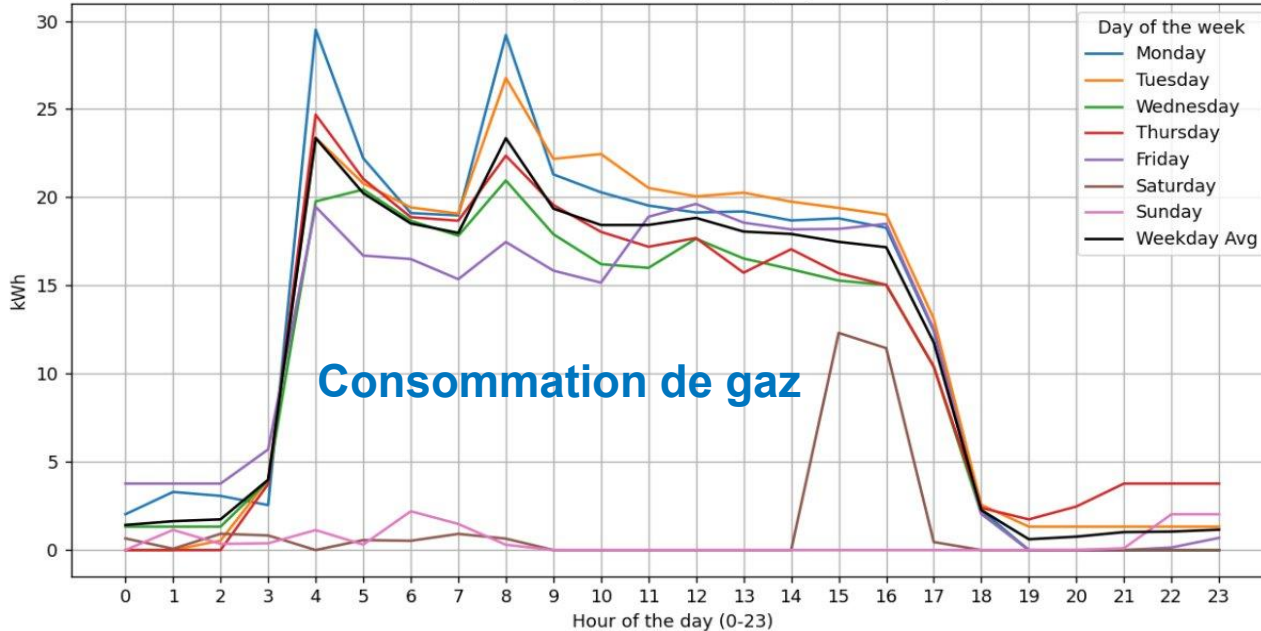


# Analyse comportementale des données de mesure - 1

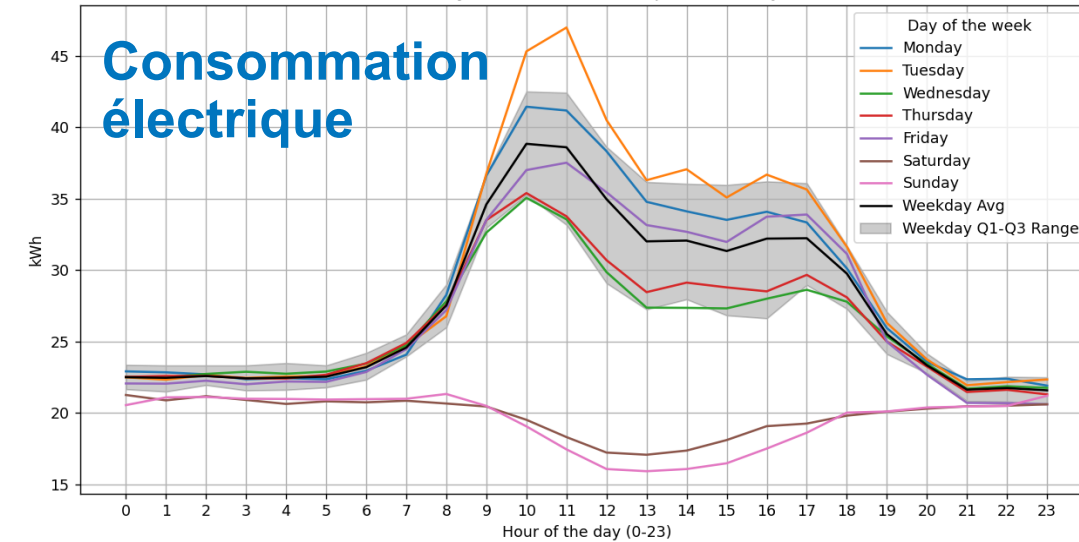
## Consommation de gaz et électrique du CSTB Sophia Antipolis

