

Hamdi Sami  
Licence 2 Sciences pour l'Ingénieur  
Université de Picardie Jules Verne (UPJV)  
Année universitaire 2025–2026

Projet d'initiative personnelle

## Vers un bâtiment intelligent

### Modélisation thermique et stratégies d'optimisation énergétique

Le rôle de l'ingénieur est de transformer la théorie en solutions concrètes.

En modélisant, en simulant et en analysant, il optimise les systèmes et en évalue l'impact réel.



# **1) De la réalité physique à la modélisation numérique :**

## **I) Contexte :**

### **Enjeu énergétique des bâtiments tertiaires dans la transition écologique**

Les bâtiments tertiaires représentent une part significative de la consommation énergétique nationale. En France, le secteur du bâtiment est responsable d'environ 40 % de la consommation d'énergie finale et d'une part importante des émissions de CO<sub>2</sub>. Dans un contexte de transition énergétique et de réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'optimisation énergétique des bâtiments constitue un levier stratégique majeur. Les bâtiments tertiaires, en particulier les immeubles de bureaux, présentent un fort potentiel d'amélioration grâce à une meilleure gestion thermique et à des stratégies de régulation intelligentes.

L'objectif de ce projet est de :

- Modéliser le comportement thermique simplifié d'un bâtiment tertiaire à l'aide d'un modèle RC basé sur les lois fondamentales de la thermodynamique.
- Estimer la consommation énergétique liée au chauffage en fonction des conditions climatiques réelles.
- Étudier l'impact de stratégies de réduction de consommation, notamment l'abaissement nocturne de la température intérieure.
- Évaluer les économies d'énergie et les gains financiers potentiels à court terme (5 jours) et à l'échelle annuelle.

Les données météorologiques utilisées pour la simulation proviennent de l'API Open-Météo, fournissant des températures horaires réelles.

Source :

<https://open-meteo.com/>

## **II) Modèle physique utilisé :**

**Le comportement thermique du bâtiment est modélisé par un modèle simplifié RC basé sur des lois physiques fondamentales.**

### **a) Lois utilisées :**

- Premier principe de la thermodynamique :  
La variation d'énergie stockée dans le bâtiment est égale aux pertes thermiques plus l'apport du chauffage.
- Loi de Fourier :  
Les pertes de chaleur sont proportionnelles à l'écart entre température intérieure et extérieure.

**b) Équation du modèle :**

$$C \frac{dT_{int}}{dt} = \frac{T_{ext} - T_{int}}{R} + P_{chauff}(t)$$

- Le membre gauche provient du bilan d'énergie (stockage thermique).
- Le premier terme à droite provient de la loi de Fourier (pertes).
- Le second terme représente la puissance du chauffage.

La simulation est réalisée heure par heure ( $\Delta t = 3600$  s).

**c) Justification des paramètres :**

Paramètre	Valeur	Unité
R (résistance)	0,0025	K/W
C (capacité thermique)	1,00E+08	J/K
$\Delta t$	3600	secondes
P_max chauffage	50000	Watt
Kp(régulation)	5000	W/K

**Résistance thermique :**

$R=0,0025$  K/W

Cela correspond à un coefficient global  $UA=1/R=400$   $UA = 1/R = 400$   $UA=1/R=400$  W/K.  
Le bâtiment perd donc environ 400 W par degré d'écart, soit 4000 W pour 10°C, ce qui est cohérent pour un plateau tertiaire.

Une valeur comme  $R = 6$  K/W donnerait des pertes quasi nulles, irréalistes.

**Capacité thermique :**

$C=10^8$  J/K

Représente l'inertie thermique d'un bâtiment en béton.  
Permet une évolution lente et réaliste de la température intérieure.

#### **Puissance maximale :**

$P_{max}=50\text{ kW}$

Valeur réaliste pour une zone tertiaire, limitant la puissance comme dans un système réel.

#### **Gain proportionnel :**

$K_p=5000\text{ W/K}$

Plus l'écart à la consigne est grand, plus la puissance augmente, jusqu'à saturation.

### **III) Scénario de référence :**

**Dans ce scénario de référence, le bâtiment est maintenu à une température constante de 20°C en continu (24h/24), sans variation horaire ni stratégie d'optimisation particulière.**

Ce choix correspond à un mode de fonctionnement standard dans lequel :

- Le confort thermique est prioritaire,
- Le chauffage compense en permanence les pertes vers l'extérieur,
- Aucune gestion n'est mise en œuvre.

