

# Optimisation de l'isolation thermique par matériaux à changement de phase

N° d'inscription : 50654





Objectifs

Le MCP

Conception de  
l'isolant

Mesures

Simulation

Conclusion

## INTRODUCTION

### Introduction – Contexte énergétique



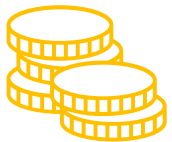
43% →

**Énergie  
bâtiment**



66% →

**Chauffage/climatisation  
logement**



+ 137% →

**Augmentation du prix  
du kilowattheure depuis  
2007**

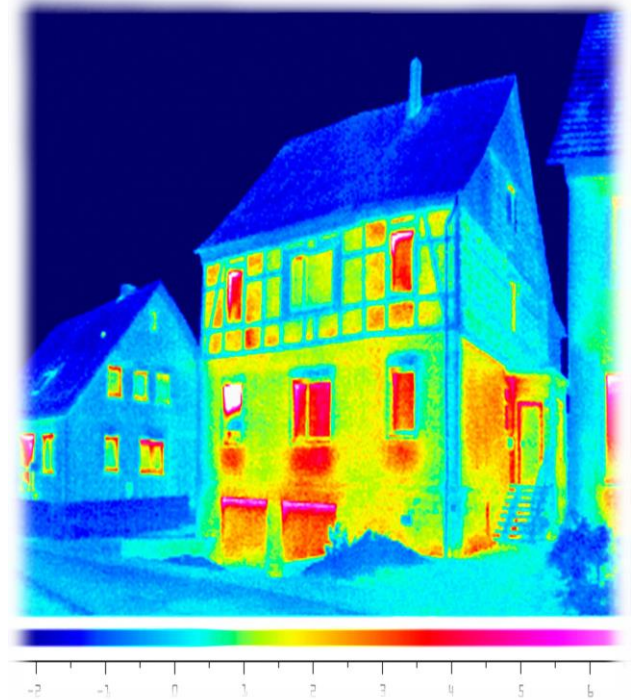


Image extraite du site Archi-Vision ([archi-vision.ch](http://archi-vision.ch))



Objectifs

Le MCP

Conception de  
l'isolant

Mesures

Simulation

Conclusion

## INTRODUCTION

### Introduction – *Isolant classique*

**LAINÉ  
DE VERRE**



$$R_{th} = 1,14 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Déphasage (4 cm) : 9 min

**LAINÉ  
DE BOIS**



$$R_{th} = 1 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Déphasage (4 cm) : 29 min



Objectifs

Le MCP

Conception de  
l'isolant

Mesures

Simulation

Conclusion

## INTRODUCTION

### Introduction – *Isolant classique*

**LAINE  
DE VERRE**



$$R_{th} = 1,14 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Déphasage (4 cm) : 9 min

**LAINE  
DE BOIS**



$$R_{th} = 1 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Déphasage (4 cm) : 29 min



**Coût de  
l'énergie**



**Réchauffement  
climatique**

**Optimisation du déphasage + stratégique**

Pour lisser les pics de température et éviter la climatisation



Objectifs

Le MCP

Conception de  
l'isolant

Mesures

Simulation

Conclusion

## INTRODUCTION

### Introduction – *Isolant classique*

#### LAINE DE VERRE



$$R_{th} = 1,14 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Déphasage (4 cm) : 9 min

#### LAINE DE BOIS



$$R_{th} = 1 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Déphasage (4 cm) : 29 min



Coût de  
l'énergie

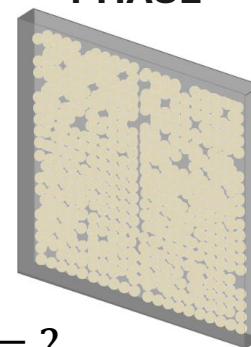


Réchauffement  
climatique

**Optimisation du déphasage + stratégique**

### TIPE

#### MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE



$$R_{th} = ?$$

Déphasage (4 cm) : ?

Pour lisser les pics de température et éviter la climatisation

# **LES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASES**





Objectifs

Le MCP

Conception de  
l'isolant

Mesures

Simulation

Conclusion

## INTRODUCTION

UBOIRUS

# Introduction – *Les matériaux à changement de phase (MCP)*

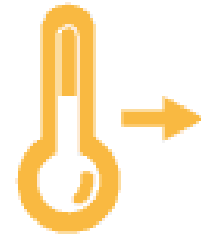
## Accumulation d'énergie



**La température augmente**



Le MCP fond



**La température se stabilise**



Objectifs



Le MCP



Conception de  
l'isolant



Mesures



Simulation



Conclusion

**INTRODUCTION**

## Introduction – *Les matériaux à changement de phase (MCP)*

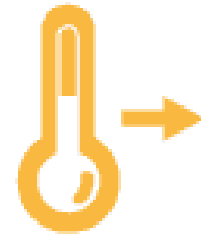
### Accumulation d'énergie



La température augmente

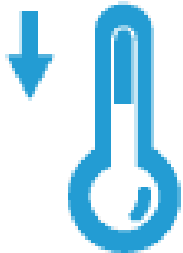


Le MCP fond

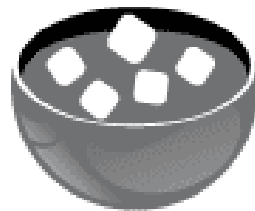


La température se stabilise

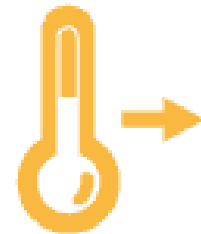
### Restitution d'énergie



La température diminue

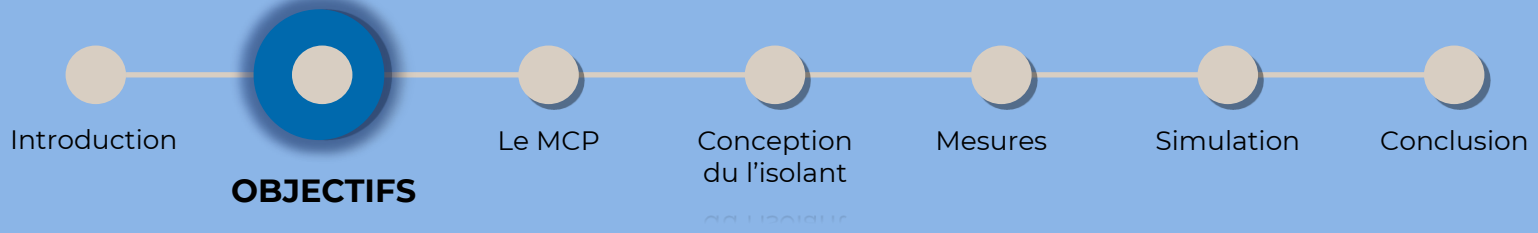


Le MCP se solidifie



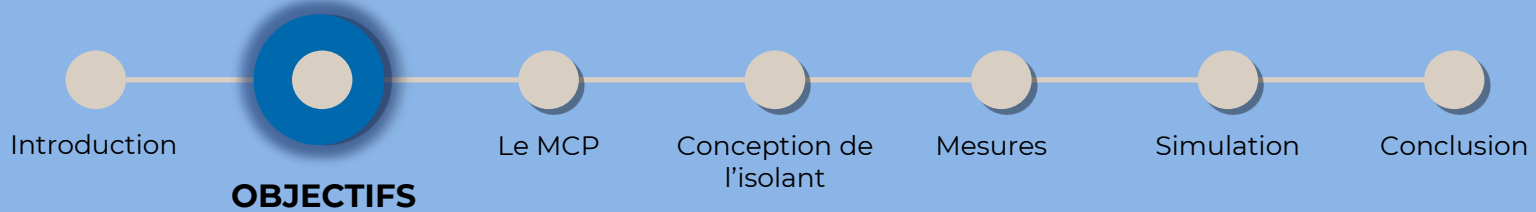
La température se stabilise





## **Objectifs – *Problématique et plan de la présentation***

**Comment les matériaux à changement de phase peuvent-ils améliorer l'isolation et le confort dans un contexte de transition énergétique ?**



## Objectifs – *Problématique et plan de la présentation*

**Comment les matériaux à changement de phase peuvent-ils améliorer l'isolation et le confort dans un contexte de transition énergétique ?**