- Analyses par jour type avec distribution horaire sur une période donnée
- Thermo-sensibilité des consommations

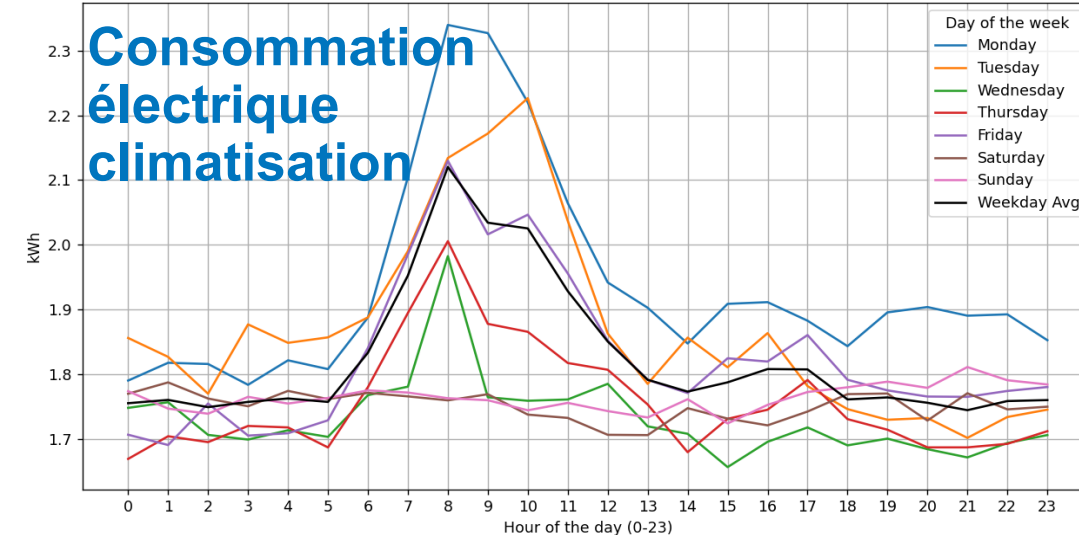
Consommation moyenne de gaz du bâtiment A/B par heure et jour, en kWh



Consommation moyenne du site (TGBT) par heure et jour, en kWh



Consommation moyenne des clim (TD4) par heure et jour, en kWh



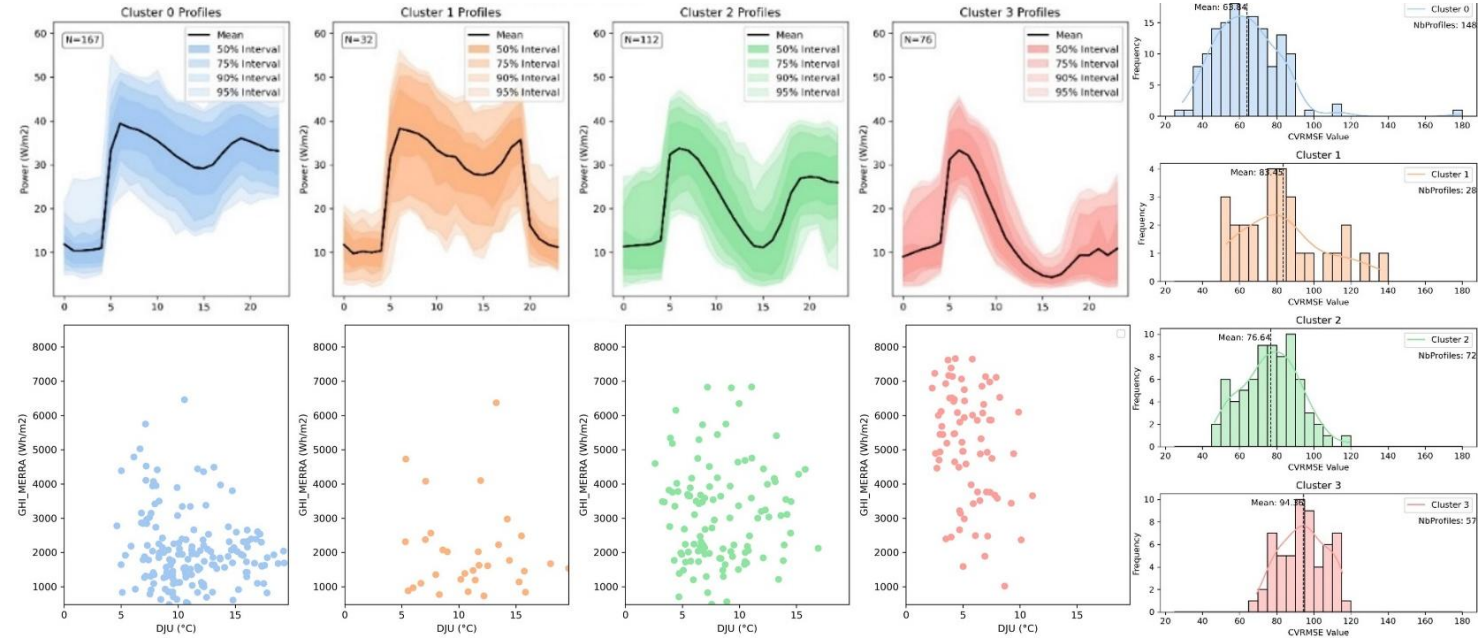
# Analyse comportementale des données de mesure - 2

