



Chambéry | 3 – 6 juin 2025

Sobriété énergétique et optimisation intégrée des stratégies de rénovation et de gestion des bâtiments de bureaux en France : impacts énergétiques, économiques et environnementaux

Adnane M'SAOURI EL BAT¹, Antoine LECONTE², Jean-Gabriel WINKLER¹, Ophélie OUVRIER-BONNAZ²

¹PANDO2, 46 Rue René Clair – 75018 Paris, France.

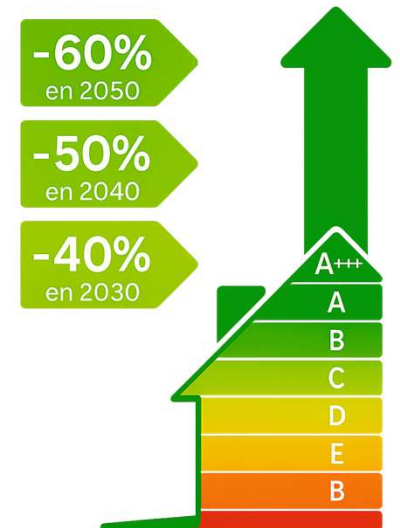
²Univ. Grenoble Alpes, CEA, Liten, INES, 73375 Le Bourget-du-Lac, France

Contexte & enjeux du secteur du bâtiment tertiaire



- Parc tertiaire vieillissant et hétérogène. Il est souvent difficile pour les gestionnaires de savoir quelles actions prioriser.
- Taux de rénovation trop faible, ce qui est très insuffisant au regard des ambitions climatiques.

Décret Tertiaire



Cette trajectoire réglementaire renforce l'urgence de déployer des outils d'aide à la décision pour planifier et optimiser les actions de rénovation.

Il est donc nécessaire de développer des outils rapides, fiables et multi-critères pour accompagner la décision énergétique

Problématique & objectif

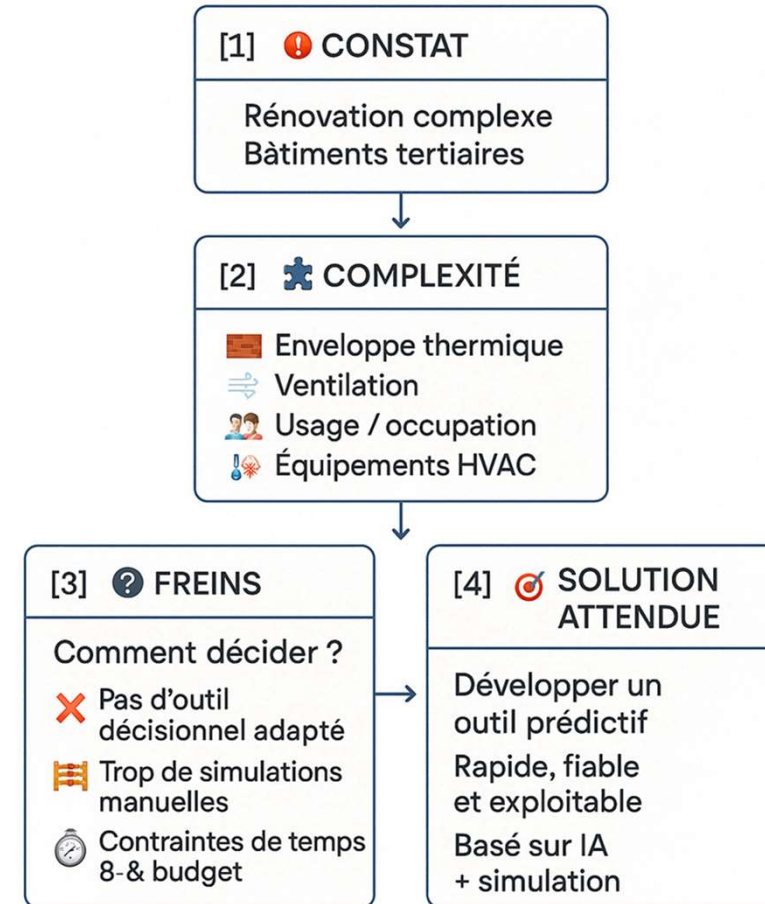
Face à l'urgence climatique et aux exigences réglementaires, les gestionnaires de bâtiments tertiaires sont confrontés à une **équation complexe** :

Faire mieux, plus vite... avec moins de moyens

⚙️ Trop de leviers à considérer, trop de scénarios possibles, trop peu de temps pour tout simuler.

La vraie question n'est plus "**quoi faire**", mais :

- **Comment** orienter rapidement les bons choix de rénovation ?
- **Comment** guider efficacement les choix de rénovation énergétique ?
- **Comment** aider un gestionnaire de parc à prendre la meilleure décision, rapidement, avec peu de données ?



AI / Machine Learning / Neural Networks / Deep Learning ?