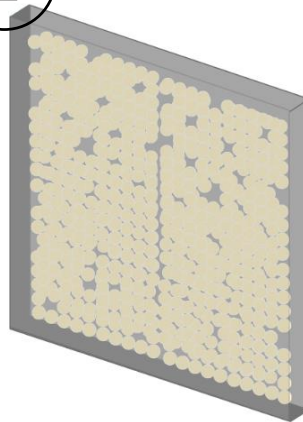
**Plan :**

1



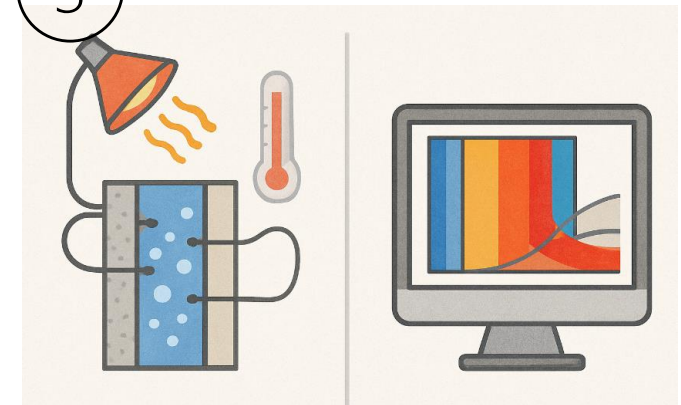
**LE MCP**

2



**Isolant MCP**

3



**Caractérisation  
expérimentale et  
numérique de l'isolant**

# **NOTRE MATERIAU A CHANGEMENT DE PHASE**



Introduction

Objectifs

**LE MCP**

Conception de  
l'isolant

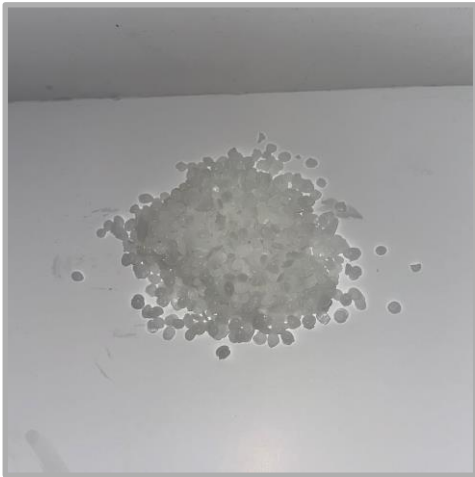
Mesures

Modélisation

Conclusion

## Le MCP – *Choix du matériau*

*Température de changement  
d'état : 60 °C*



+

=

**Paraffine**

Introduction

Objectifs

**LE MCP**

Conception de  
l'isolant

Mesures

Modélisation

Conclusion

## Le MCP – Choix du matériau

Température de changement  
d'état : 60 °C



**Paraffine**

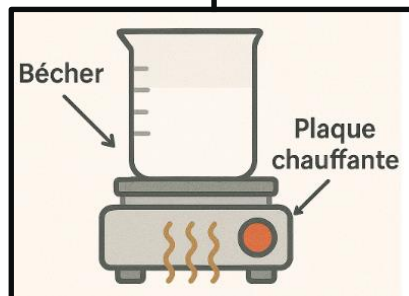
+

**Le % huile influence la  
température de fusion**



**Huile de Colza  
Vierge**

=



Introduction

Objectifs

**LE MCP**

Conception de  
l'isolant

Mesures

Modélisation

Conclusion

## Le MCP – Choix du matériau

Température de changement  
d'état : 60 °C



**Paraffine**

+

**Le % huile influence la  
température de fusion**

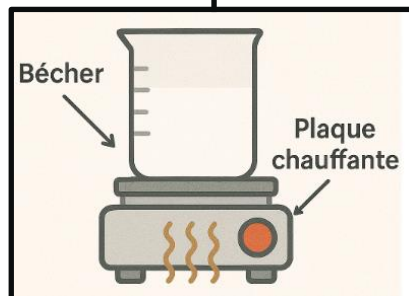


**Huile de Colza  
Vierge**

=



**Le mélange**



Introduction

Objectifs

**LE MCP**

Conception de  
l'isolant

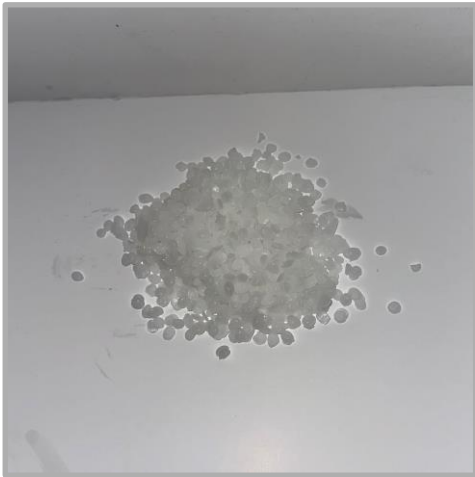
Mesures

Modélisation

Conclusion

## Le MCP – Choix du matériau

*Température de changement  
d'état : 60 °C*



**Paraffine**

+

***Le % huile influence la  
température de fusion***



**Huile de Colza  
Vierge**

=



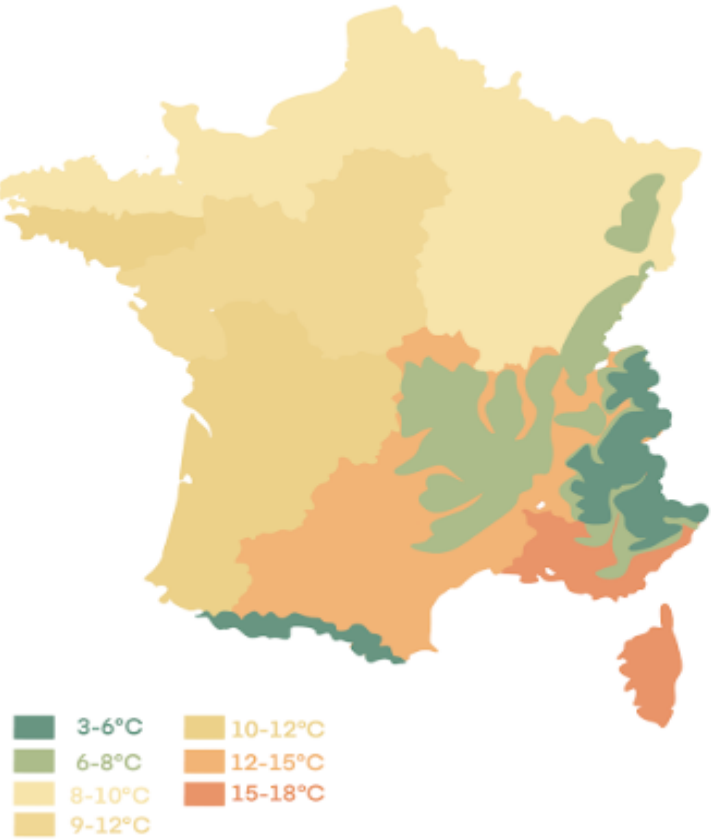
**Le mélange**

**Quelle doit être la  
température de  
changement d'état ?**

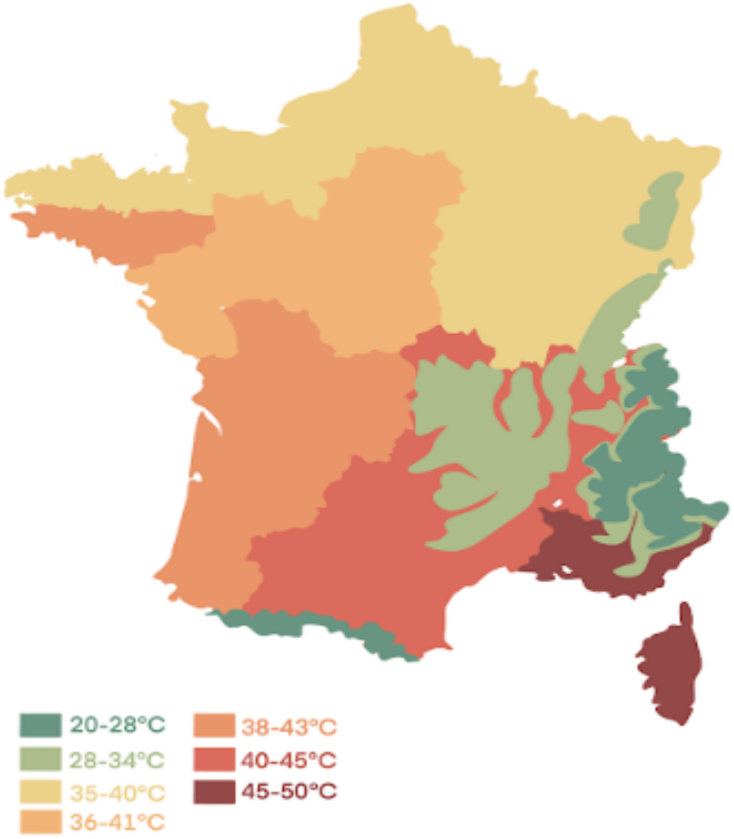


# Le MCP – *Température de changement d'état*

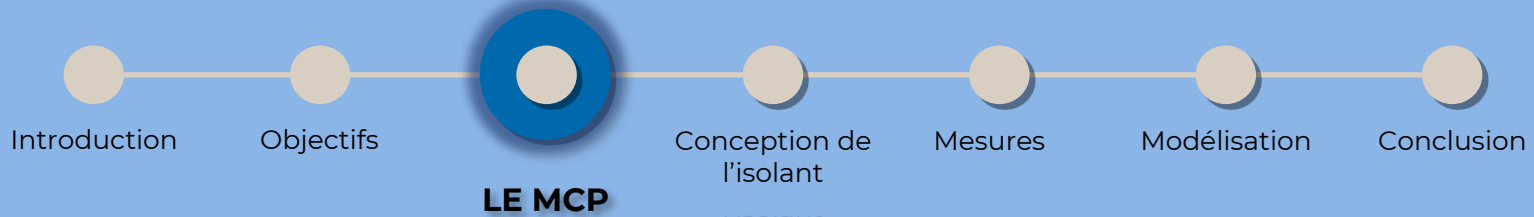
Température murale en hiver en plein soleil



Température murale en été en plein soleil



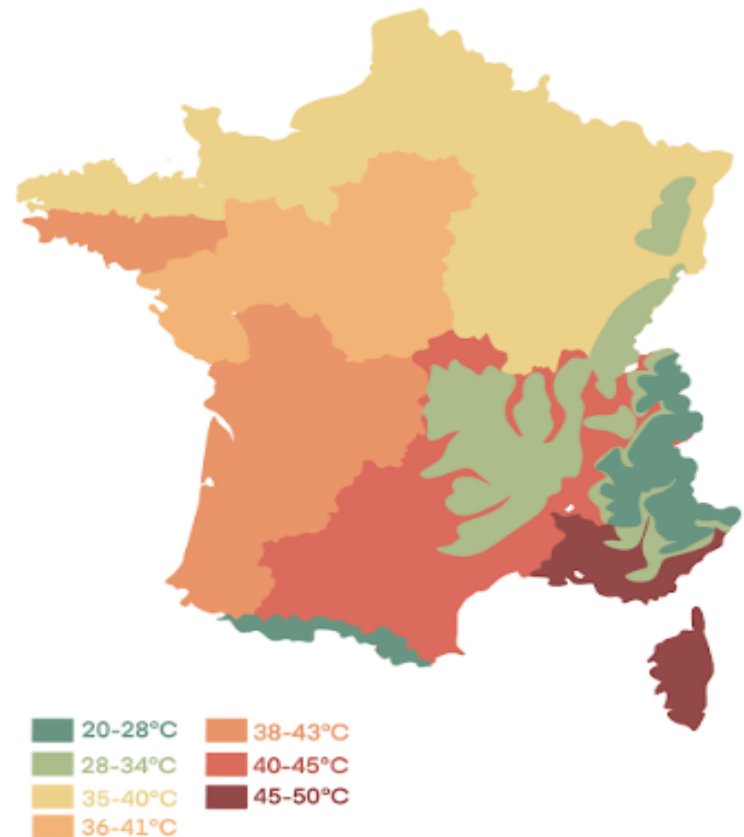




## Le MCP – *Température de changement d'état*

Température murale en été en plein soleil

Objectif de  
changement d'état:  
**~ 35°C**



Quelle proportion d'huile et de paraffine  
doit contenir notre mélange ?

Introduction

Objectifs

**LE MCP**

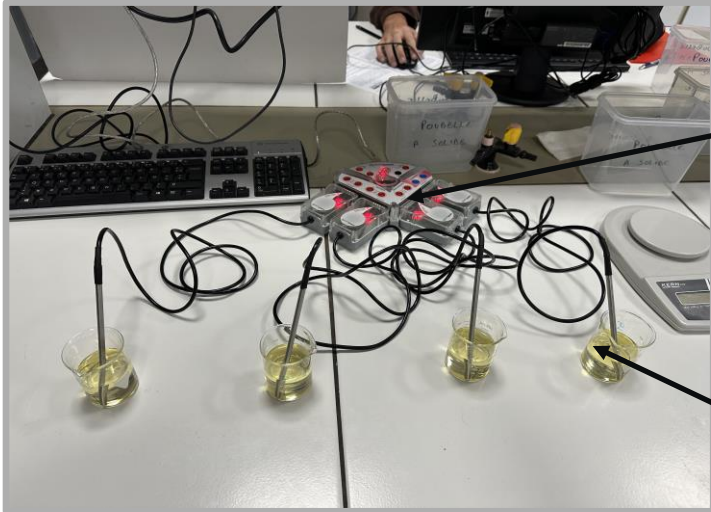
Conception de  
l'isolant

Mesures

Modélisation

Conclusion

## Le MCP – *Température de changement d'état, les expériences*



**Expérience 1**

**Thermocouple**

**Bécher avec  
différent  
mélange**

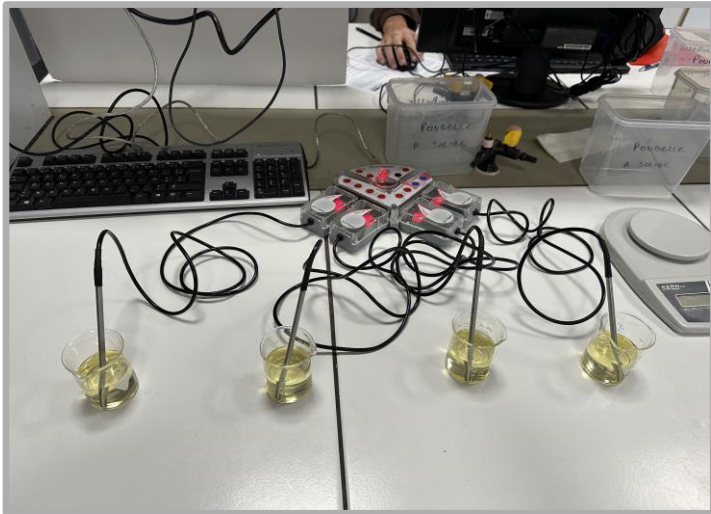
Thermocouple Type K  
Incertitude :  $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$