## Analyse des Consommations par une méthode clustering

→ Détecter des jours type avec une méthode de clustering

→ Ceci permet de:

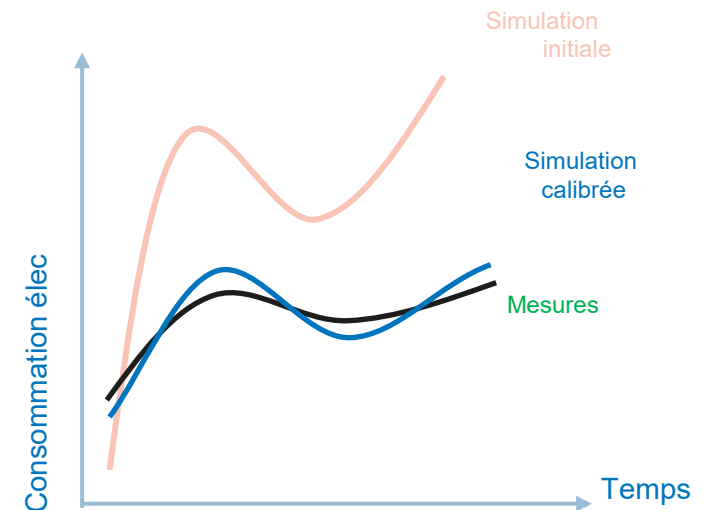
- Comprendre les caractéristiques et la gestion du bâtiment
- Détecter des anomalies ou exceptions à ne pas considérer pour la validation



© Thèse Chunxiao WANG  
Efficacy / CSTB

# Calibration du Jumeau énergétique

- **Des écarts persistants entre simulation et réalité**
  - Malgré un modèle détaillé et des paramètres précis, on observe des différences notables entre les sorties simulées et les mesures réelles.
  - 👉 La calibration permet d'ajuster les paramètres pour réduire ces écarts.
- **Une calibration complexe à mettre en œuvre**
  - Le nombre de paramètres et de combinaisons possibles rend l'exploration exhaustive difficile.
  - Exemple : 5 paramètres × 20 valeurs chacun = plus de 3 millions de simulations, soit des milliers d'heures de calcul.
- **Développement d'algorithmes d'optimisation efficaces**
  - Il existe des méthodes capables d'explorer intelligemment l'espace des paramètres, en limitant le nombre d'évaluations nécessaires.
- **Outil de calibration « CALIENTE » du CSTB** : il intègre des méthodes PSO (Particle Swarm Optimisation), algorithmes génétiques ou simple avec Latin hypercube



# Calibration et validation statique ou dynamique

## Calibration statique: validation de la consommation cumulée

Calibration (simple) effectuée sur la consommation totale de gaz ou d'électricité du bâtiment sur une période donnée.