L'objectif de ce scénario est de déterminer la consommation énergétique nécessaire pour garantir un confort constant dans des conditions climatiques réelles.

Les grandeurs étudiées — température intérieure, puissance de chauffage et énergie consommée — ne sont pas fixées arbitrairement. Elles sont entièrement issues de la simulation réalisée sous Excel. À partir des températures extérieures horaires et des paramètres physiques du modèle, le calcul est effectué heure par heure. Pour chaque pas de temps, la puissance de chauffage est déterminée en fonction de l'écart entre la consigne et la température intérieure, puis la température intérieure est mise à jour à l'aide de l'équation thermique discrétisée. L'énergie consommée est calculée à partir de la puissance horaire, et la consommation totale correspond à la somme des valeurs sur la période étudiée.

Ainsi, l'ensemble des résultats obtenus découle directement du modèle physique et des données météorologiques réelles.

### **2) Vers une gestion thermique intelligente :**

## I) Stratégie 1 : Abaissement nocturne

**Dans ce second scénario, une stratégie couramment utilisée dans les bâtiments tertiaires est mise en œuvre : l'abaissement nocturne de la température de consigne.**

La consigne thermique est définie comme suit :

- 20°C entre 8h et 19h (période d'occupation),
- 17°C la nuit (période d'inoccupation).

Cette approche reflète une gestion énergétique réaliste des immeubles de bureaux, où le maintien d'un confort maximal n'est nécessaire que pendant les heures d'activité.

### a) Principe physique :

L'abaissement nocturne repose sur l'exploitation de l'inertie thermique du bâtiment :

- La nuit, la température intérieure est autorisée à diminuer progressivement.
- Le chauffage fonctionne moins, car la consigne est plus basse.
- L'énergie stockée dans la structure (murs, planchers, béton) ralentit le refroidissement.
- Le bâtiment profite ainsi de sa capacité thermique pour limiter les pertes inutiles.

Cette stratégie permet de réduire les apports énergétiques sans compromettre le confort durant la journée.

### b) Mise en œuvre dans la simulation :

Sous Excel, seule la consigne T-set est modifiée en fonction de l'heure.

Le reste du modèle (équations physiques, paramètres, méthode de calcul) reste strictement identique au scénario de référence.

Cela permet d'isoler l'effet de la stratégie horaire sur la consommation énergétique

## II) Stratégie 2 : Optimisation prédictive (proposition)

**En complément de l'abaissement nocturne, une amélioration potentielle consiste à introduire une stratégie de chauffage prédictive.**

### a) Principe :

L'idée est d'utiliser la prévision météorologique à court terme pour anticiper les variations de température extérieure et adapter la puissance de chauffage en conséquence.

Contrairement à une régulation classique, qui réagit uniquement à l'écart instantané entre la température intérieure et la consigne, une stratégie prédictive anticipe les évolutions futures (par exemple une baisse de température annoncée) afin d'ajuster progressivement la puissance.

### **b) Logique physique :**

Cette approche repose sur deux éléments :

- Le bâtiment possède une inertie thermique importante.
- La température intérieure n'évolue pas instantanément.

En anticipant une baisse de température extérieure, le système peut :

- Chauffer légèrement en avance,
- Éviter un pic brutal de puissance,
- Lisser la demande énergétique.

Cette gestion plus progressive permet une meilleure exploitation de la capacité thermique du bâtiment.

### **c) Effets attendus :**

Les bénéfices théoriques d'une telle stratégie sont :

- Réduction des pics de puissance,
- Fonctionnement plus stable du système de chauffage,
- Optimisation temporelle des apports énergétiques,
- Réduction supplémentaire de la consommation.

### **d) Hypothèse retenue :**

Dans le cadre de ce projet, la stratégie prédictive n'a pas été implémentée directement dans la simulation Excel.

Son impact est estimé sur la base de résultats observés dans la littérature sur la gestion énergétique des bâtiments intelligents.

Les études montrent généralement un gain énergétique supplémentaire de l'ordre de 3 à 5 % après mise en place d'un contrôle prédictif simplifié.