**Transmetteur  
thermocouple  
EuroSmart**



## Le MCP – *Température de changement d'état, les expériences*



### Expérience 1

- **Changement d'état trop lent**

Introduction

Objectifs

**LE MCP**

Conception de  
l'isolant

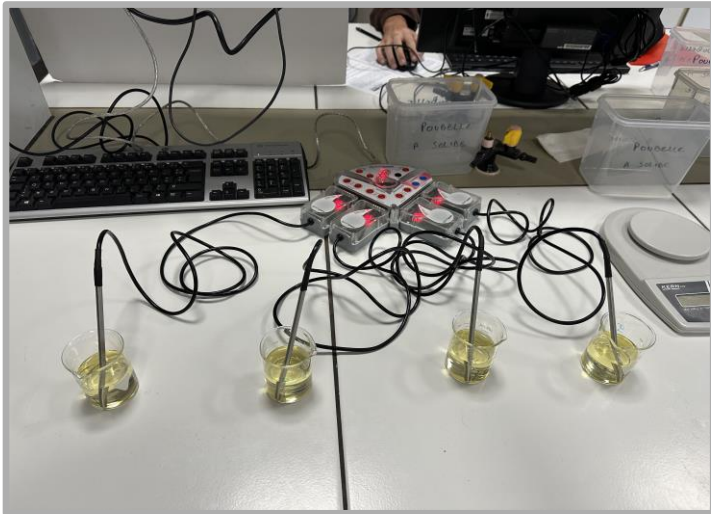
Mesures

Modélisation

Conclusion

UNIVERSITÉ

## Le MCP – *Température de changement d'état, les expériences*



**Expérience 1**

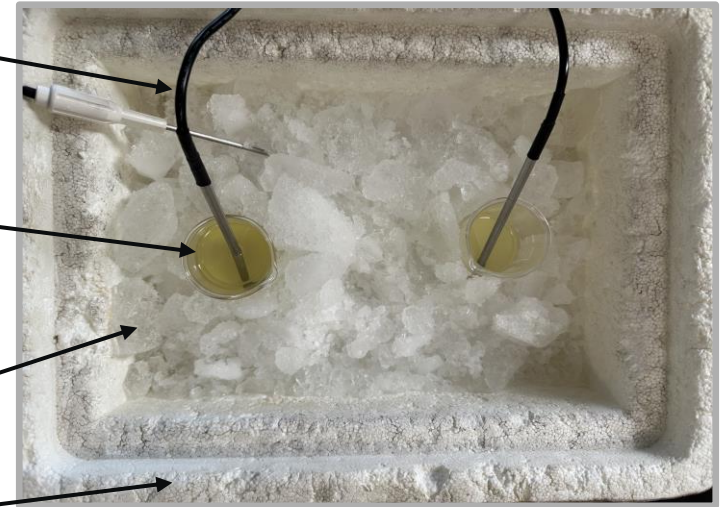
**- Changement d'état  
trop lent**

**Thermocouple**

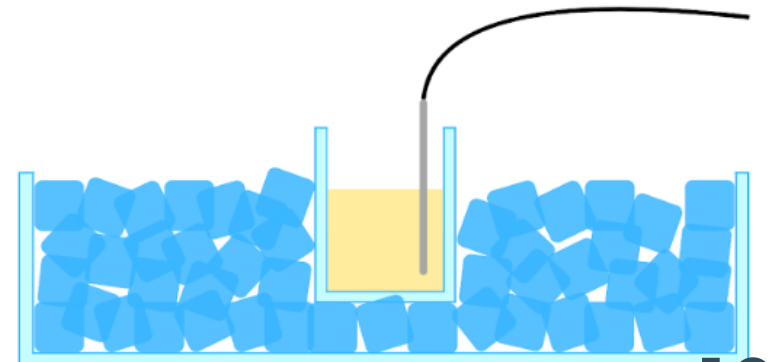
**Bécher avec  
le mélange**

**Surfusion de  
glace**

**Bac de  
polystyrène**



**Expérience 2**



**Schéma  
expérience 2**

Introduction

Objectifs

**LE MCP**

Conception de  
l'isolant

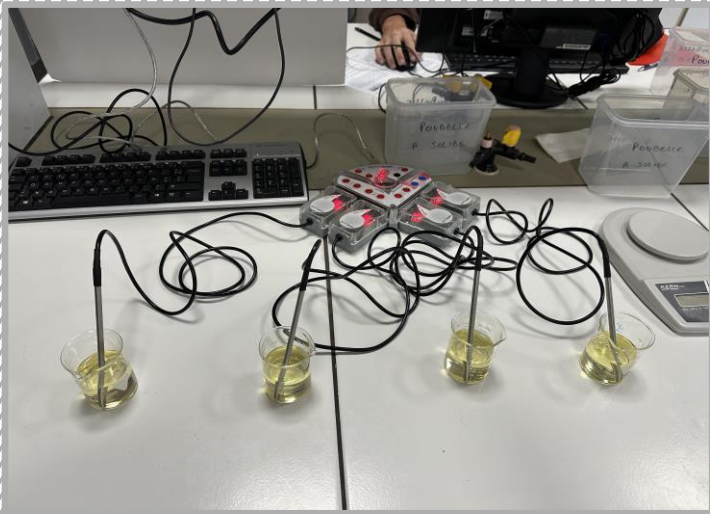
Mesures

Modélisation

Conclusion

UNIVERSITÉ

## Le MCP – *Température de changement d'état, les expériences*



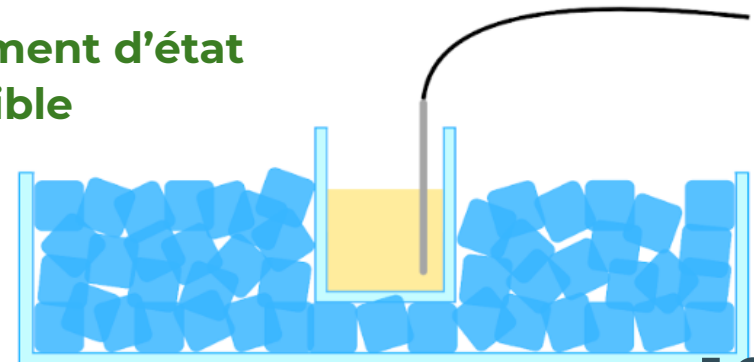
**Expérience 1**

**- Changement d'état  
trop lent**



**Expérience 3**

**+ Changement d'état  
visible**

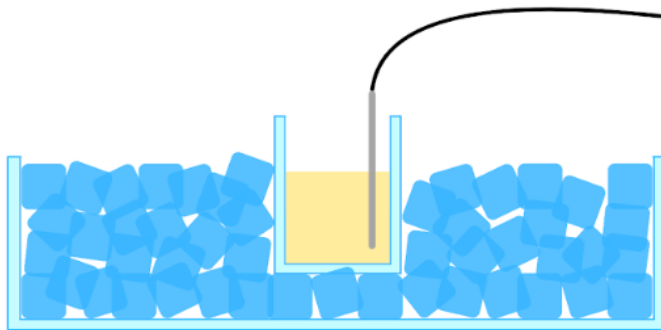


**Schéma  
expérience 3**

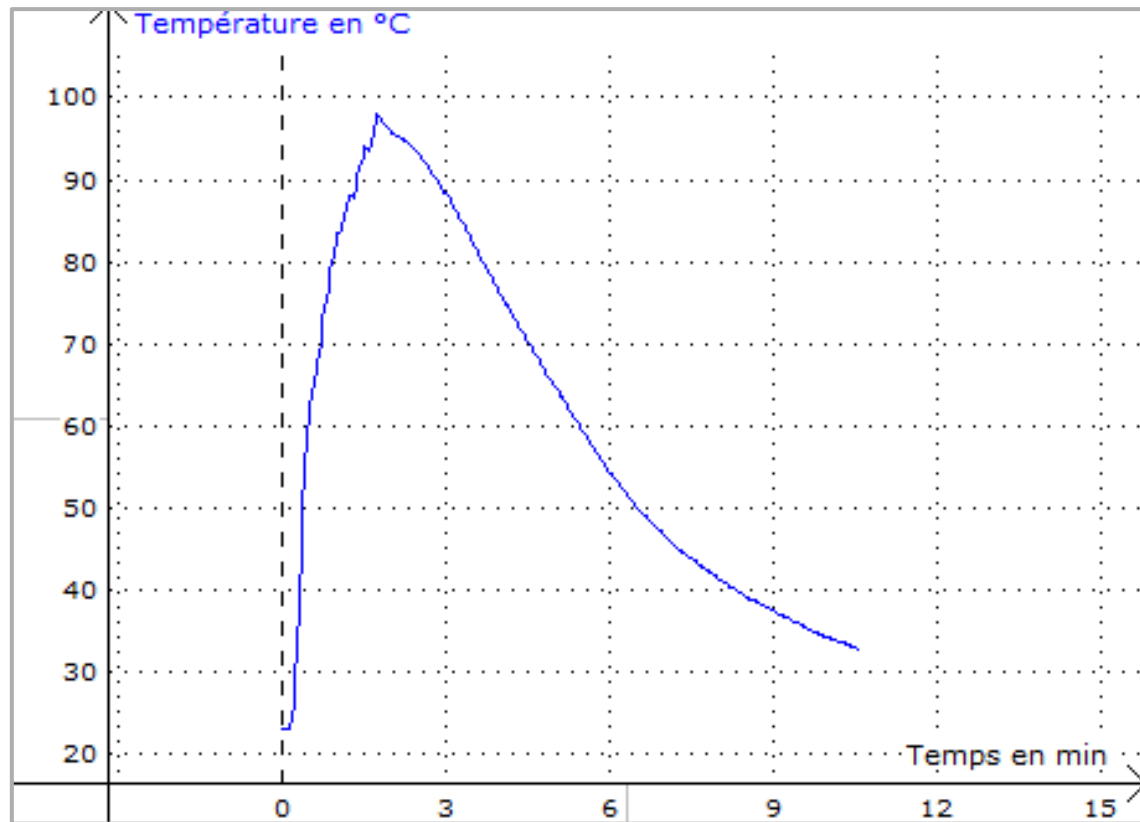


## Le MCP – *Température de changement d'état, les résultats*

**Mélange 30% d'huile / 70% paraffine**

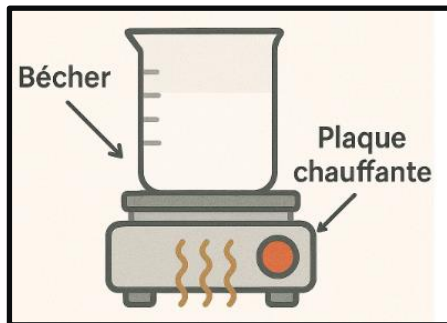


**Schéma  
expérience 3**

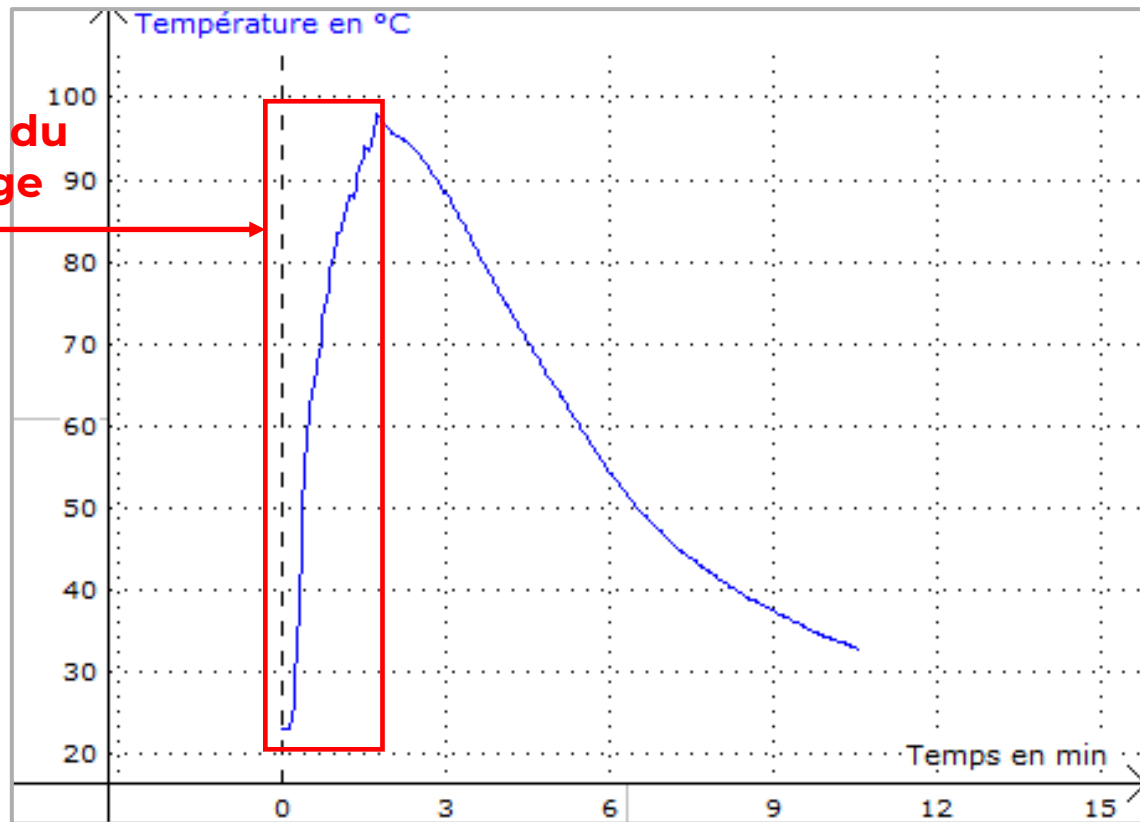


## Le MCP – *Température de changement d'état, les résultats*

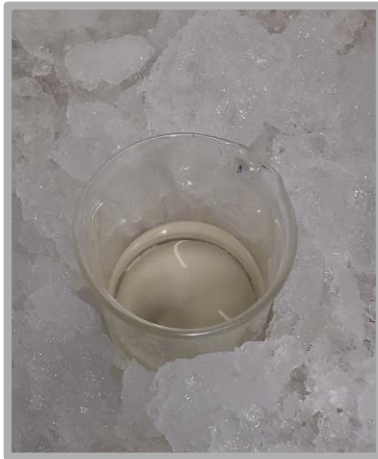
Mélange 30% d'huile / 70% paraffine



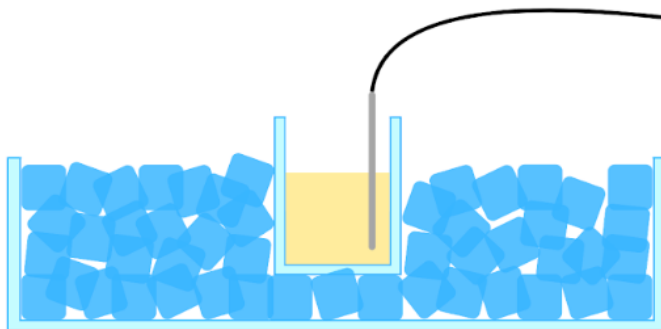
**Chauffe du mélange**



## Le MCP – *Température de changement d'état, les résultats*

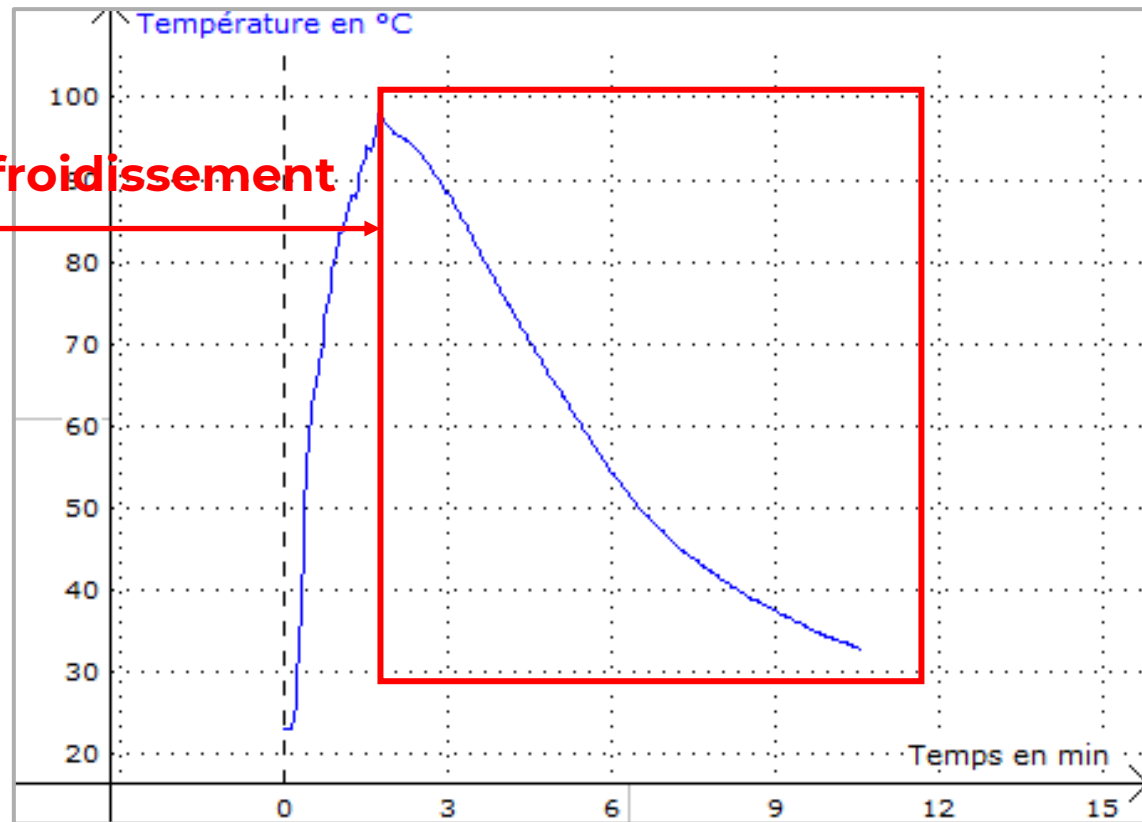


**Refroidissement**

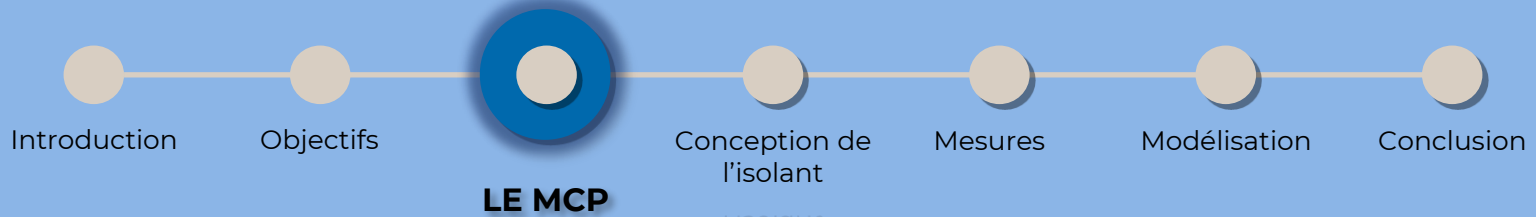


**Schéma  
expérience 3**

**Mélange 30% d'huile / 70% paraffine**



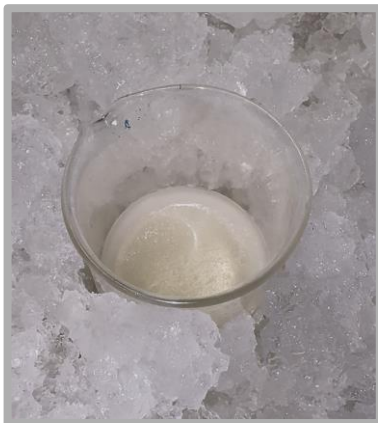




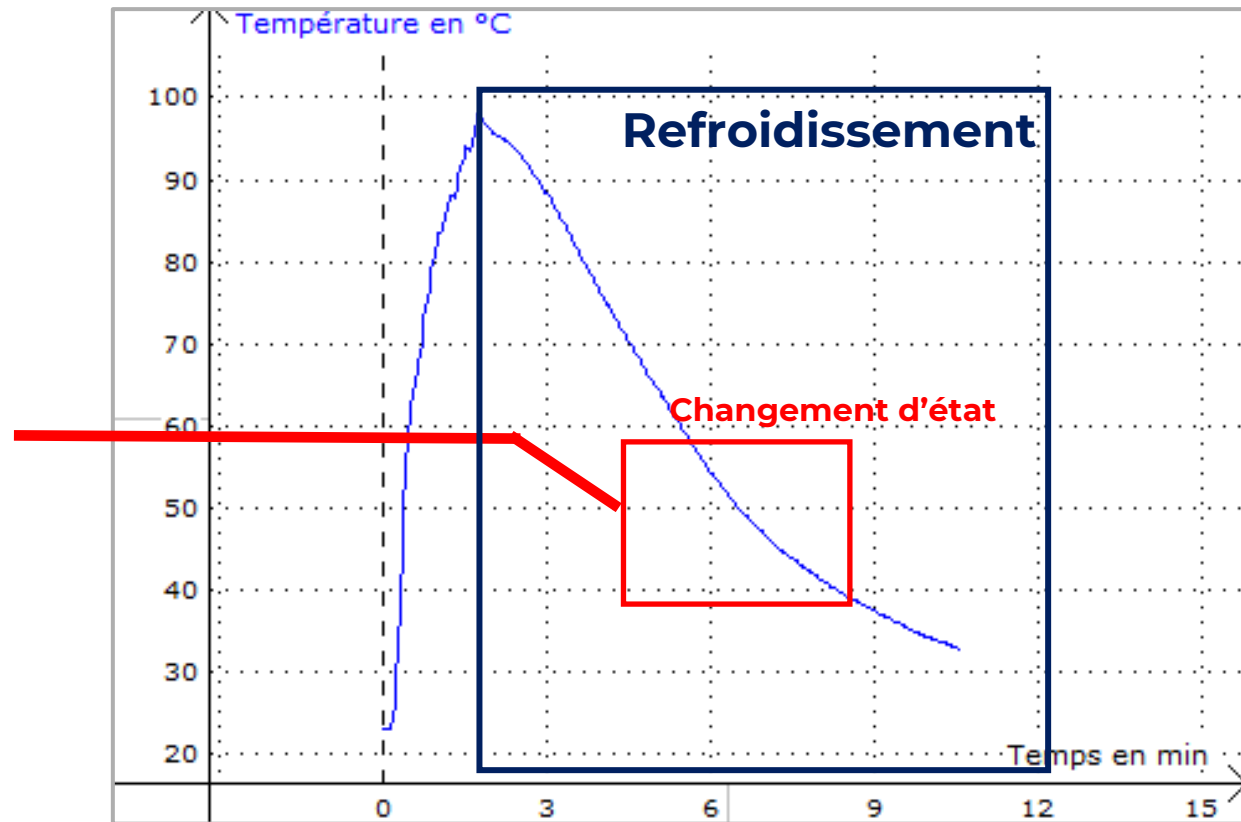
## Le MCP – *Température de changement d'état, les résultats*