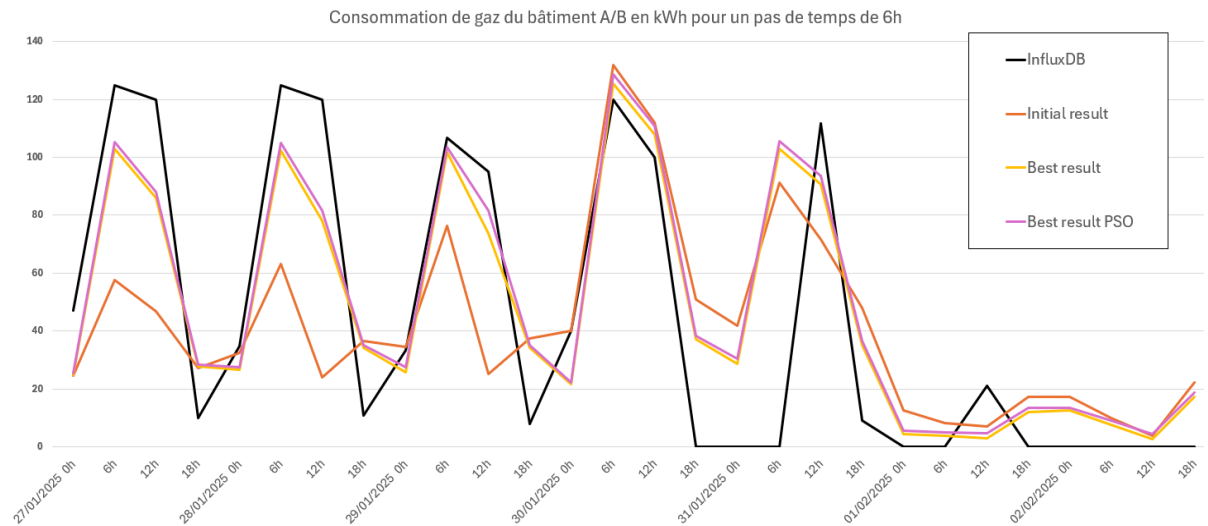
→ « facile » avec erreur quasi-nulle sur l'énergie

## Calibration dynamique: validation de toutes la série temporelle des puissances

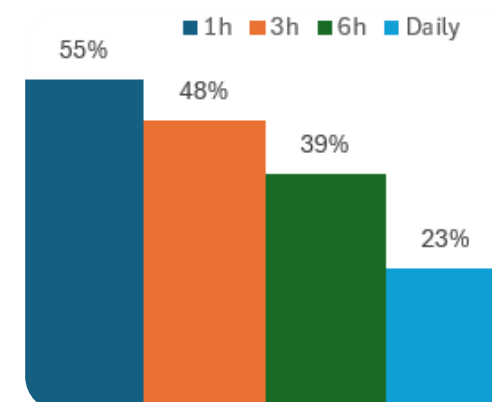
Comparaison des profils de consommation des données mesurées et simulées, avec un pas de temps qui peut aller de 5 minutes à la journée

→ Très difficile

Impact fort du pas de temps de validation →



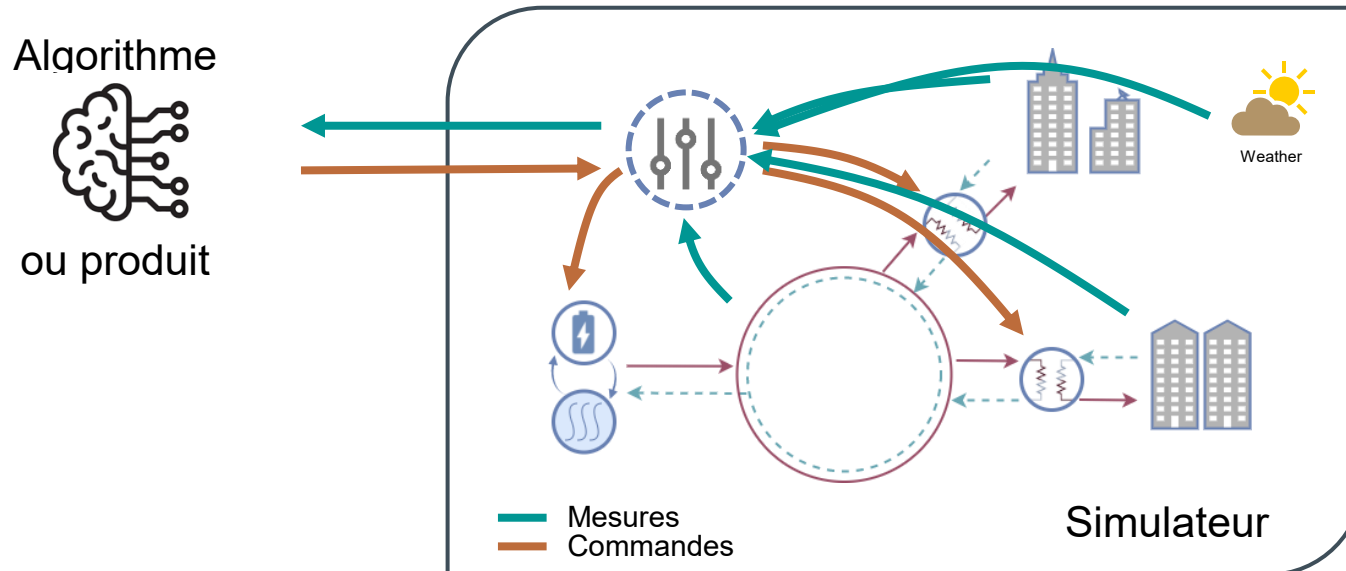
## Impact du pas de temps :