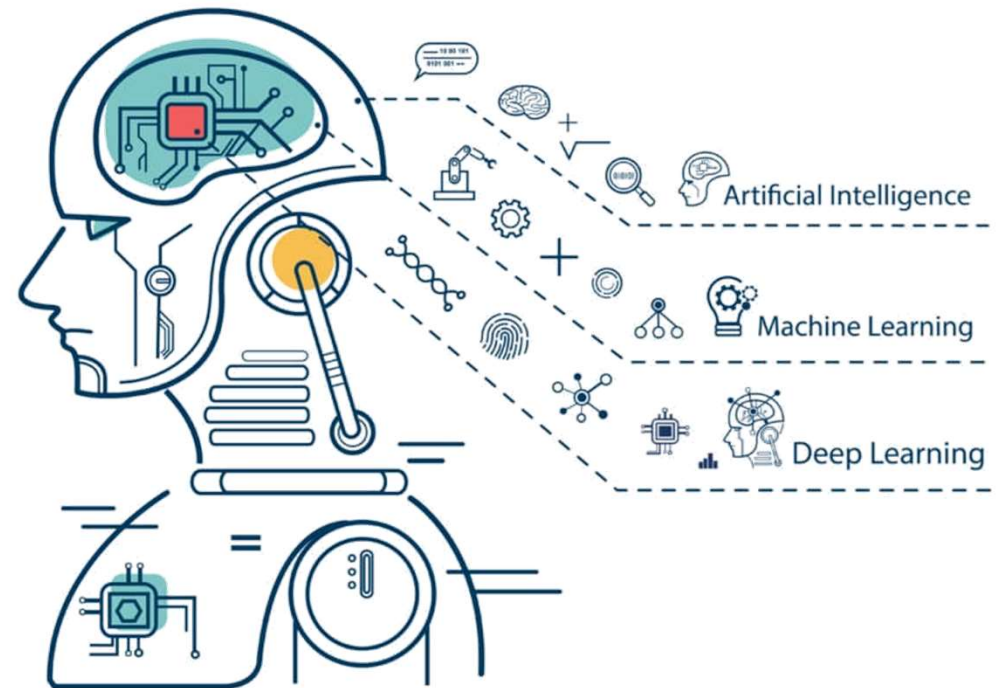
Intelligence
Artificielle ?

Machine
Learning ?

Réseaux de
Neurones
Artificiels ?

Deep Learning ?

Quelles différences ?



<https://fr.slideshare.net/slideshow/artificial-intelligence-machine-learning-deep-learning-ppt-powerpoint-presentation-slide-templates-249509414/249509414>

AI / Machine Learning / Neural Networks / Deep Learning ?



Intelligence Artificielle (IA)

- Apparue dans les années **1950**
- Vise à simuler l'intelligence humaine dans les machines
- Englobe diverses techniques : règles, logique, algorithmes, apprentissage, systèmes experts
- **Objectif** : rendre les machines "intelligentes" (capables de raisonner, comprendre, apprendre)



Apprentissage automatique (Machine Learning)

- Développé dans les années **1960-1980**
- Sous-domaine de l'IA
- Les machines apprennent à partir de données pour améliorer leurs performances
- **Objectif** : prédire ou prendre des décisions sans être programmée pour chaque tâche



Réseaux de neurones (Neural Networks)

- Concepts formalisés dans les années **1980**
- Inspirés du cerveau humain
- Modèles constitués de neurones artificiels interconnectés
- **Objectif** : identifier des schémas complexes dans les données (images, sons, textes)



Apprentissage profond (Deep Learning)

- Essor depuis les années **2010**
- Sous-catégorie des réseaux de neurones
- Type de ML utilisant des réseaux de neurones très profonds (beaucoup de couches) → très puissant pour des tâches complexes
- **Objectif** : traiter de grandes quantités de données et automatiser l'extraction de caractéristiques (reconnaissance vocale, images, langage naturel)



IA générative (Generative AI)

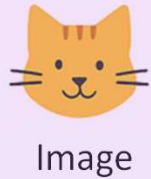
- Forte émergence depuis **2015-2016**
- S'appuie sur l'apprentissage profond (GAN, Transformers, LLM comme GPT)
- Capable de générer du contenu original : texte, images, vidéos, musique
- **Objectif** : créer de nouvelles données à partir de modèles appris

AI / Machine Learning / Neural Networks / Deep Learning ?

ENTREE

TRAITEMENT

SORTIE



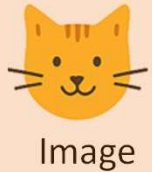
Règles définies par un humain
"Si l'image contient des moustaches + des oreilles pointues → c'est un chat."



Chat ou Pas chat



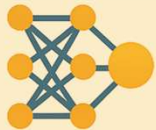
Machine Learning (ML)



1. Extraction manuelle des caractéristiques par un expert (forme, couleur, texture...)
2. Classification par un algorithme de ML (SVM, k-NN, arbre de décision...)