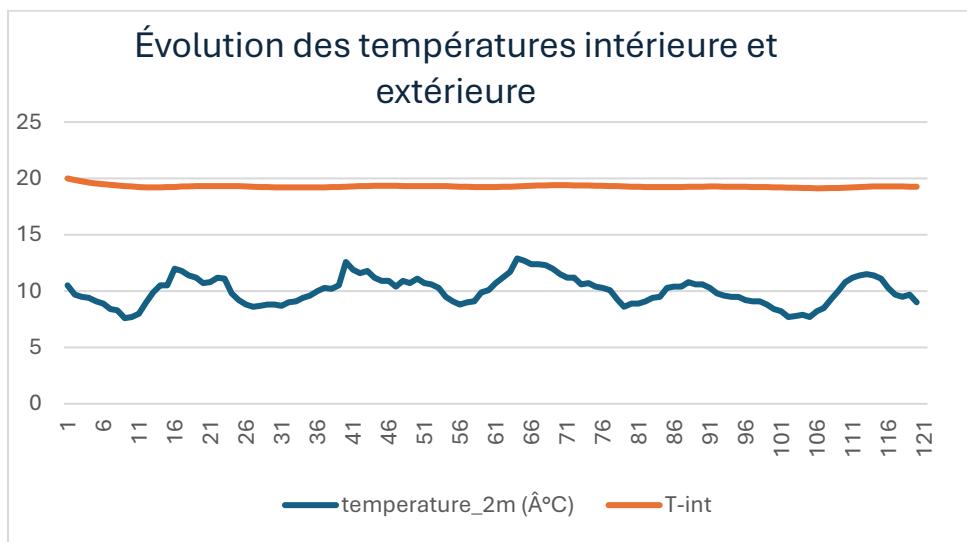
Dans cette étude, une hypothèse conservatrice de 4 % est retenue pour estimer l'impact potentiel de cette amélioration.

## 3)Interprétation des résultats et évaluation globale :

### I)Résultats graphiques :

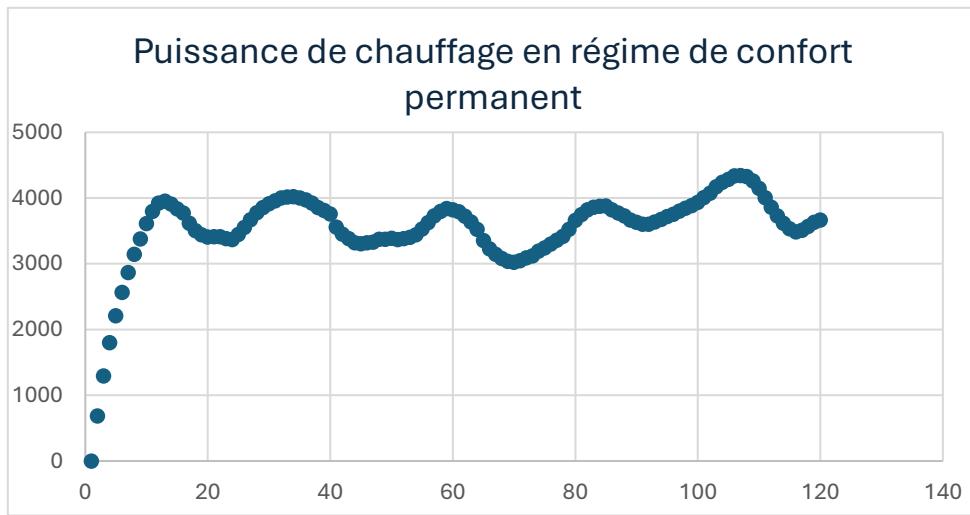
#### a) Scénario de référence :

Courbe T-ext vs T\_int



La température intérieure reste stable autour de 20°C malgré les variations de température extérieure (7–13°C). Cela montre que le système de chauffage compense en permanence les pertes thermiques. Le bâtiment fonctionne en mode confort constant, sans stratégie d'optimisation, ce qui constitue une référence pour l'analyse des scénarios suivants.