# Applications – Evaluation d’algorithmes de gestion innovants - 1



## Fonctionnement



- Remplacement de n’importe quel régulateur dans l’outil par un module externe (algorithme ou produit réel)
- Simulation avec DIMOSIM via un service API dédié
- Echange de “mesures” (DIMOSIM) et de signaux de gestion (Controller) à chaque pas de temps

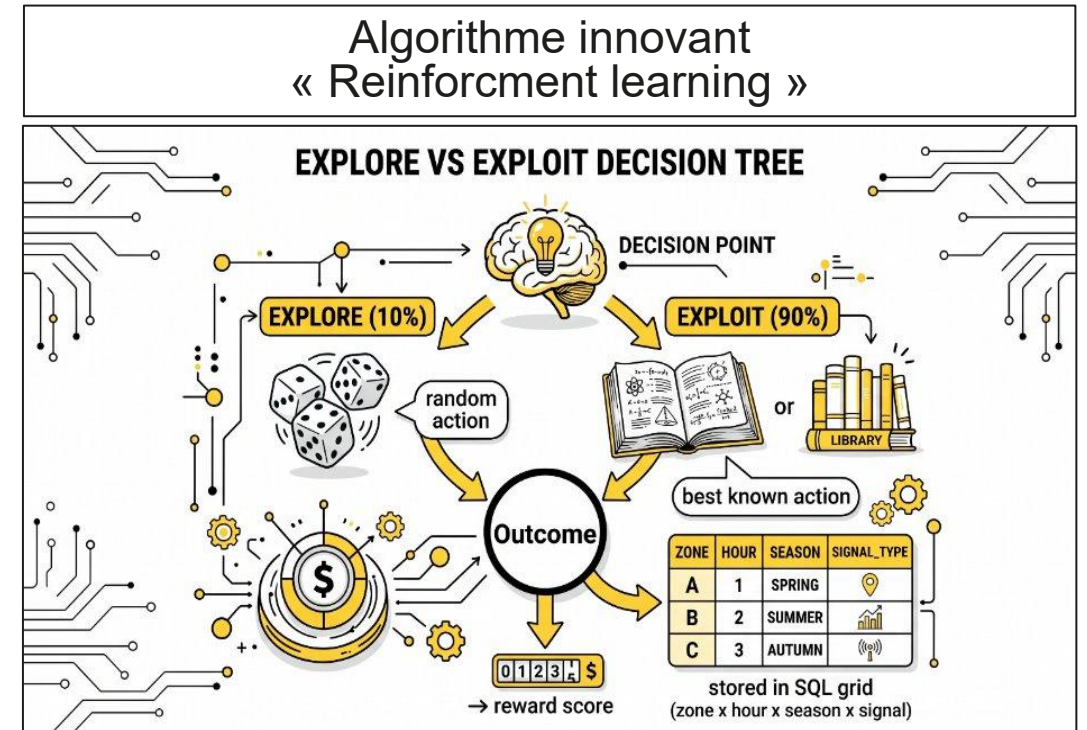
# Applications – Evaluation d’algorithmes de gestion innovants - 2

## Exemple d’un projet Européen COLLECTiEF

- Algorithme développé par l’Université de LUND basé sur le « reinforcement learning »
- Algorithme innovant qui se situe entre une gestion basique et un algorithme prédictif (MPC)

## Application à des bâtiments pilote

- Par cosimulation, en connectant l’algorithme au jumeau numérique du bâtiment
  - Par émulation, en connectant la box énergétique au jumeau numérique du bâtiment
  - En réel, avec l’intégration d’une box énergétique liée à la GTB
- Test sur le living-lab du CSTB en discussion



# Applications – exemple de résultats

## Evaluation par cosimulation et émulation

Les indicateurs clé :

Consommations / Flexibilité électrique / Confort thermique

ont été évalués par cosimulation.

## Evaluation dans les bâtiments pilote réels

L'algorithme a été déployé dans 12 bâtiments pilotes en Norvège, Italie et à Chypres.

Comparaison avec la solution de référence (baseline) via la signature énergétique et une modélisation bayésienne.