Changement d'état



Mélange 30% d'huile / 70% paraffine



Introduction

Objectifs

**LE MCP**

Conception  
du mur

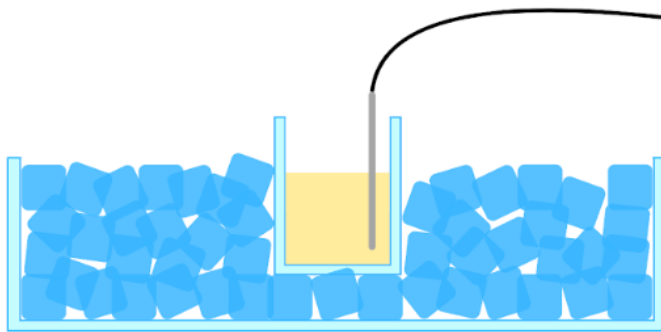
Mesures

Modélisation

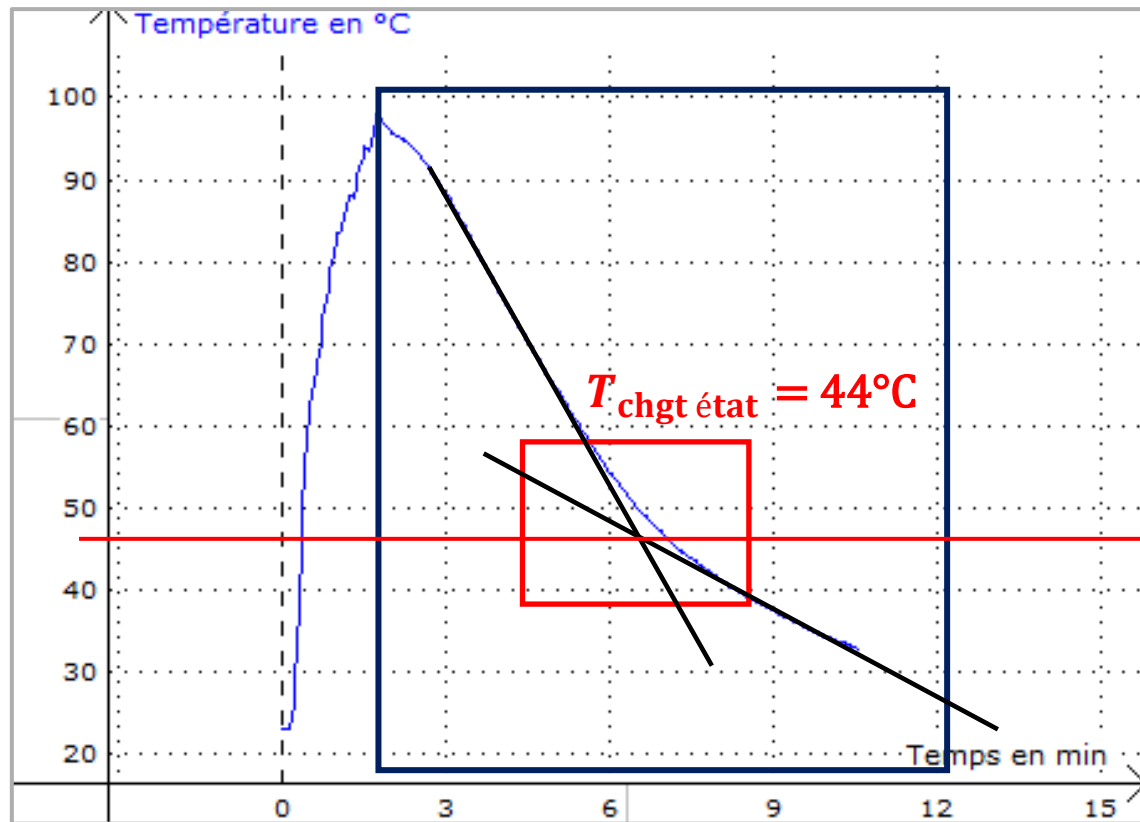
Conclusion

## Le MCP – *Température de changement d'état, les résultats*

Mélange 30% d'huile / 70% paraffine

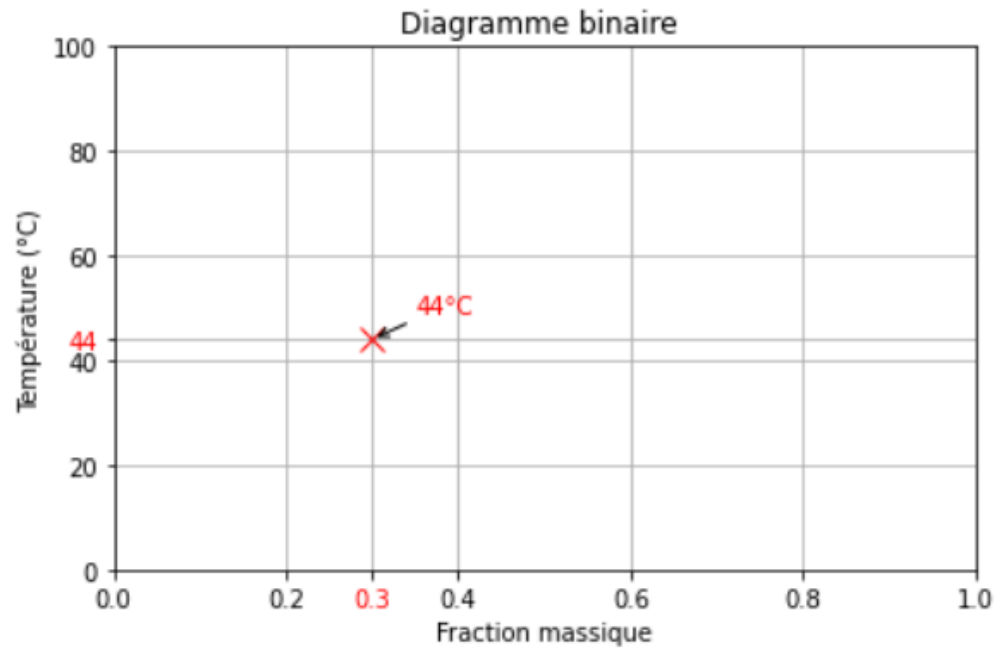


**Schéma  
expérience 3**



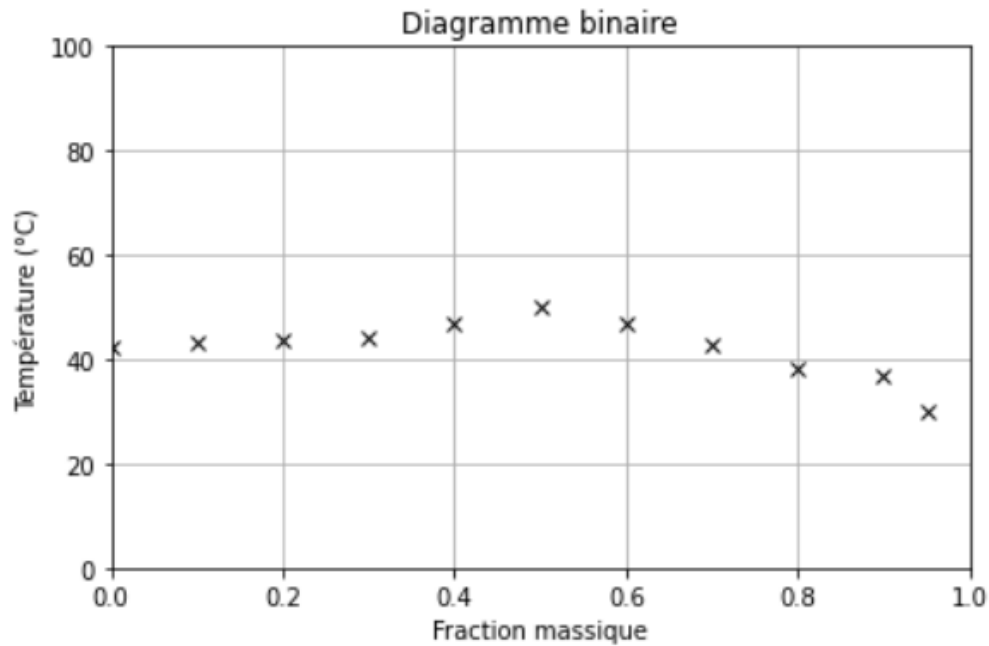


## Le MCP – *Température de changement d'état, les résultats*



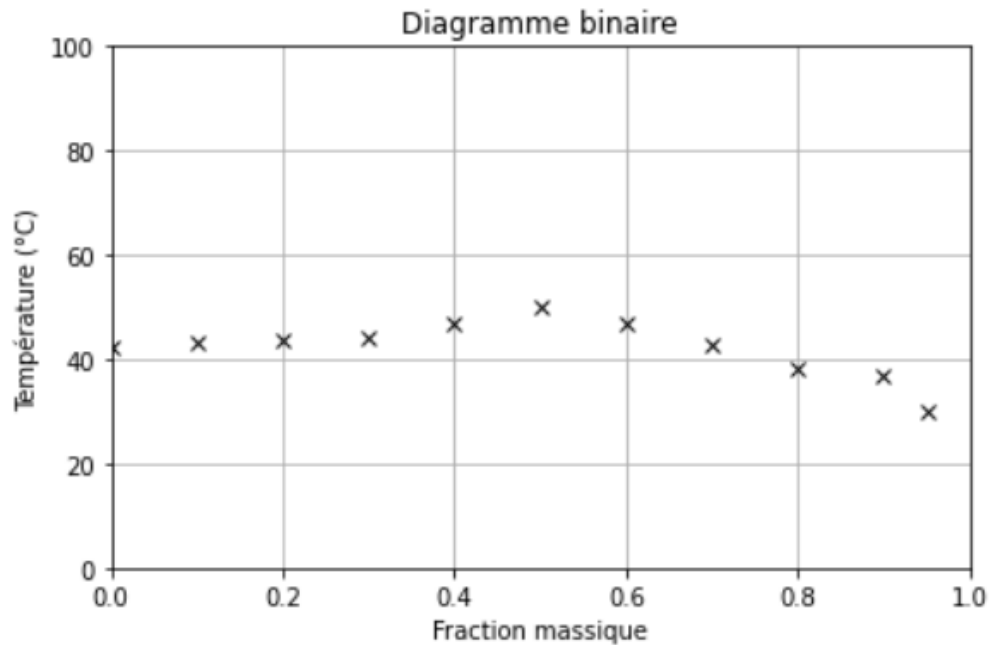


## Le MCP – *Température de changement d'état, les résultats*





## Le MCP – *Température de changement d'état, les résultats*

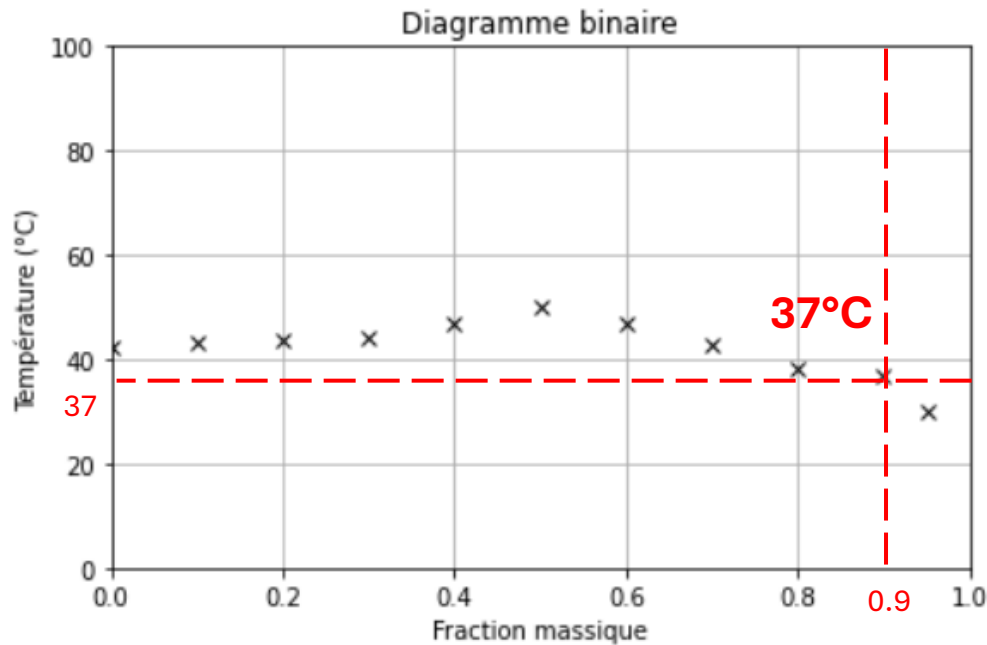


► Rappel :

Recherche du mélange idéal pour  $T_{\text{chgt état}} = \sim 35^{\circ}\text{C}$



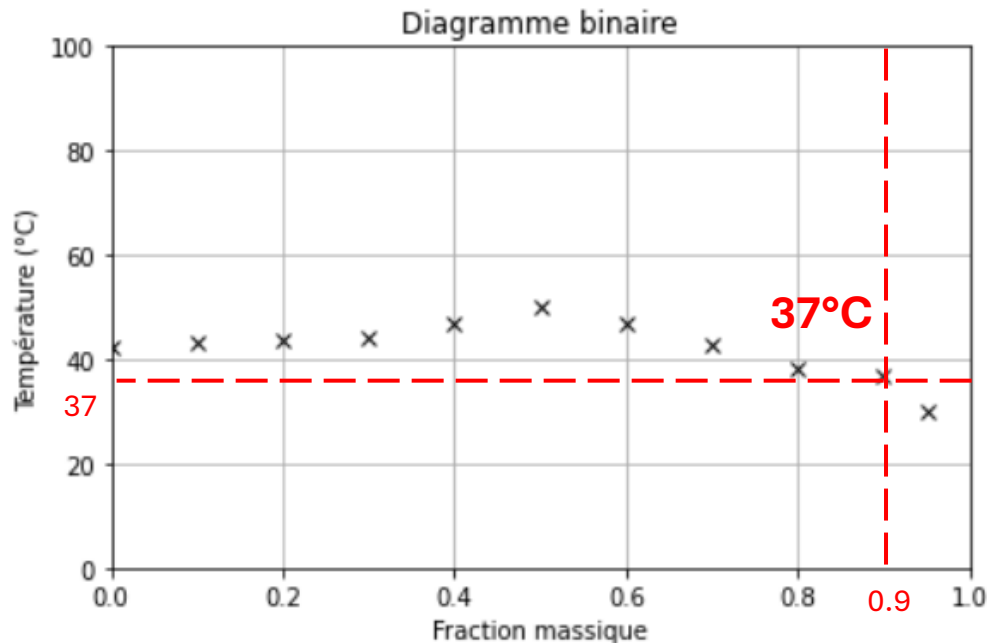
## Le MCP – *Température de changement d'état, les résultats*