Chat ou Pas chat



Neural Network (NN)



Réseau de neurones profond (CNN) → extraction automatique des caractéristiques + classification en une seule étape



Chat ou Pas chat



IA générative

« Génère une image de chat »

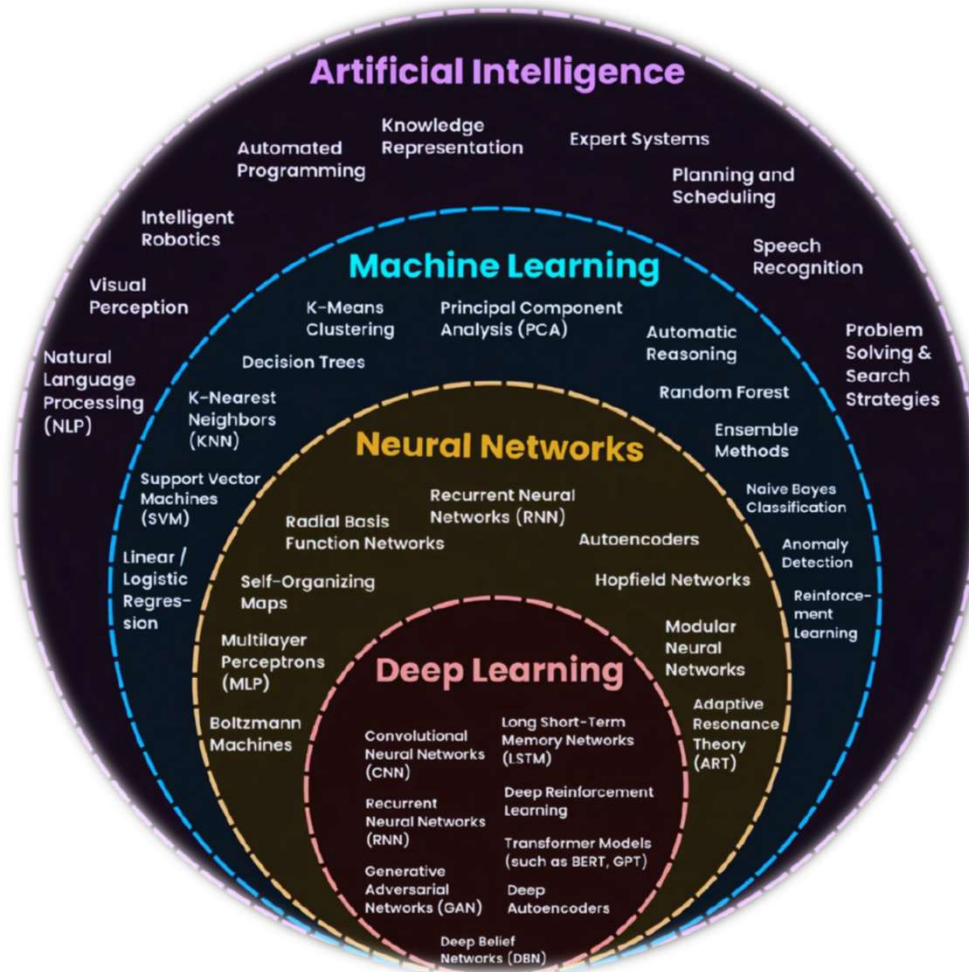


Modèle génératif (GAN, Transformer)



Nouvelle image de chat

AI / Machine Learning / Neural Networks / Deep Learning ?

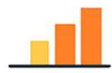


Plus on descend dans la hiérarchie, plus les techniques deviennent spécialisées et puissantes, capables de résoudre des tâches de plus en plus complexes.

IA et efficacité énergétique des bâtiments : que dit la littérature récente ?



80 études analysées (2014–2024)