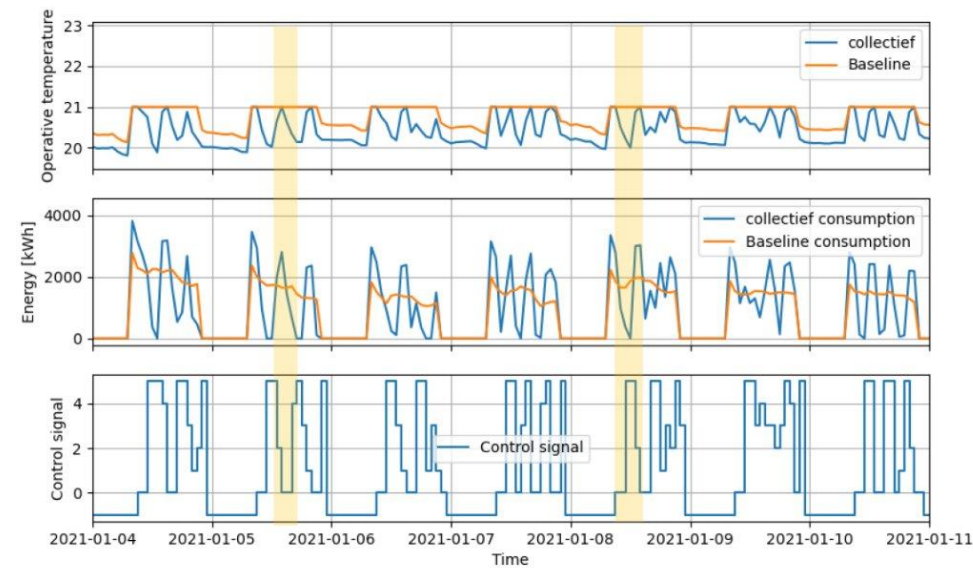
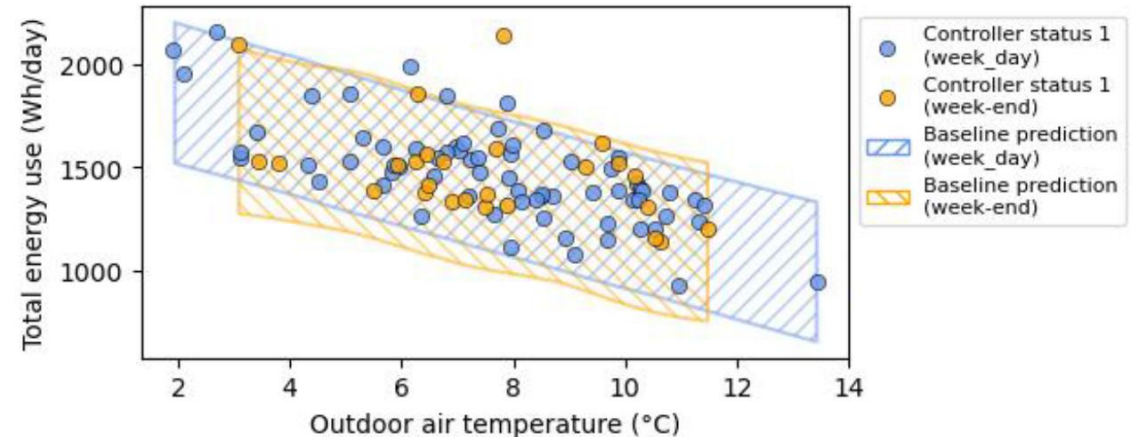
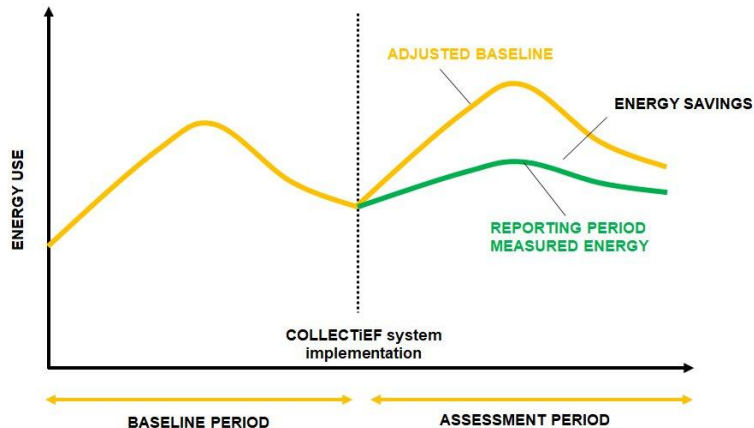


Table 18 Overview of KPIs in pilot zones - Eidet Omsorgscenter

KPI Name	Unit	Baseline	With Control	% difference
Energy	kWh	5102,23	4923,5	4%
Electricity	kWh	5102,23	4923,5	4%
Electricity cost (total / heating)	euro/m2	5,25	5,06	4%
Supply cover factor	%	0	0	0%
Primary Energy (total / heating)	kWh	6122,68	5908,21	4%
Peak power	kWh	1969,64	1444,48	27%
Load factor Heating : average/maximum demand	-	0,23	0,17	-25%
Demand flexibility factor (DFF)	-			27%
DFF Percentage of time-steps within bounds	%			83%
Peak hours flexibility factor	-	0,23	0,41	19%
ALD	%	4,7	5,31	-13%