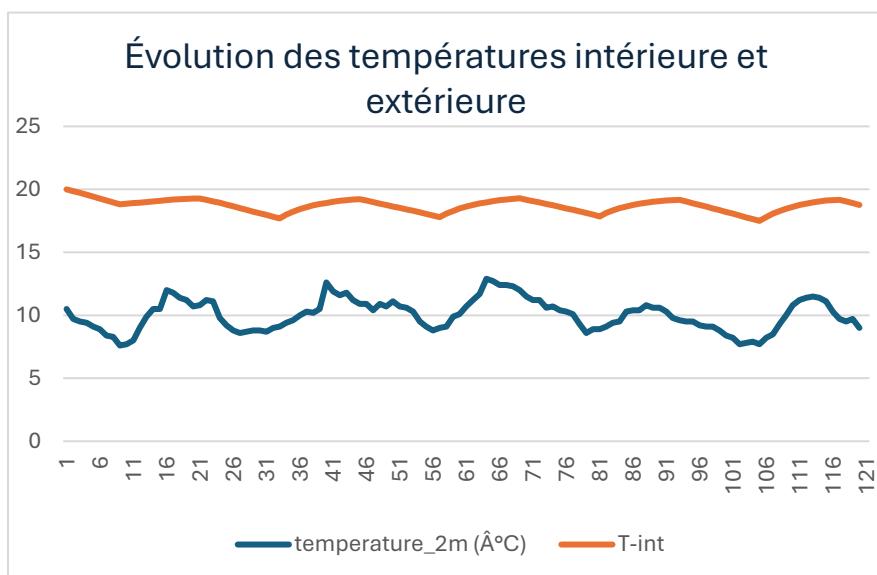
### Courbe puissance chauffage :



La puissance de chauffage augmente rapidement en phase initiale afin d'atteindre la température de consigne, puis se stabilise autour de 3 à 4,5 kW en régime permanent. Les variations observées suivent les fluctuations de température extérieure, traduisant un équilibre dynamique entre pertes thermiques et apport énergétique. L'absence de coupure prolongée du chauffage confirme que le bâtiment fonctionne en maintien constant de confort.

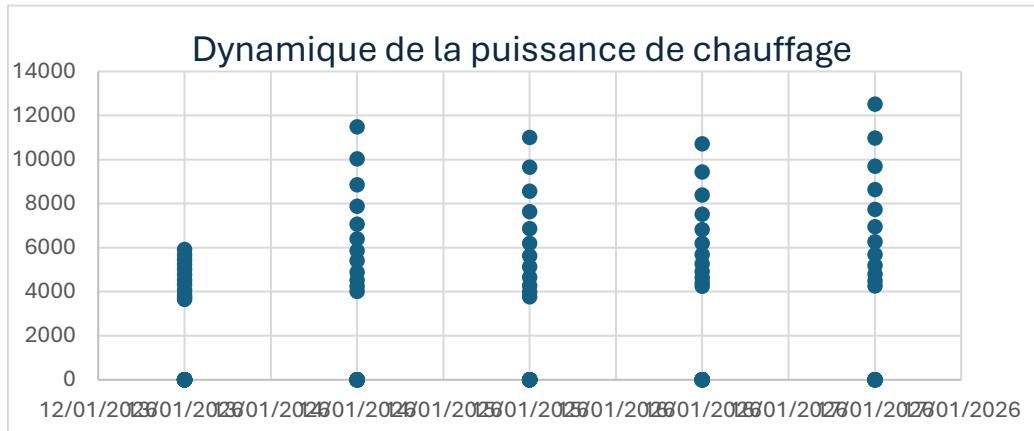
### b) Scénario Abaissement nocturne :

#### Courbe T\_ext vs T\_int :



Contrairement au scénario de référence, la température intérieure diminue progressivement durant la nuit en raison de l'abaissement de la consigne. La baisse reste modérée grâce à l'inertie thermique du bâtiment. En période diurne, la température est rétablie à 20°C, assurant le confort des occupants. Cette dynamique montre que le bâtiment peut réduire sa consommation sans compromettre le confort en journée.

#### Courbe puissance chauffage :



La puissance de chauffage présente des périodes d'arrêt complet durant la nuit, traduisant l'effet direct de l'abaissement de consigne. En début de journée, des pics de puissance apparaissent afin de rétablir la température à 20°C. Malgré ces pics ponctuels, la suppression des apports nocturnes permet une réduction globale de la consommation énergétique.

## II) Évaluation énergétique, économique et environnementale :

**Un programme complémentaire développé sous Python (Thonny) permet d'estimer l'impact global de cette stratégie sur :**

- L'énergie économisée sur 5 jours,
- La projection annuelle des gains,
- Les économies financières associées,
- La réduction estimée des émissions de CO<sub>2</sub>.