Prédiction énergétique

Estimer la consommation future d'un bâtiment



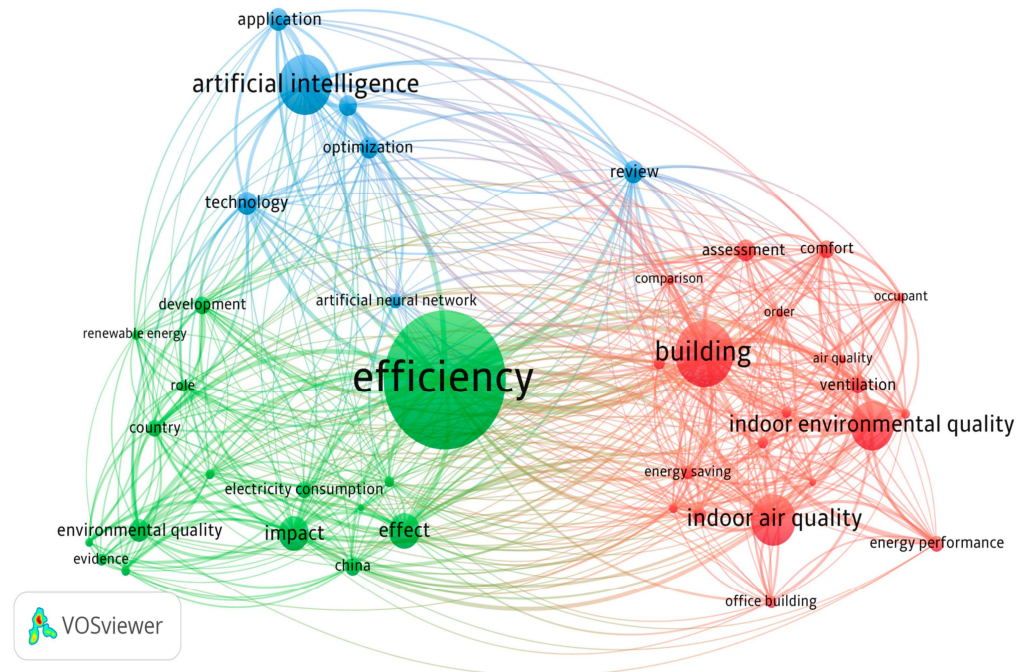
Confort thermique & qualité de l'air

Optimiser la température et l'air intérieur



Détection d'anomalies

Méthode IA	Fréquence d'usage
 Réseaux de neurones (ANN, LSTM)	Très fréquent
 Forêts aléatoires	Fréquent
 Machines à vecteurs de support (SVM)	Moyen
 Approches hybrides	En croissance



Visualisation en réseau des mots-clés par cluster

Source : VOSviewer – corpus de 80 publications scientifiques (2014–2024)

Peu d'études traitent de l'opérationnalisation directe sur bâtiments existants à données limitées

Objectifs de la méthodologie développée

Développer une méthodologie rapide et fiable pour:



Evaluer les besoins en chauffage



Trouver les meilleures solutions de rénovation et de gestion



Estimer les impacts énergétiques, économiques et environnementaux



Fournir un outil d'aide à la décision pour les gestionnaires de bâtiments tertiaire

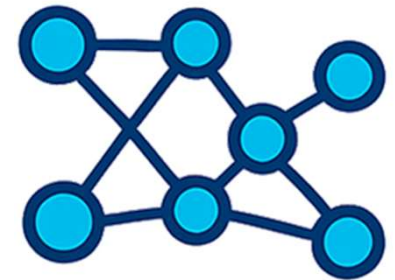
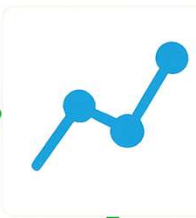
Avec très peu de données à disposition (factures, caractéristiques grossières du bâtiment,...)