# Applications – Evaluation d’algorithmes de gestion innovants – 3 Comparaison avec la solution “ parfaite ”

Evaluation multicritère : Consommation / Confort thermique / flexibilité

## Pareto

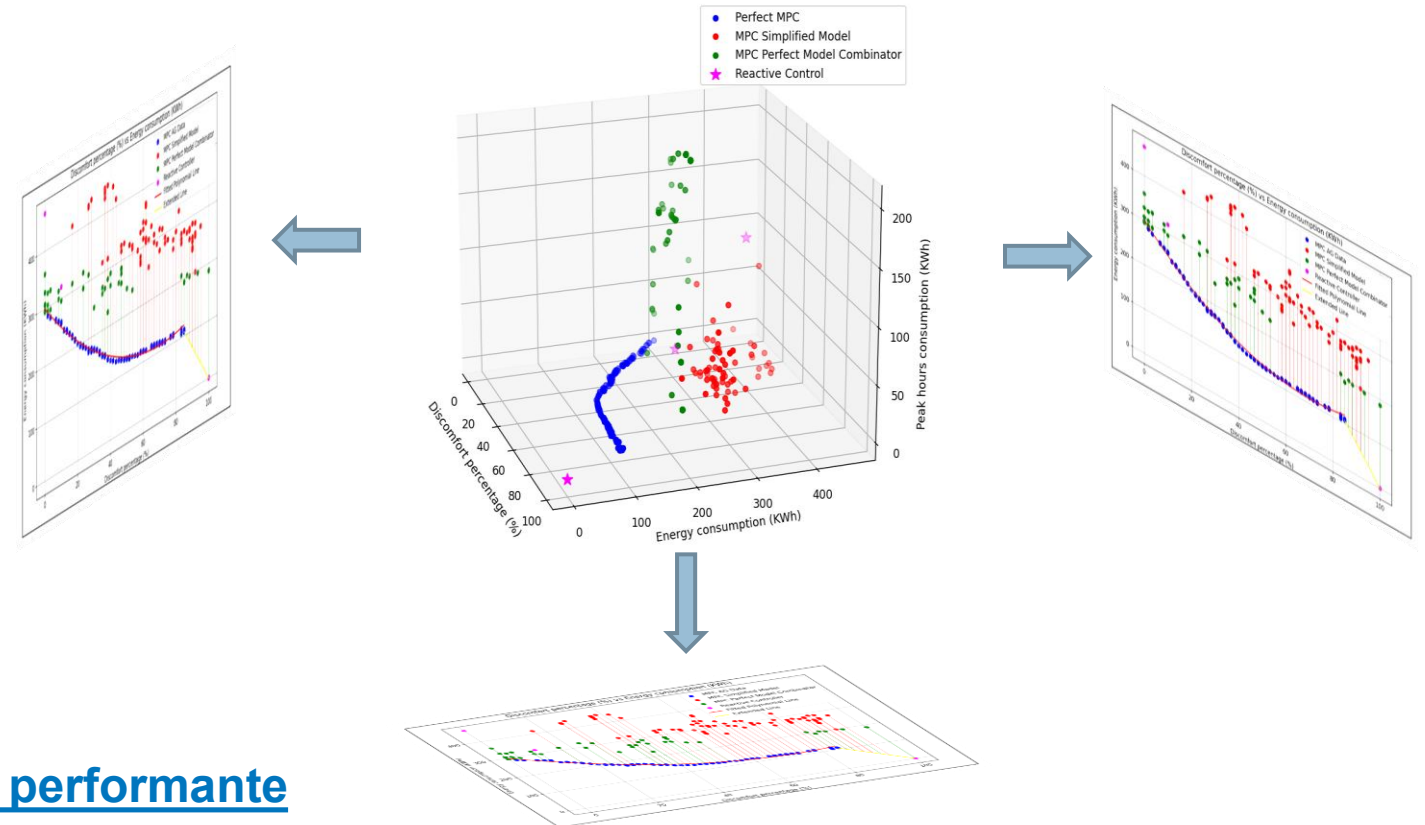
Les algorithmes innovants sont en grande majorité basés sur une optimisation multicritère.

Une évaluation d’un seul résultat ne fait aucun sens.

Une évaluation par Pareto d’un algorithme est donc effectuée.