### ► Rappel :

Recherche du mélange idéal pour  $T_{chgt\ état} = \sim 35^{\circ}\text{C}$

## Le MCP – Température de changement d'état, les résultats



### ► Rappel :

Recherche du mélange idéal pour  $T_{chgt\ état} = \sim 35^{\circ}\text{C}$

**Composition massique du MCP : 90% d'huile / 10% de paraffine**

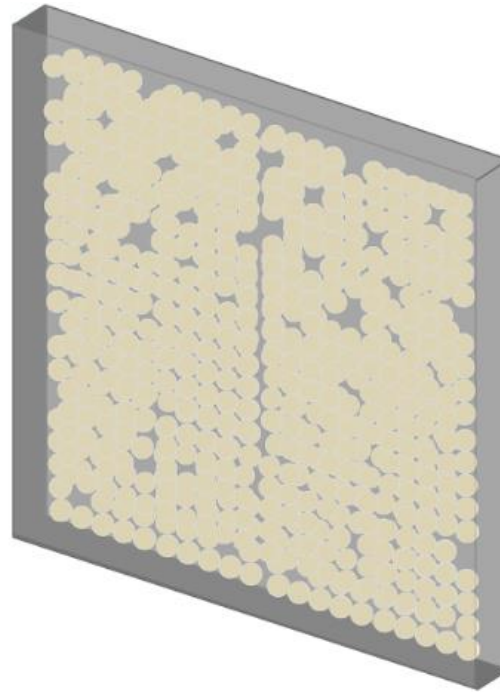
# **CONCEPTION DE NOTRE ISOLANT**







## Conception de l'isolant, *idée initiale*



**Comment intégrer les  
MCP afin de réaliser  
l'isolant ?**

Introduction

Objectifs

Le MCP

## CONCEPTION DU MUR

Mesures

Modélisation

Conclusion

### Conception de l'isolant, *idée initiale*



**Moulage au réfrigérateur**



**Quadrillage**

## Conception de l'isolant, *idée initiale*



**Moulage au réfrigérateur**



**Quadrillage**



**Différentes dispositions pour comparer**

**Pourquoi ne pas le garder ?**

Introduction

Objectifs

Le MCP

**CONCEPTION  
DU MUR**

Mesures

Modélisation

Conclusion

## Conception de l'isolant, *idée initiale*

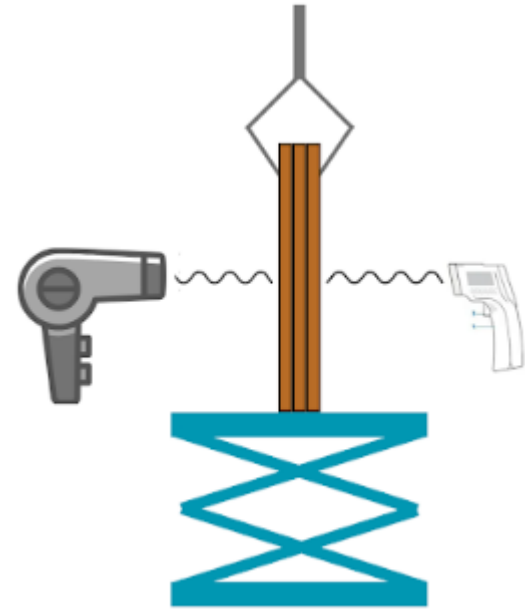
### Expérience initiale



**Sèche  
cheveux**

**Mur**

**Thermomètre  
infrarouge**



Introduction

Objectifs

Le MCP

**CONCEPTION  
DU MUR**

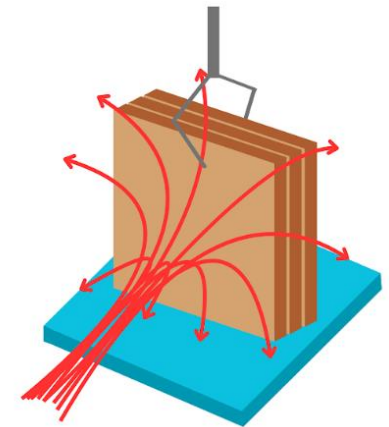
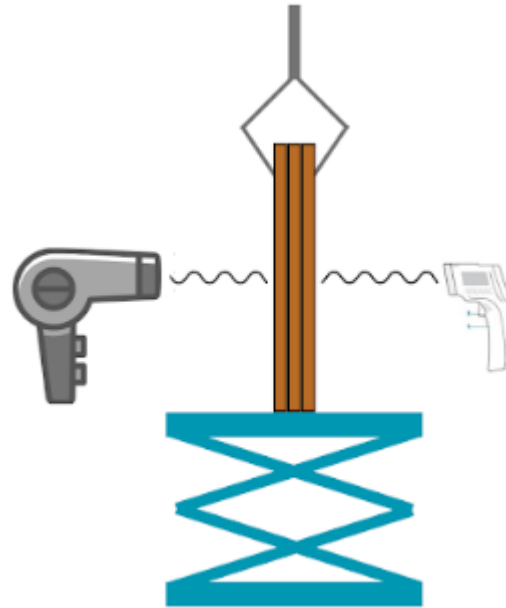
Mesures

Modélisation

Conclusion

## Conception de l'isolant, *idée initiale*

### Expérience initiale

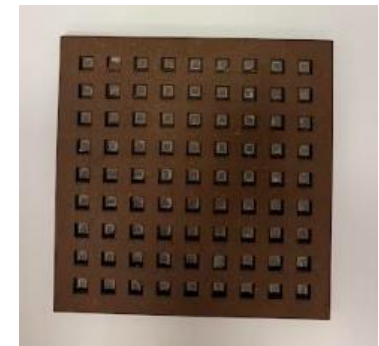
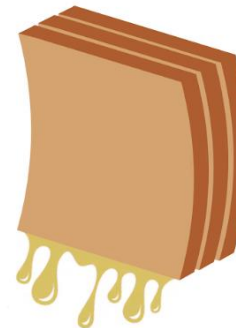


*Impossible de  
connaître le flux*

### ► Problèmes :



*Avant l'expérience*



*Après l'expérience*

**2<sup>ième</sup> idée**

**↳ solution adoptée**





## Conception de l'isolant, *stockage MCP*

**Choix :** Stockage dans des balles de ping-pong



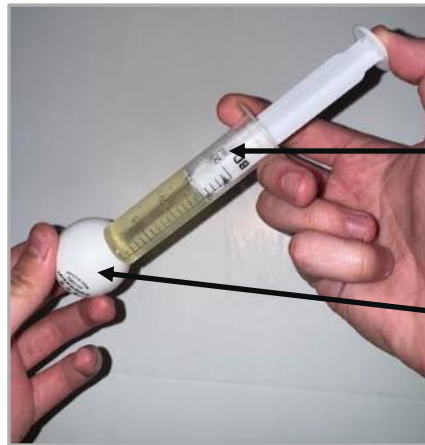
**Ouverture**

## Conception de l'isolant, *stockage MCP*

**Choix :** Stockage dans des balles de ping-pong



**Ouverture**



**Encapsulation  
du MCP**

Seringue  
avec MCP

Balle de  
ping-pong



## Conception de l'isolant, *stockage MCP*

**Choix :** Stockage dans des balles de ping-pong



**Ouverture**



**Encapsulation  
du MCP**



Colle  
thermofusible

**Fermeture**

Introduction

Objectifs

Le MCP

## CONCEPTION DU MUR

Mesures

Modélisation

Conclusion

### Conception de l'isolant, *stockage MCP*

**Choix :** Stockage dans des balles de ping-pong



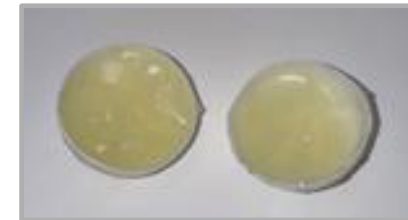
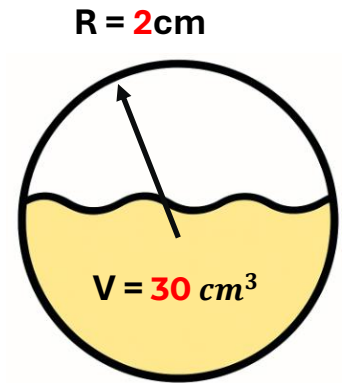
**Ouverture**



**Encapsulation  
du MCP**



**Fermeture**



**Vu de coupe**

#### **Raison :**

- + Etanche
- + Volume connu et constant
- + Bonnes répartitions de chaleur (homogénéité)

# CONCEPTION DE NOTRE MAQUETTE



**Comment a-t-on créé notre  
maquette ?**





## Conception de la maquette, *Mur final*

### Mousse expansive de polyuréthane



#### Raison :

- + Facilité de mise en œuvre
- + Isolant classique de propriétés connues
- + Maintien mécanique

Introduction

Objectifs

Le MCP

## CONCEPTION DU MUR

Mesures

Modélisation

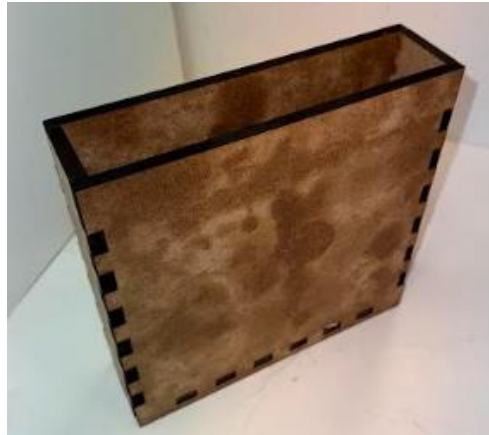
Conclusion

### Conception de la maquette, *Mur final*

#### Mousse expansive de polyuréthane



#### Dispositif de moulage



Balles

Papier  
cuisson

Introduction

Objectifs

Le MCP

## CONCEPTION DU MUR

Mesures

Modélisation

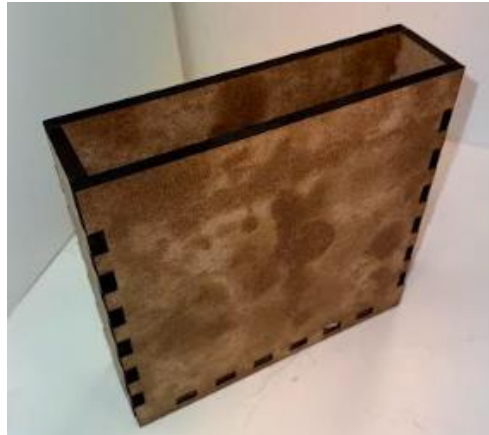
Conclusion

### Conception de la maquette, *Mur final*

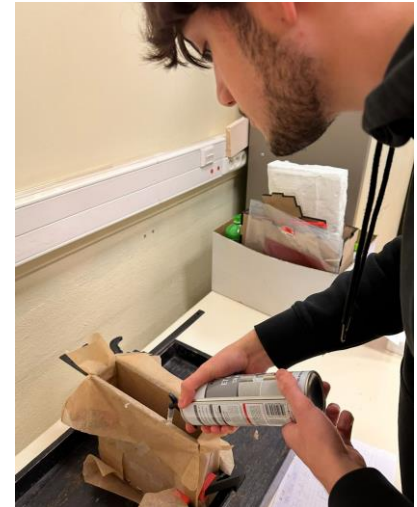
#### Mousse expansive de polyuréthane



#### Dispositif de moulage



#### Remplissage du mur

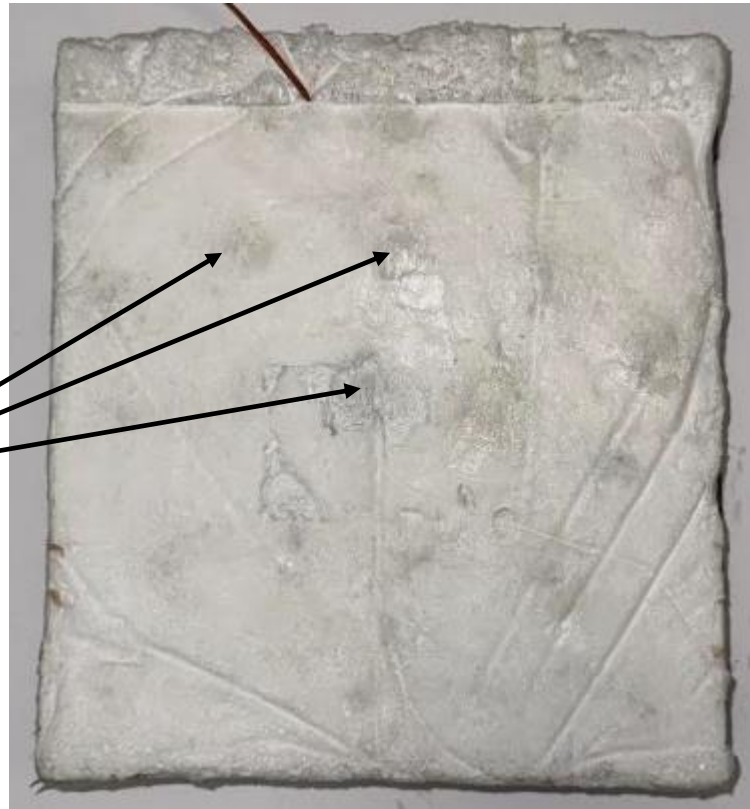




## Conception de la maquette, *Mur final*

**Isolant démoulé**

**Balles  
de MCP**



# **Dispositif expérimental de caractérisation de l'isolant**



**LA MAQUETTE ASSEMBLÉE**







## Conception de la maquette, *La maquette*



**1/ Plaque de  
bois support**



Introduction

Objectifs

Le MCP

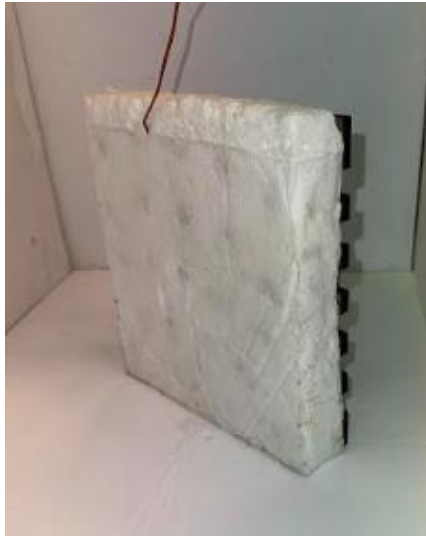
## CONCEPTION DU MUR

Mesures

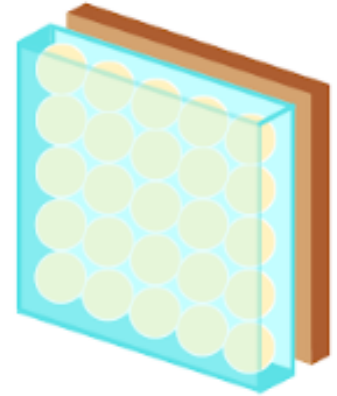
Modélisation

Conclusion

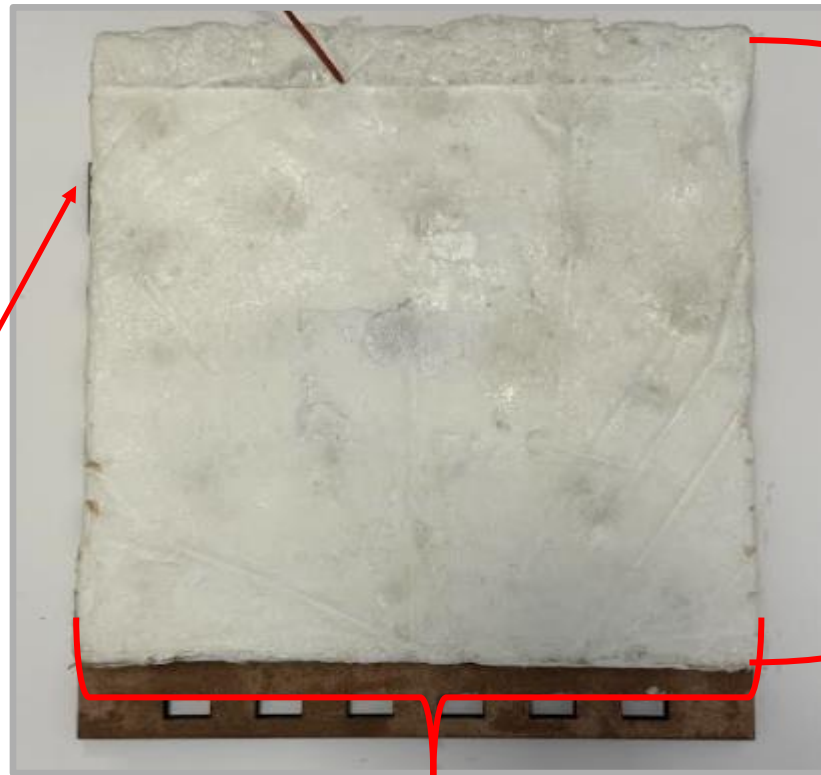
### Conception de la maquette, *La maquette*