Approche méthodologique



Base de données

Caractéristiques et consommations de bâtiments tertiaires



Métamodèle

Réseau de neurones multicouche entraîné à prédire les besoins énergétiques

Analyse de sensibilité

Identification des paramètres le plus influents sur les besoins énergétiques

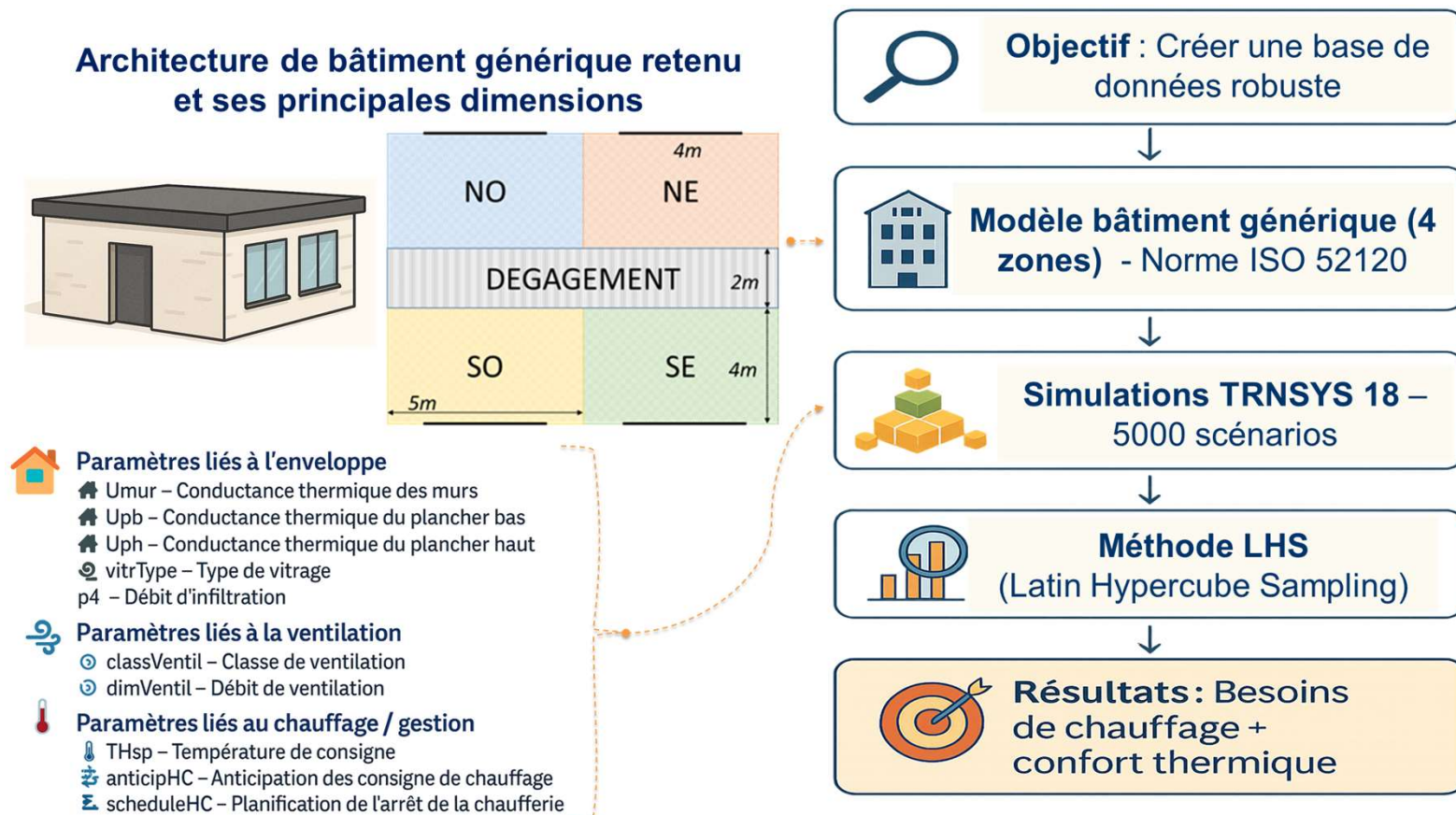


Trop complexe pour tester en réel ? Simulation de scénarii réalistes



TRNSYS18

Modélisation thermique et base de données



5000 scénarios générés pour explorer toutes les configurations possibles d'un bâtiment tertiaire.

Analyse de sensibilité

Identifier les paramètres d'entrée les plus influents sur les besoins de chauffage, afin de réduire la complexité et de cibler les leviers de décision.

Méthode de Sobol

- Premier ordre « S_i »
- Deuxième ordre « S_{ij} »
- Ordre total « S_{Ti} »



Classement des paramètres et leur influence



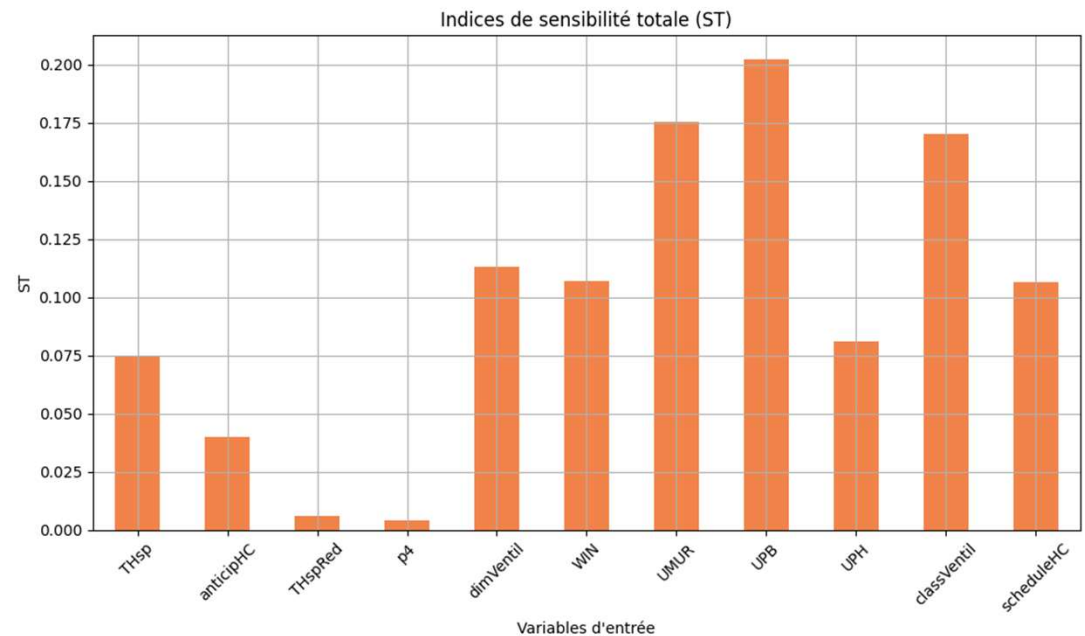
Meilleure interprétabilité du modèle



Réduction du nombre de variables pertinentes

Analyse de sensibilité

- **L'enveloppe thermique** (conductances des murs et du plancher) apparaît comme le principal levier d'optimisation, confirmant son rôle majeur dans les déperditions de chaleur.
- **Les paramètres de régulation active**, tels que le débit de ventilation, la température de consigne et la gestion des horaires, présentent également une **influence significative**, bien que souvent sous-estimée dans les approches classiques.