L’algorithme sera comparé avec la courbe Pareto de la meilleure solution possible

→ Le jumeau numérique est une solution performante

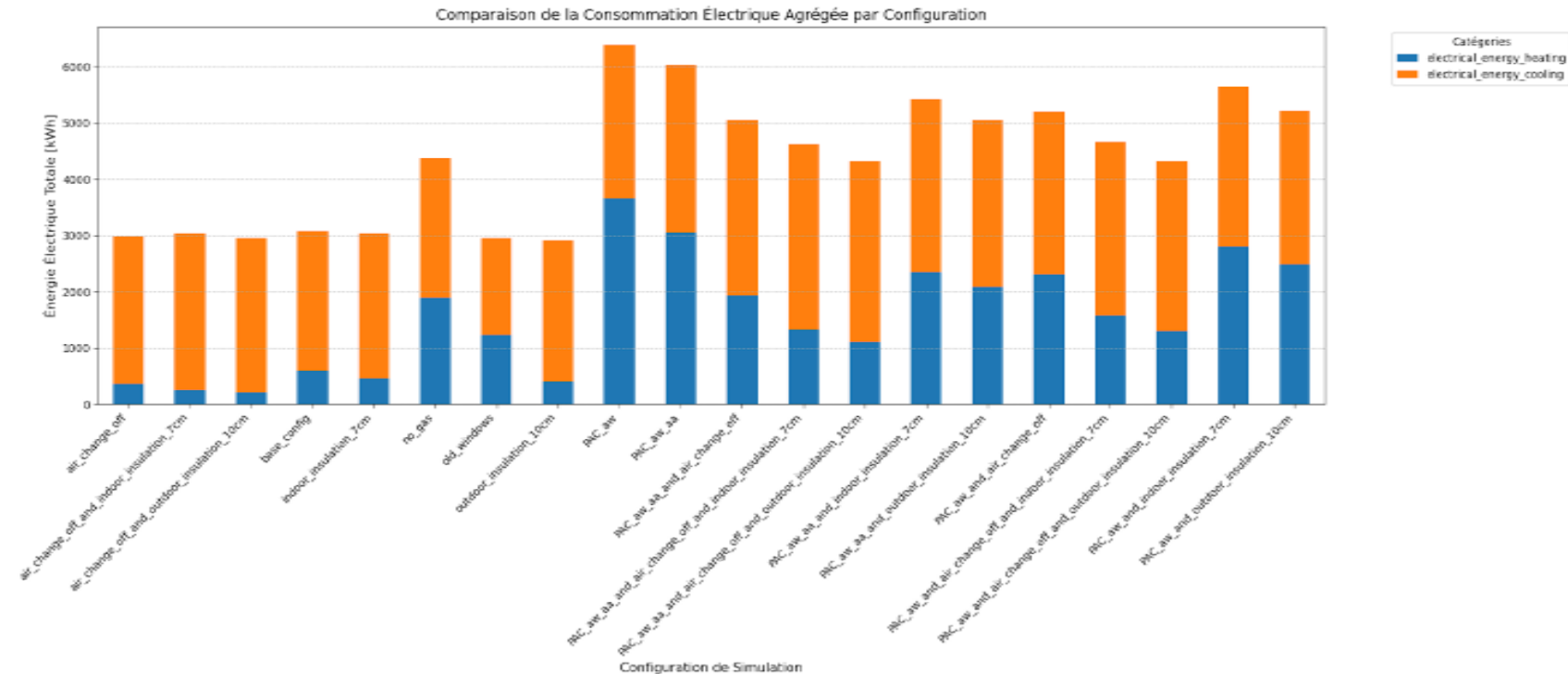


# Applications – Analyse des gestes de renovation du living lab

Le Jumeau numérique pour analyser les gestes de renovation et d'amélioration

- Rénovation de l'enveloppe (ITE, ITI), menuiseries
- Changement de systèmes de chauffage / rafraichissement
- Changement réglage ou système de ventilation
- Meilleur paramétrage de la gestion

→ Le jumeau énergétique assiste à l'amélioration des bâtiments



# Perspectives 2026/2027

## Performance énergétique & CVC

Optimisation des systèmes CVC par l'IA

Analyse des comportements des occupants pour ajuster dynamiquement les consignes de température

Prédiction des charges thermiques à partir de la météo et du taux d'occupation

-> Réduction des gaspillages énergétiques

## Confort thermique personnalisé

Modèles prédictifs de confort croisés avec les données temps réel (température, CO<sub>2</sub>, humidité, présence, météo, activité, tenue vestimentaire...)

Création d'environnements intérieurs plus confortables et adaptés aux usages

## Flexibilité électrique & énergies renouvelables

Pilotage intelligent de l'effacement de charge (pics de demande, prix élevés)

Prédiction de la production solaire pour maximiser l'autoconsommation

Arbitrage consommer / stocker / injecter l'électricité via le jumeau numérique