2/ Isolant



Epaisseur : 4 cm



22 cm

22 cm

Introduction

Objectifs

Le MCP

## CONCEPTION DU MUR

Mesures

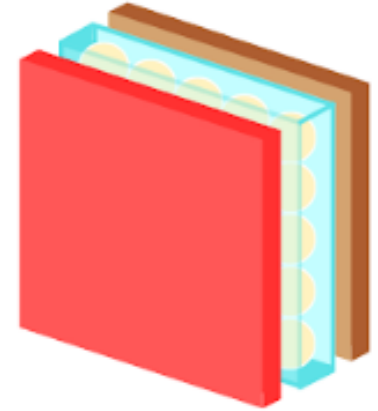
Modélisation

Conclusion

### Conception de la maquette, *La maquette*



#### 3/ La plaque chauffante



**Marque : RS PRO**  
**Prix : ~ 150 €**  
**Puissance nominale : 320W**



## Conception de la maquette, *La maquette*



### 4/ Thermocouple

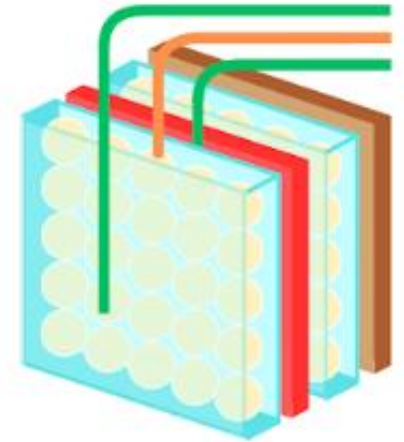
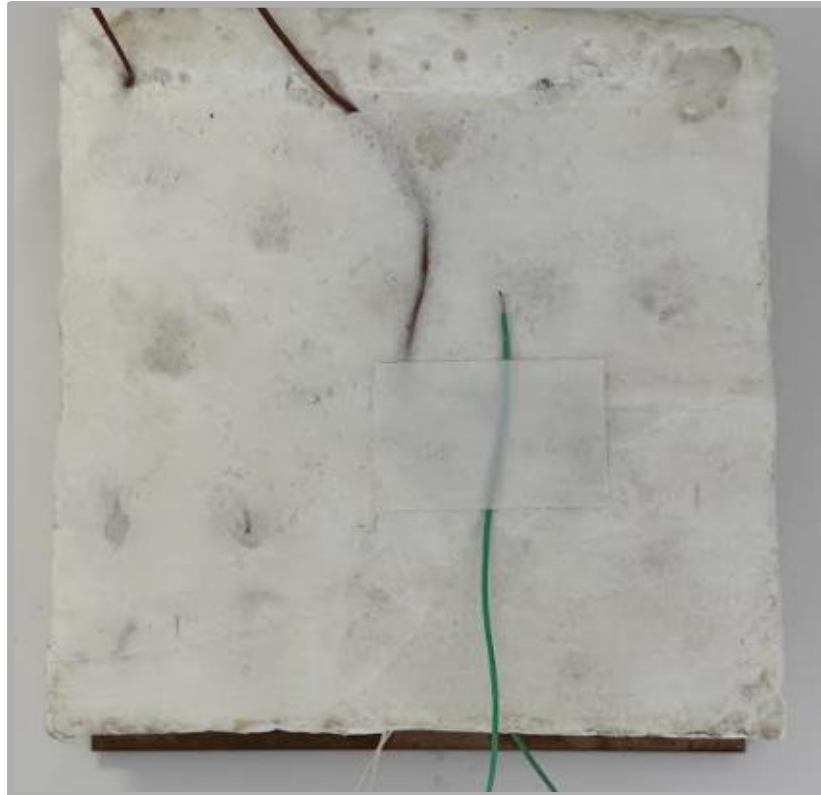