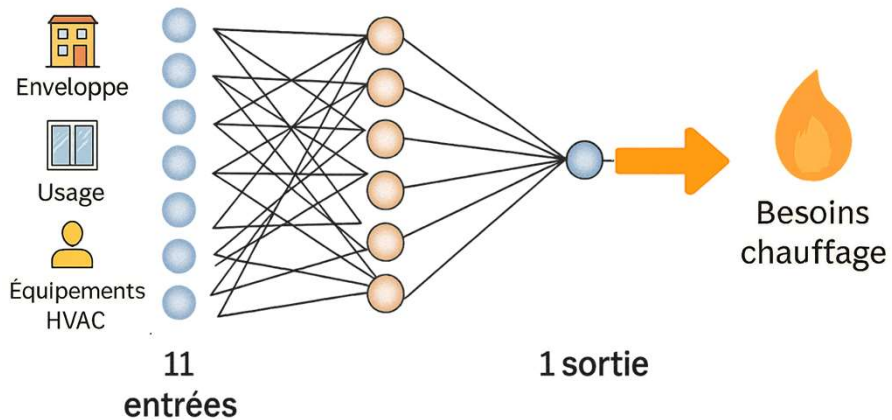


Indices de Sobol d'ordre total après analyse de sensibilité des données

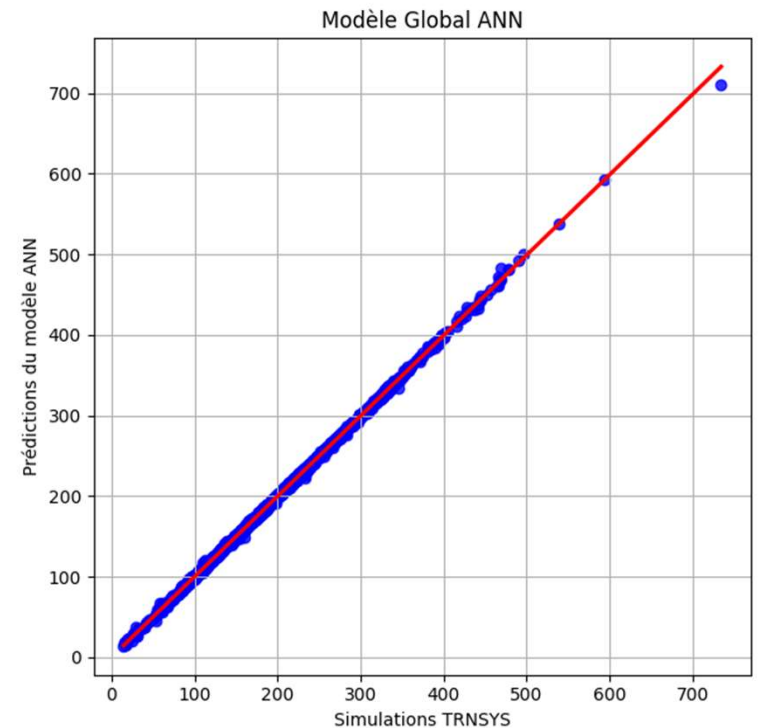
Ces résultats permettent de hiérarchiser les paramètres clés, de réduire la dimension du problème, et de focaliser les efforts sur les variables à fort impact dans une logique de décision multicritère.

Métamodèle IA : Réseau de neurones (ANN)

Architecture: Perceptron multicouche (MLP)



- ✓ Données normalisées (StandardScaler)
- ⚙️ Entraînement : algorithme Adam
- 📊 Fonction de perte : Erreur quadratique moyenne
- 📊 Répartition : 70% apprentissage / 30% test



- Erreur type (RMSE) : **1,93 kWh.m⁻²**
- Coefficient de détermination (R²) : **0,9995**

Exploitation du métamodèle IA pour la prise de décision

⚠ Bâtiment de référence (cas défavorable)

- Consigne 22 °C constante, sans interruption
- Pas de ventilation mécanique
- Parois très déperditives

→ Point de départ = scénario "le pire cas"

Optimisation IA

Scénarios optimisés

Proposer au gestionnaire des **combinaisons de solutions** pour :

- Réduire les besoins de chauffage
- Réduire les émissions de CO₂
- Réduire les coûts globaux (énergie + exploitation + investissement)