À partir de :

```
projet psl.py * ×
1 E_base = 1624.0324
2 gain_strategie1_percent = 2.7522753
3 gain_strategie2_percent = 4.0
4 prix_kwh = 0.25
5 facteur_co2 = 50
6 jours = 5
```

- La consommation du scénario de référence,
- La consommation après abaissement nocturne
- Et du pourcentage hypothétique de gain prédictif

### Le programme calcule :

```
8 # Stratégie 1
9 E_s1 = E_base * (1 - gain_strategie1_percent / 100)
10
11 # Stratégie 1 + Stratégie 2
12 E_s1_s2 = E_s1 * (1 - gain_strategie2_percent / 100)
13
14 # Energie économisée
15 energie_gagnée_5j = E_base - E_s1_s2
16
17 # Projection annuelle
18 energie_gagnée_an = energie_gagnée_5j * (365 / jours)
19
20 # Economie financière
21 argent_gagné_5j = energie_gagnée_5j * prix_kwh
22 argent_gagné_an = energie_gagnée_an * prix_kwh
23
24 # CO2 évité (conversion g -> kg)
25 co2_evité_5j = (energie_gagnée_5j * facteur_co2) / 1000
26 co2_evité_an = (energie_gagnée_an * facteur_co2) / 1000
27
```

- Le gain énergétique total (kWh),
- L'économie financière correspondante (en €),
- La réduction d'émissions de CO<sub>2</sub> en utilisant un facteur d'émission moyen du mix électrique.

### La réduction d'émissions est estimée par :

$$\text{CO}_2 \text{ évité} = \text{Énergie économisée} \times \text{facteur d'émission}$$

Cette approche permet de relier directement l'optimisation thermique à son impact économique et environnemental.

```

28 print("===== RESULTATS =====\n")
29
30
31 print("Energie économisée sur 5 jours :", round(energie_gagnée_5j, 2), "kWh")
32 print("Energie économisée sur 1 an :", round(energie_gagnée_an, 2), "kWh\n")
33
34 print("Argent économisé sur 5 jours :", round(argent_gagné_5j, 2), "€")
35 print("Argent économisé sur 1 an :", round(argent_gagné_an, 2), "€\n")
36
37 print("CO2 évité sur 5 jours :", round(co2_evité_5j, 2), "kg")
38 print("CO2 évité sur 1 an :", round(co2_evité_an, 2), "kg")

```

### III) Conclusion :

```

>>> %Run 'projet psl.py'
===== RESULTATS =====

Energie économisée sur 5 jours : 107.87 kWh
Energie économisée sur 1 an : 7874.6 kWh

Argent économisé sur 5 jours : 26.97 €
Argent économisé sur 1 an : 1968.65 €

CO2 évité sur 5 jours : 5.39 kg
CO2 évité sur 1 an : 393.73 kg

```

>>>

Ce projet a permis de mettre en œuvre une démarche complète d'ingénierie, allant de la modélisation thermique d'un bâtiment tertiaire à l'évaluation concrète de stratégies d'optimisation énergétique.

À partir d'un modèle RC fondé sur les lois de la thermodynamique et alimenté par des données météorologiques réelles, le comportement thermique du bâtiment a pu être simulé et analysé. Cette approche a permis d'évaluer l'impact de différentes stratégies de gestion du chauffage sur la consommation énergétique.

L'abaissement nocturne, associé à une hypothèse conservatrice d'optimisation prédictive de 4 %, conduit à des gains significatifs. Sur une période de 5 jours, l'économie d'énergie atteint 107,87 kWh, soit une projection annuelle d'environ 7 874,6 kWh.

Cela représente une économie financière estimée à 1 968,65 € par an, ainsi qu'une réduction d'environ 393,73 kg de CO<sub>2</sub> par an.

Ces résultats démontrent qu'une gestion thermique plus intelligente, même basée sur un modèle simplifié, peut produire un impact mesurable à la fois énergétique, économique et environnemental.

Ce travail illustre ainsi pleinement le rôle de l'ingénieur : transformer des principes physiques en outils numériques, concevoir des solutions pertinentes et en quantifier rigoureusement les effets dans une perspective de transition vers des bâtiments plus performants et plus durables