## Conception de la maquette, *La maquette*



**5/ isolant (et  
thermocouple)**





## Conception de la maquette, *La maquette*



**6/ Plaque de  
bois support**





Introduction

Objectifs

Le MCP

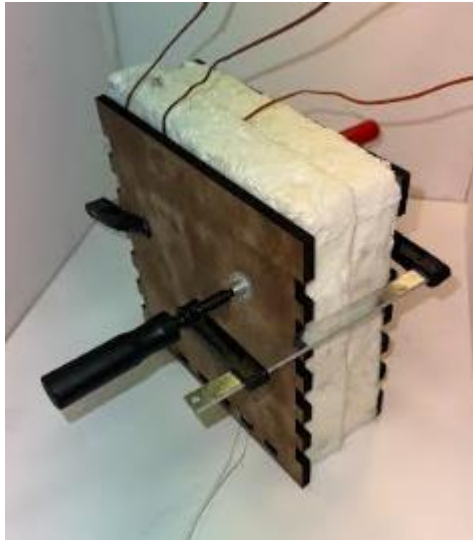
**CONCEPTION  
DU MUR**

Mesures

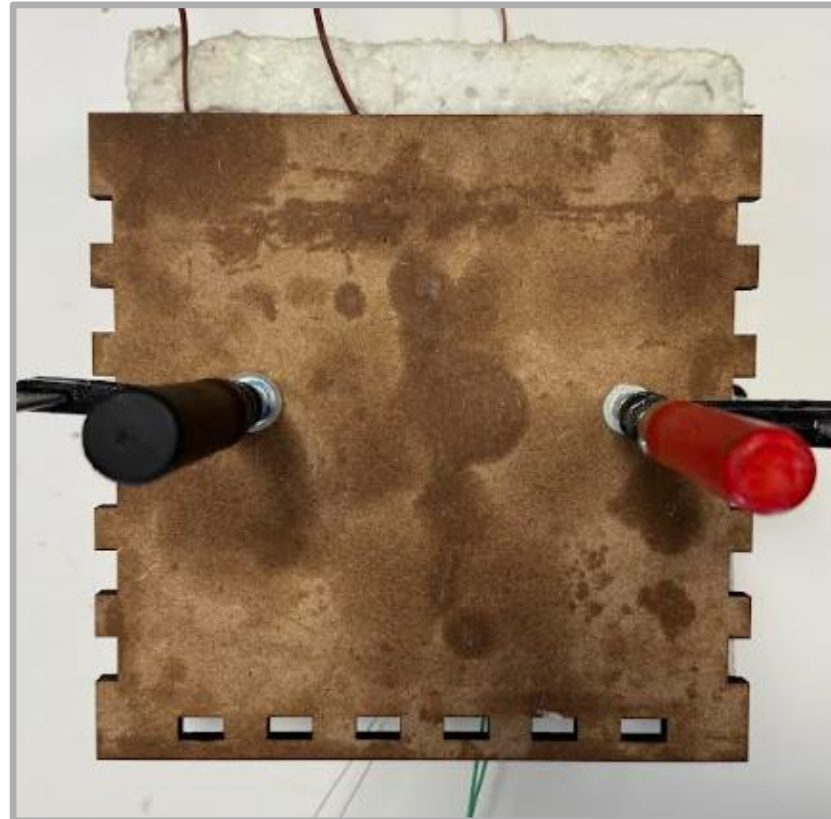
Modélisation

Conclusion

## Conception de la maquette, *La maquette*



**7/ Serre-joints**



Introduction

Objectifs

Le MCP

## CONCEPTION DU MUR

Mesures

Modélisation

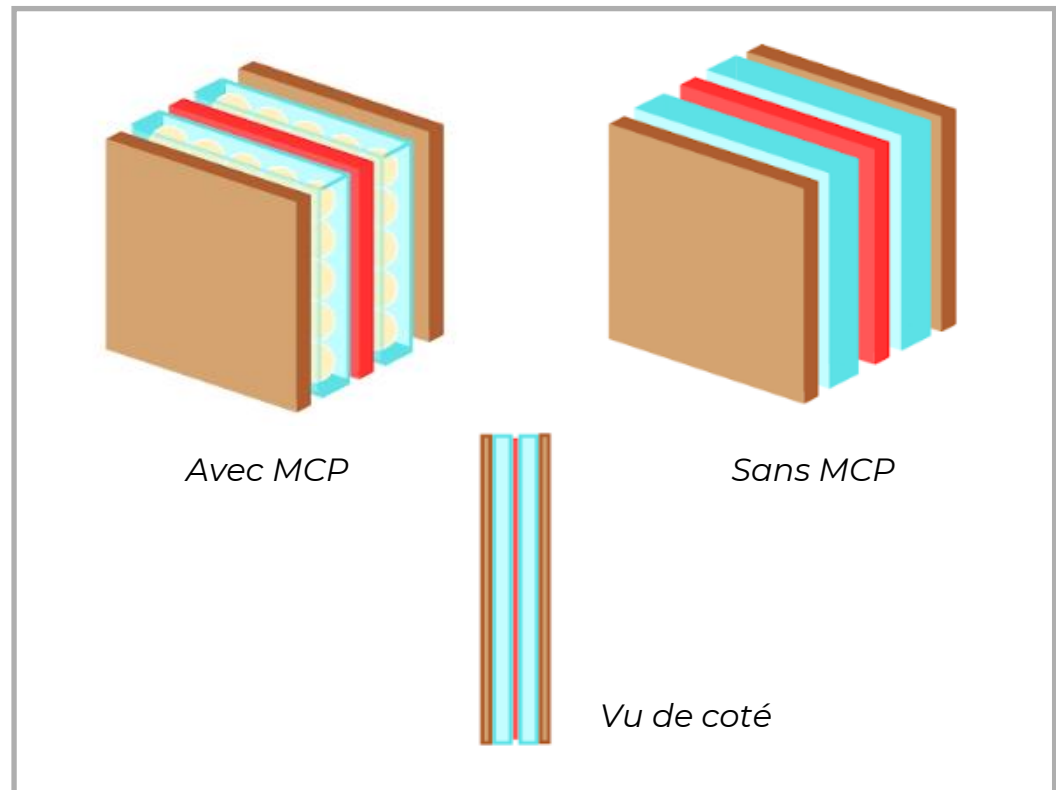
Conclusion

### Conception de la maquette, *La maquette*

**La maquette  
réelle**



**La maquette  
schématisée**



**Pourquoi cette disposition ?**

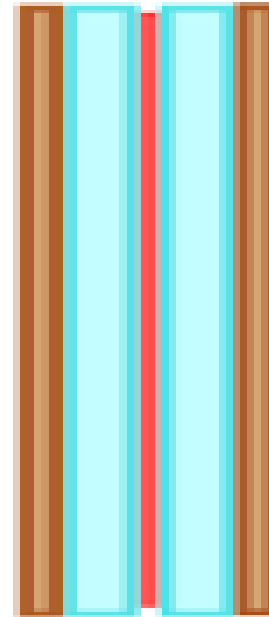




## Conception de la maquette, *La maquette*

### Raisons :

+ Symétrie de la maquette

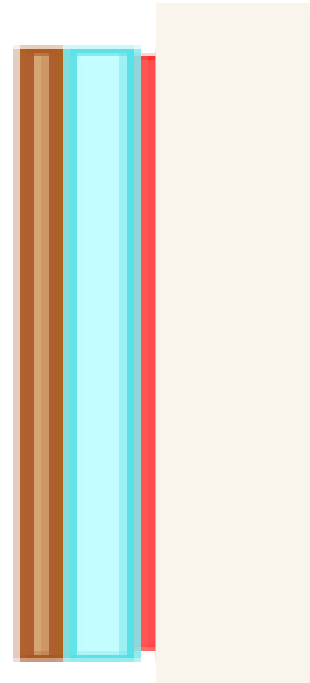




## Conception de la maquette, *La maquette*

### Raisons :

- + Symétrie de la maquette

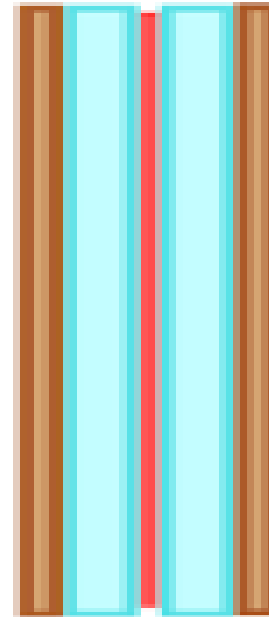




## Conception de la maquette, *La maquette*

### Raisons :

- + Symétrie de la maquette

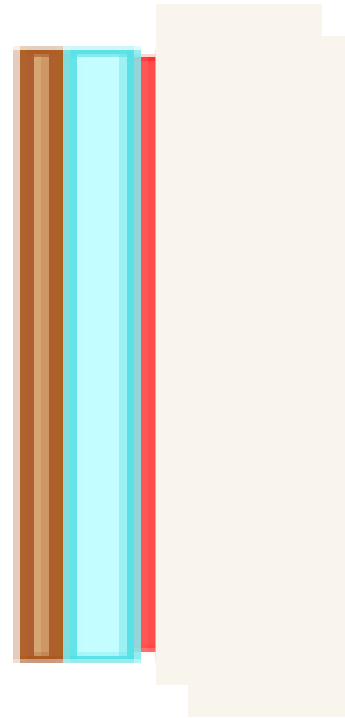




## Conception de la maquette, *La maquette*

### Raisons :

- + Symétrie de la maquette

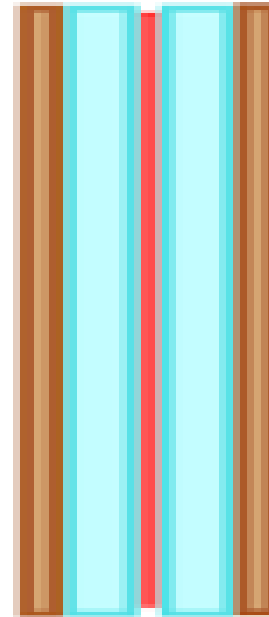




## Conception de la maquette, *La maquette*

### Raisons :

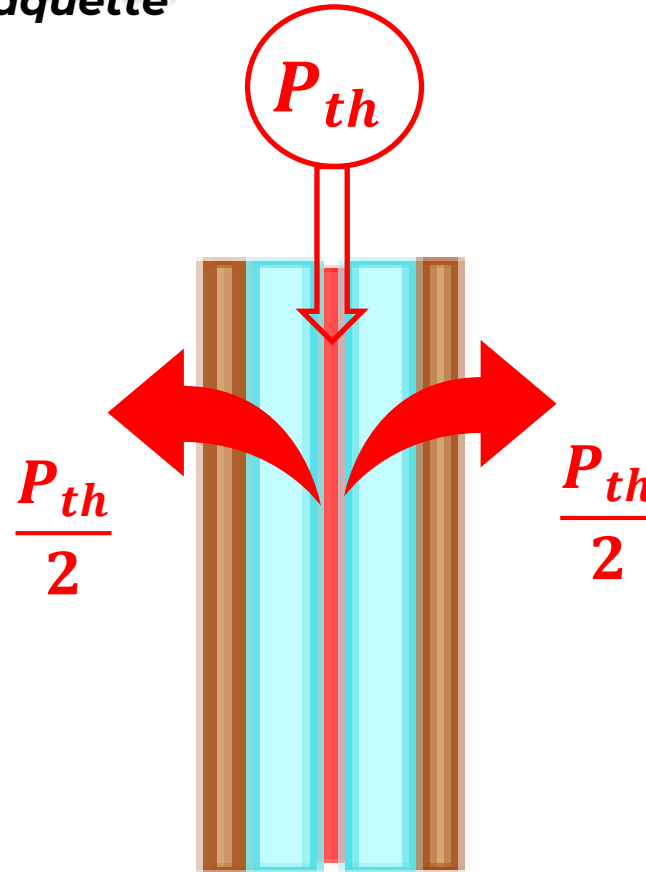
+ Symétrie de la maquette



## Conception de la maquette, *La maquette*

### Raisons :

- + Symétrie de la maquette
- + Répartition équitable de  $P_{th}$

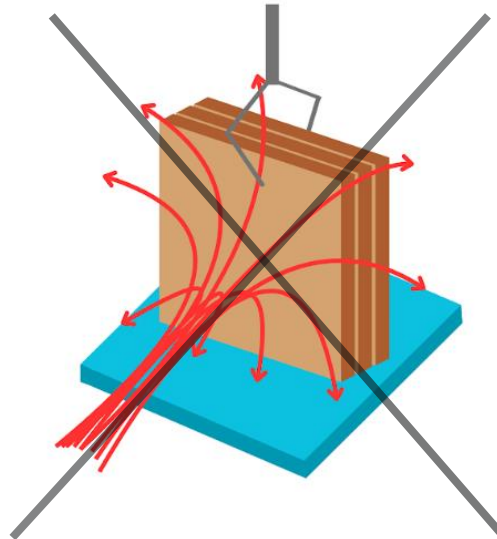




## Conception de la maquette, *La maquette*

### Raisons :

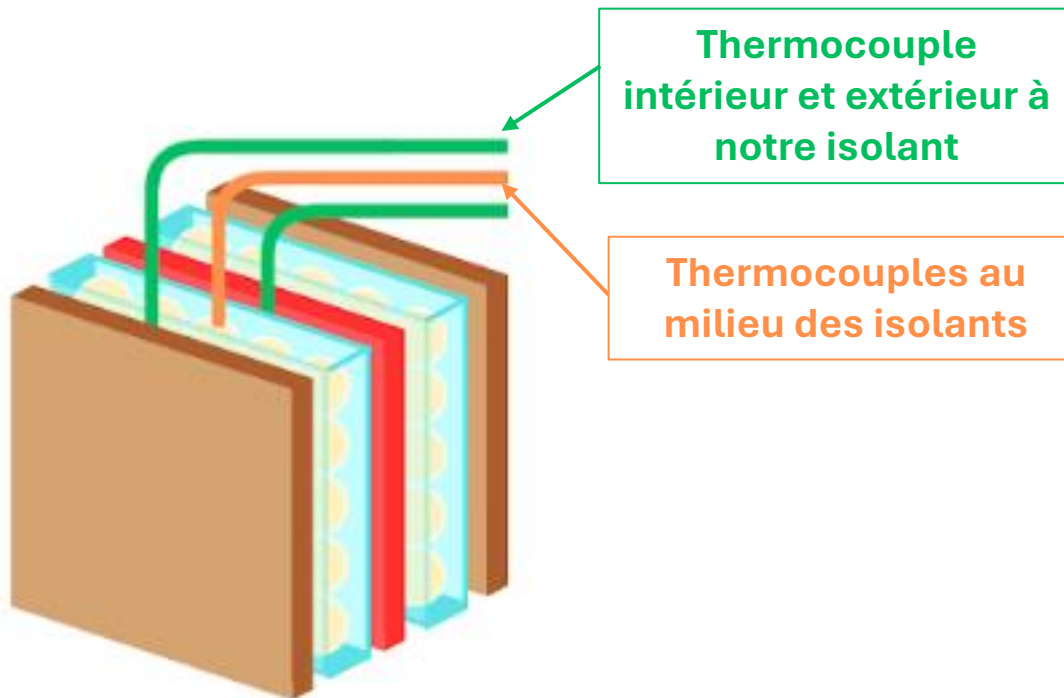
- + Symétrie de la maquette
- + Répartition équitable de  $P_{th}$
- + Limite les pertes





## Conception de la maquette, *La maquette*

### Thermocouples

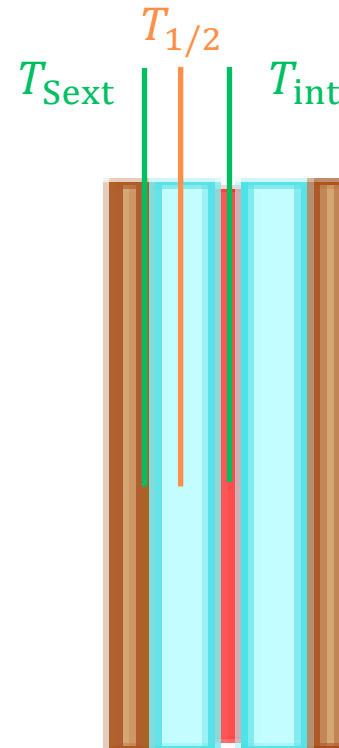
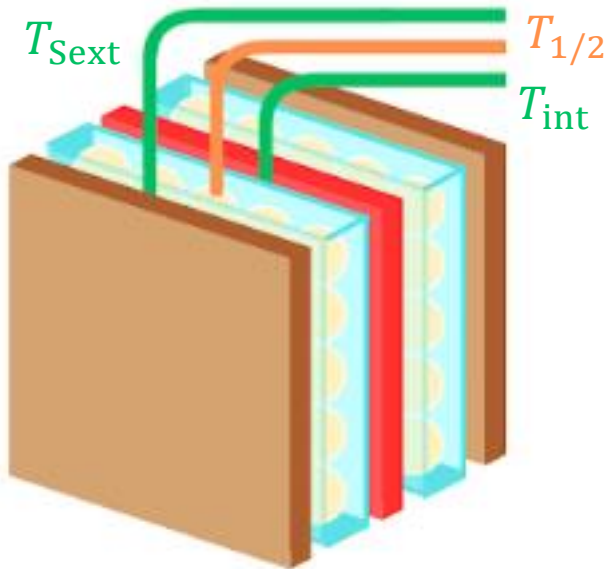






## Conception de la maquette, *La maquette*

### Introduction des températures



# **CHARACTERISATION**



Introduction

Objectifs

Le MCP

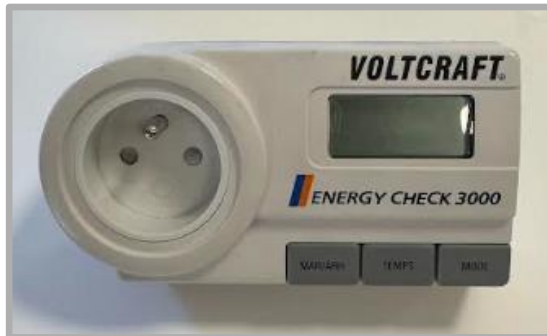
Conception du  
mur

**MESURES**

Modélisation

Conclusion

## Mesures, l'installation



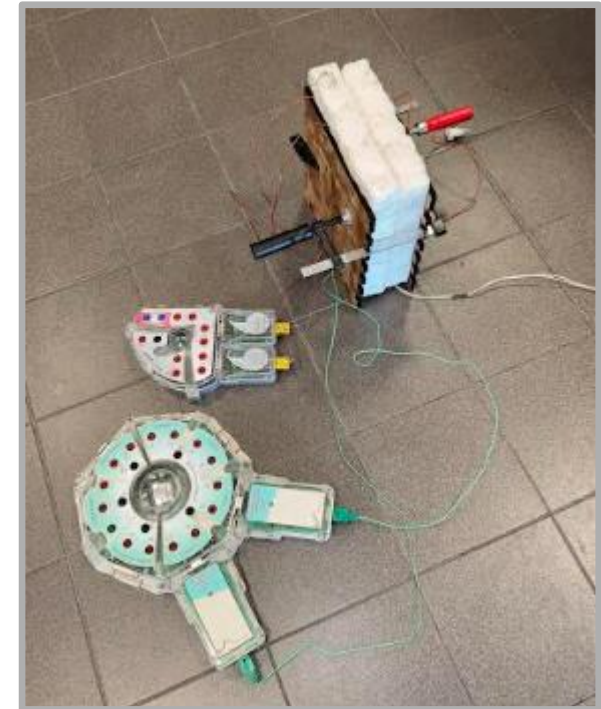
**Compteur d'énergie**

Plage de mesure : 1,5W à 3000W

Incertitude :  $\pm 1W$



**Variateur de tension  
alternif**



**L'ensemble des  
capteurs (EuroSmart)**

**A quoi sert ce montage ?**

Introduction

Objectifs

Le MCP

Conception du  
mur

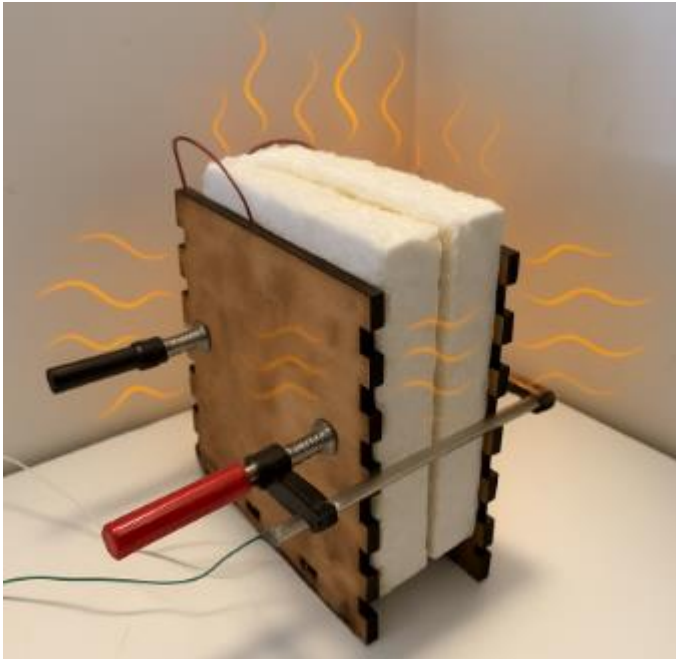
**MESURES**

Modélisation

Conclusion

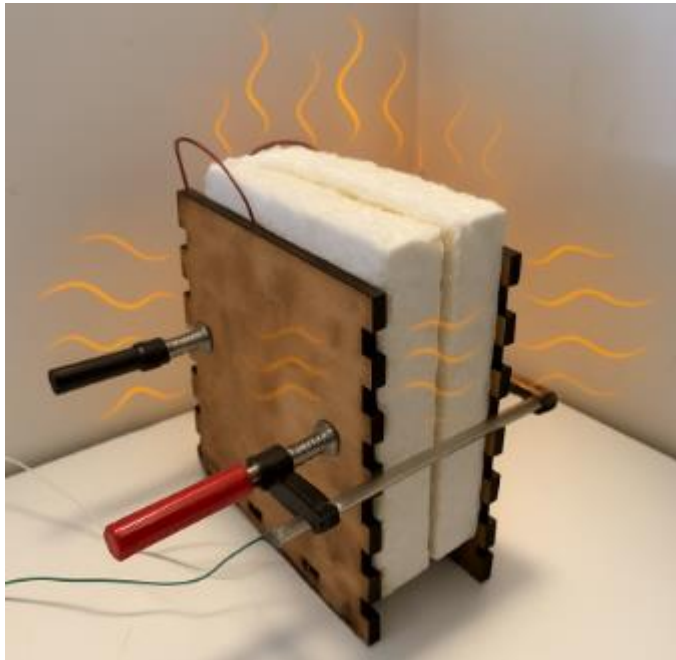
## Mesures, caractéristiques du mur

### Chauffe des murs / Refroidissement



## Mesures, caractéristiques du mur

### Chauffe des murs / Refroidissement



### L'impact de la chauffe

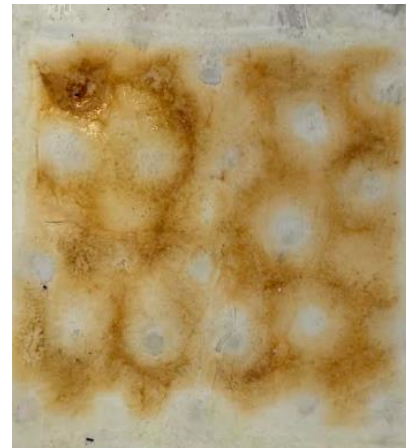
#### Sans MCP

- Dégradation du mur



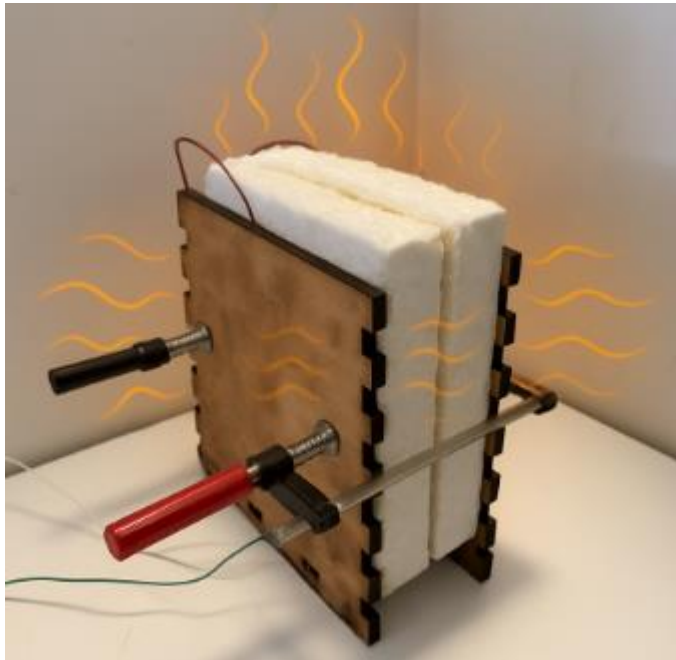
#### Avec MCP

- Dégradation du mur
- + Limitation de la chauffe



## Mesures, caractéristiques du mur

### Chauffe des murs / Refroidissement



### L'impact de la chauffe

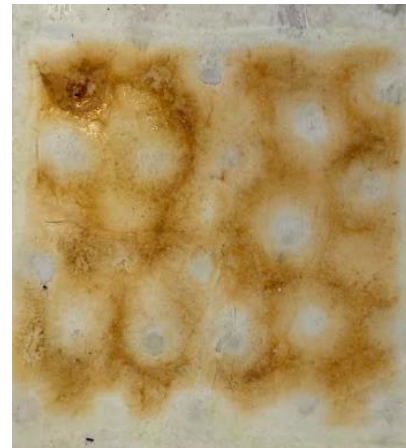
#### Sans MCP

- Dégradation du mur



#### Avec MCP

- Dégradation du mur
- + Limitation de la chauffe



Quel résultat peut-on obtenir avec les chauffes/refroidissements ?