⚙ Métamodèle IA

- Modèle ANN = prédiction rapide
- Comparaison rapide :
 - ⌚ TRNSYS : 1 min/scénario
 - ⚡ ANN : millisecondes/scénario
- Utilisation de la méthode de Saltelli pour explorer efficacement l'espace des paramètres
- Analyse des effets combinés entre :
 - régulations,
 - travaux d'enveloppe,
 - investissements et coûts



Gain de temps
massif

Évaluation de milliers de
scénarios

Optimisation multicritère
→ rapide, fiable et accessible

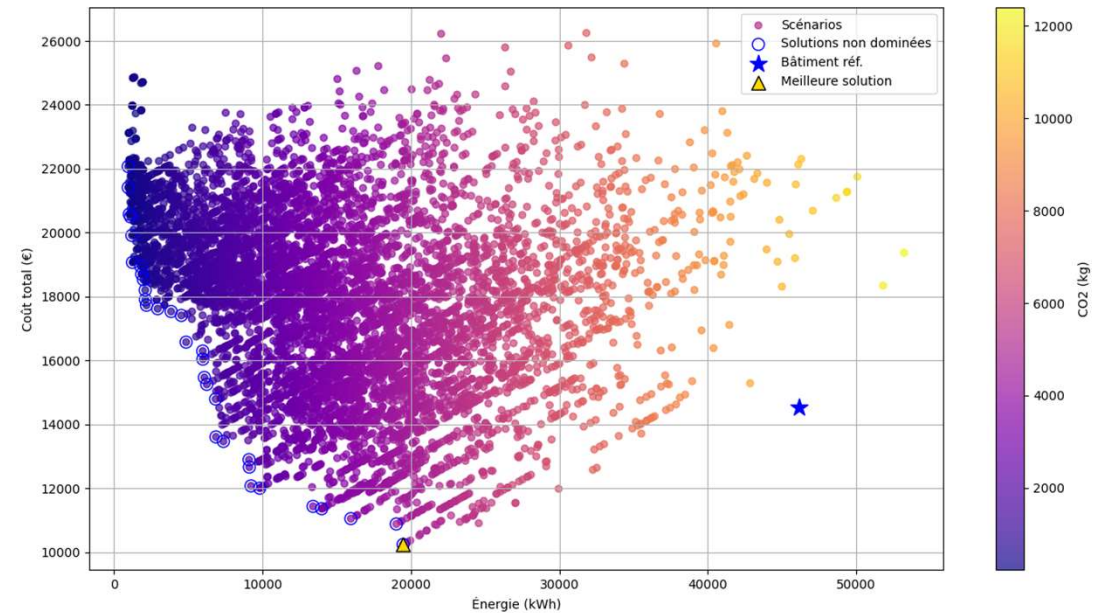


Métamodèle IA : Réseau de neurones (ANN)

Résultats estimés par différentes combinaisons de paramètres sur un bâtiment de bureau à Paris grâce au métamodèle

110 592 simulations effectuées

	Avant (Référence)	Après (Optimale)	Gain (%)
⚡			
€ Énergie (kWh)	46 361	20 586	-54 %
CO ₂ Coût total (€)	14 588	10 600	-27 %
CO ₂ (kg)	6 006	4 797	-20 %



Conclusions & perspectives



Une **méthodologie rapide et fiable** a été développée pour aider les gestionnaires tertiaires à :

- Identifier les **paramètres les plus influents**
- Choisir les **actions efficaces**

Comparaison rapide :

-  **TRNSYS :**
1 min/scénario
-  **Modèle développé :**
millisecondes/scénario



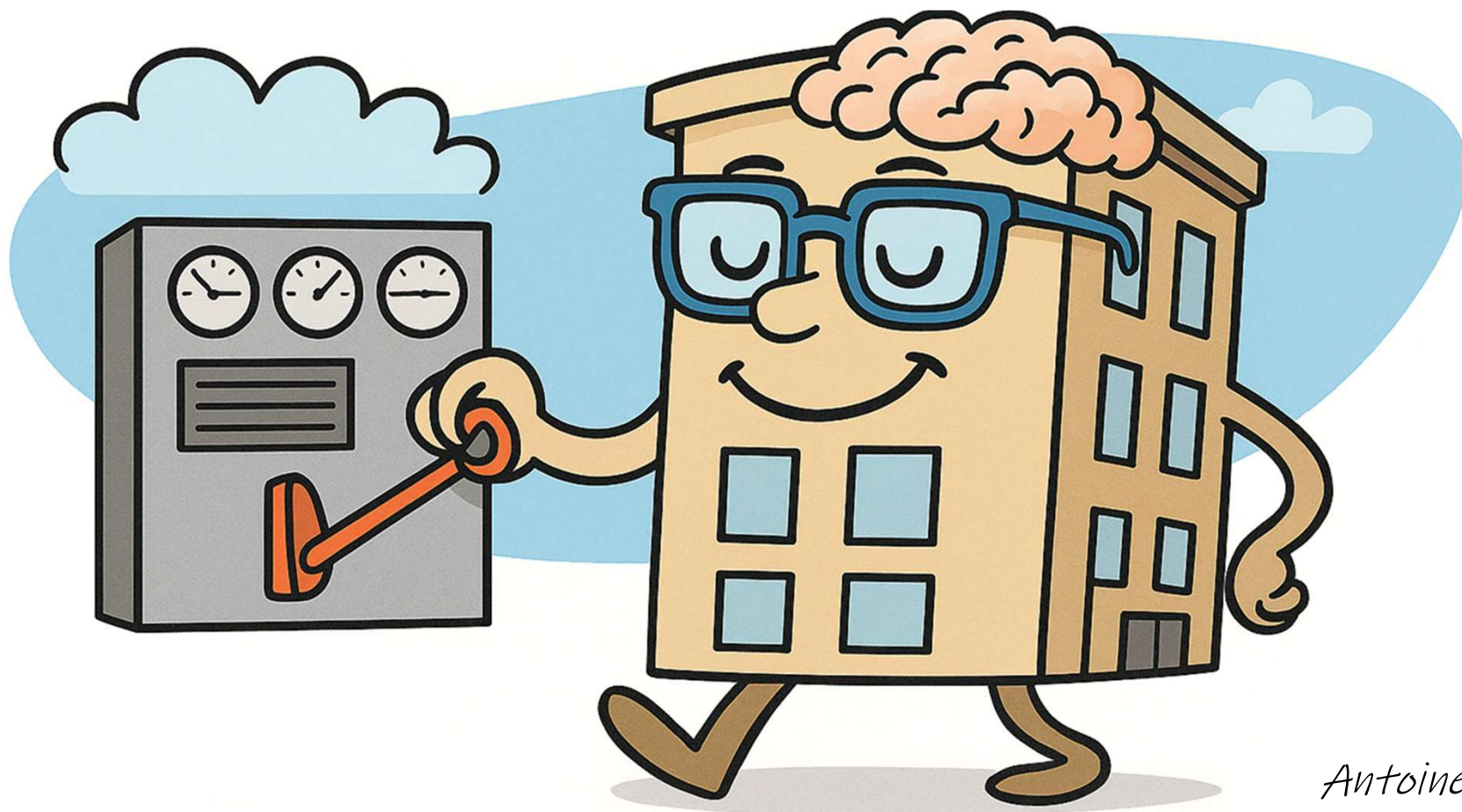
Limites actuelles

- Méthodologie validée avec données simulées TRNSYS
- À confronter à des données réelles (bâtiments instrumentés)
- Validation nécessaire sur autres modèles et sites



Perspectives

- Étendre à d'autres bâtiments tertiaires
- Ajouter d'autres critères : confort, QAI, inertie...
- Coupler à des bases de données géospatiales
- Déployer à grande échelle
- Intégration de données issues de capteurs low-cost



Antoine & Adhane

Et si un bâtiment pouvait apprendre à s'auto-réguler pour consommer moins ?

Et après demain ?

- Intégration de données issues de capteurs low-cost
- Intégration d'actionneurs communicants (vannes thermostatiques...)
- Caractérisation des bâtiments
- Prédictions énergie / confort / QAI

Déploiement et démonstration dans des maisons expérimentales

> Visite de la zone INCAS vendredi 06/06 à l'INES





Dr. Antoine LECONTE
Chef de projet R&D – Bâtiments et Systèmes
CEA LITEN
antoine.leconte@cea.fr
+33479792138



Dr. Adnane M'SAOURI EL BAT
Responsable R&D
Pando2
adnane@pando2.com
+33618720565

IA VS Machine Learning VS Neural Networks VS Deep Learning VS

Intelligence Artificielle (IA)

L'IA consiste à créer des systèmes capables d'effectuer des tâches nécessitant l'intelligence humaine, comme le raisonnement, l'apprentissage et la prise de décision. Elle regroupe diverses techniques permettant aux machines d'imiter les fonctions cognitives.

Apprentissage automatique (ML)

Sous-domaine de l'IA où les algorithmes apprennent à partir des données pour faire des prédictions ou des décisions. Ces modèles s'améliorent avec l'expérience, et sont utilisés notamment pour les systèmes de recommandation ou la reconnaissance d'images.

Réseaux de neurones (Neural Networks)

Modèles inspirés du cerveau humain, constitués de couches de "neurones" artificiels. Ils permettent de reconnaître des schémas complexes et sont à la base de nombreux systèmes modernes de traitement d'images, de texte ou de sons.

Apprentissage profond (Deep Learning)

Type d'apprentissage automatique utilisant des réseaux de neurones profonds (avec de nombreuses couches). Très performant pour des tâches complexes comme la reconnaissance vocale, la vision par ordinateur ou l'analyse de texte, en apprenant directement à partir de données brutes.