## Mesures, caractéristiques du mur

### Capacité thermique :

- De la mousse expansive
- Des balles avec MCP
- Du calorimètre utilisé



### Résistance thermique :

- Du mur sans MCP
- Du mur avec MCP



### Déphasage thermique :

- Du mur sans MCP
- Du mur avec MCP



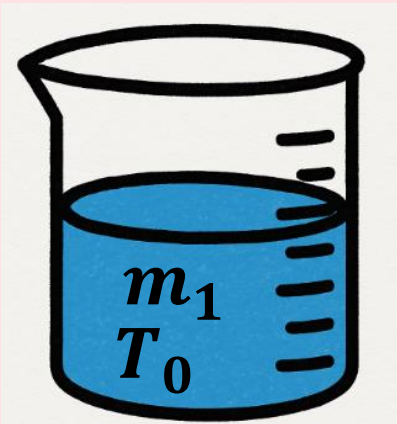


## Mesures, capacité thermique

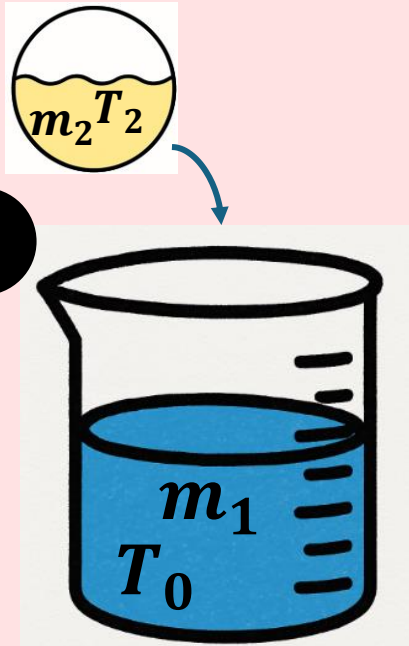
**BINOME TIPE**

### Protocole d'une calorimétrie :

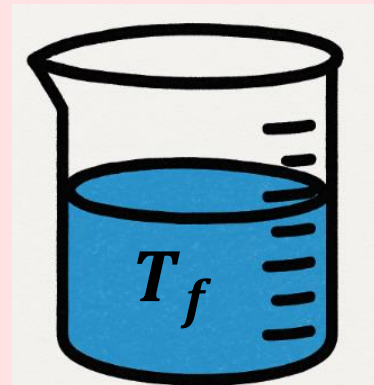
1



2



3



4

Conservation de l'énergie :

$$m_1 c_{\text{eau}} (T_f - T_0) + m_2 c_x (T_f - T_2) + C_{\text{calo}} (T_f - T_0) = 0$$

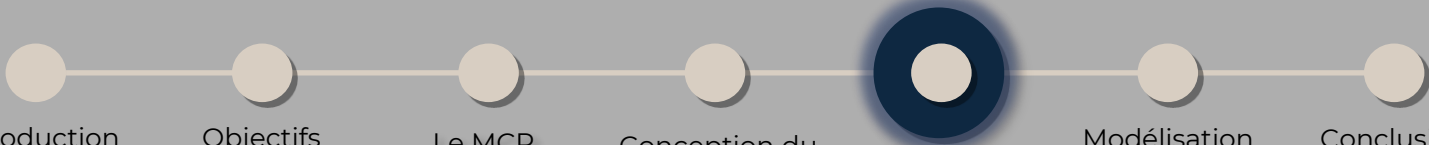
$c_x$  : capacité thermique  
massique recherchée

$C_{\text{calo}}$  : capacité  
thermique du calorimètre

### Montage







Introduction

Objectifs

Le MCP

Conception du  
mur

**MESURES**

Modélisation

Conclusion

Mur	Capacité thermique
Sans MCP	$c_{th}^{exp} = 6 J/g/K$
	$c_{th}^{th} = 1.5 J/g/K$
Avec MCP	$c_{th}^{exp} = 7 J/g/K$
	$c_{th}^{th} = 5 J/g/K$

# CARACTERISATION



## 2/ LES RESISTANCES THERMIQUES



## Mesures, résistances thermiques

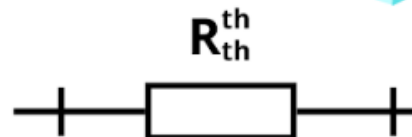
*Mur sans MCP*

$$\triangleright R_{th} = \frac{e}{\lambda \times S}$$

### Théorie :

$$\lambda_{th} = 0,034 \text{ W / (m. K)}$$

$$R_{th}^{th} = 24 \text{ K/W}$$



### Expérimental :

??

Introduction

Objectifs

Le MCP

Conception du mur

MESURES

Modélisation

Conclusion

**Mur sans MCP**

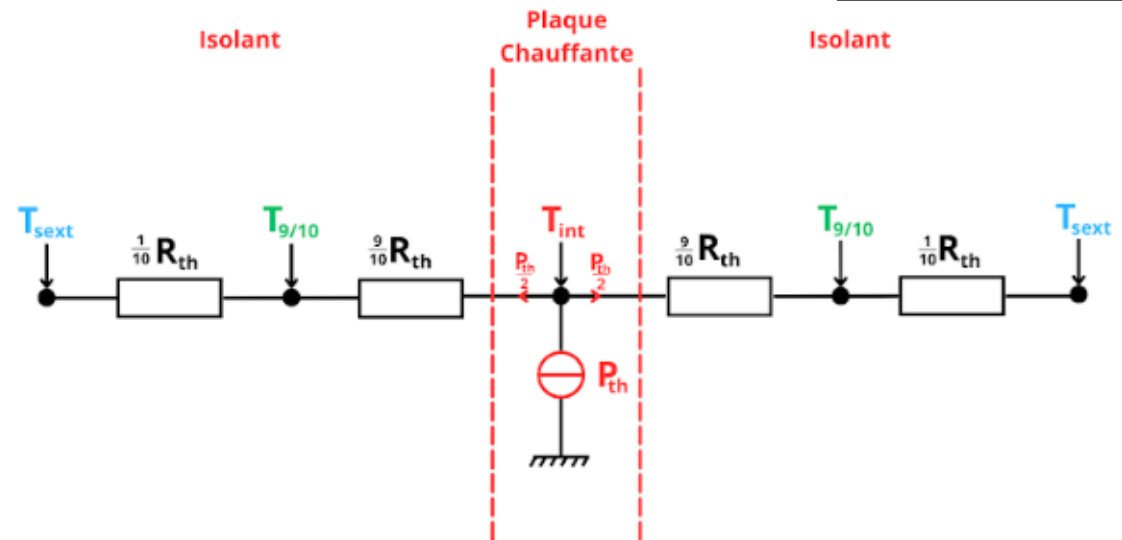


Schéma électrique équivalent

Introduction

Objectifs

Le MCP

Conception du mur

MESURES

Modélisation

Conclusion

**Mur sans MCP**

Isolant

Plaque  
Chauffante

Isolant

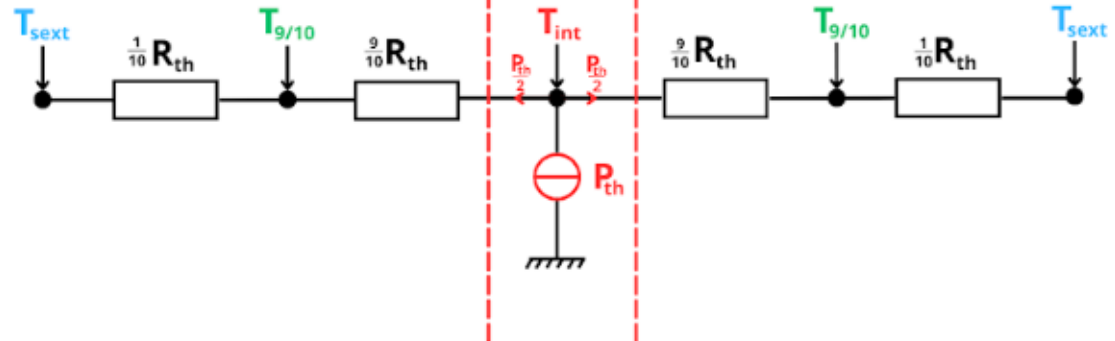


Schéma électrique équivalent

**Dans l'ARQS :**

$$T_{int} - T_{9/10} = 9 \frac{R_{th}}{10} \cdot \frac{P_{th}}{2}$$

**Mur sans MCP**

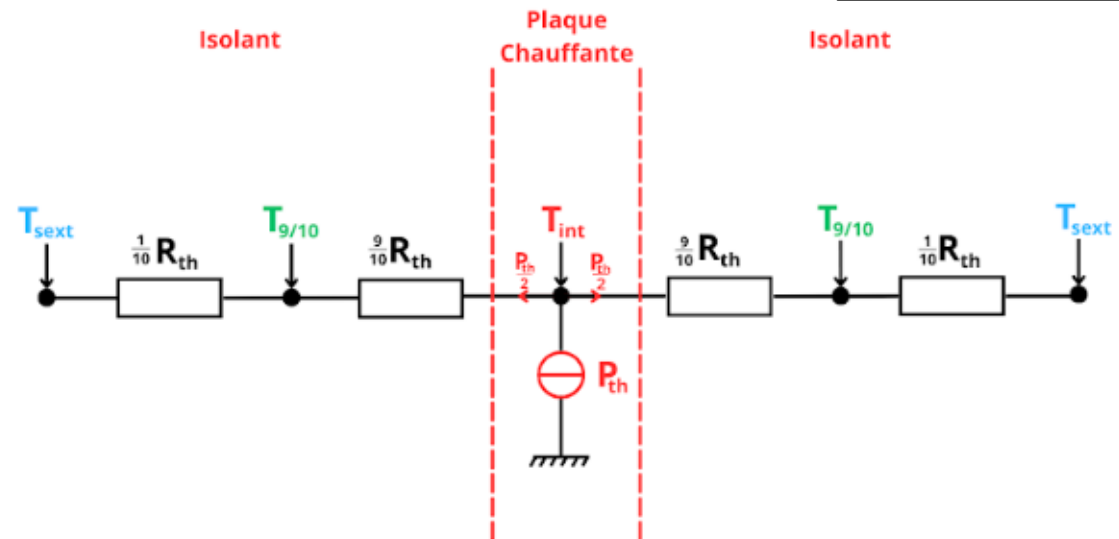


Schéma électrique équivalent

**Dans l'ARQS :**

$$T_{int} - T_{9/10} = 9 \frac{R_{th}}{10} \cdot \frac{P_{th}}{2}$$

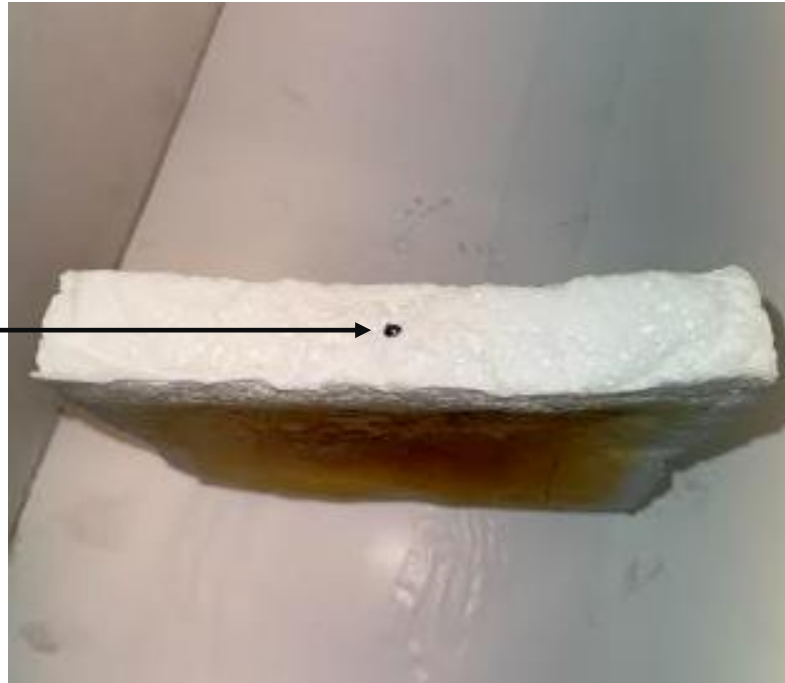
**Pourquoi  $T_{9/10}$  ? Le capteur n'était pas au milieu du mur ?**



## Mesures, *résistances thermiques*

***Mur sans MCP***

Trou fait en plantant le capteur au milieu du mur



## Mesures, résistances thermiques



**Mur sans MCP**

**Le capteur  
n'est plus  
au milieu**





## Mesures, résistances thermiques

**Mur sans MCP**



### Observation :

Le capteur est à environ **9/10**  
**d'épaisseur** du mur (pas la moitié)

**Dégradation importante** des murs  
(épaisseur divisée par 2)

Introduction

Objectifs

Le MCP

Conception du mur

MESURES

Modélisation

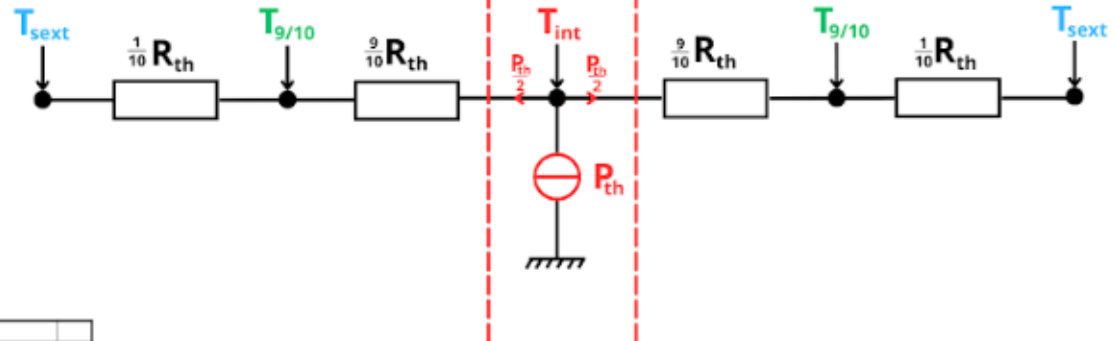
Conclusion

**Mur sans MCP**

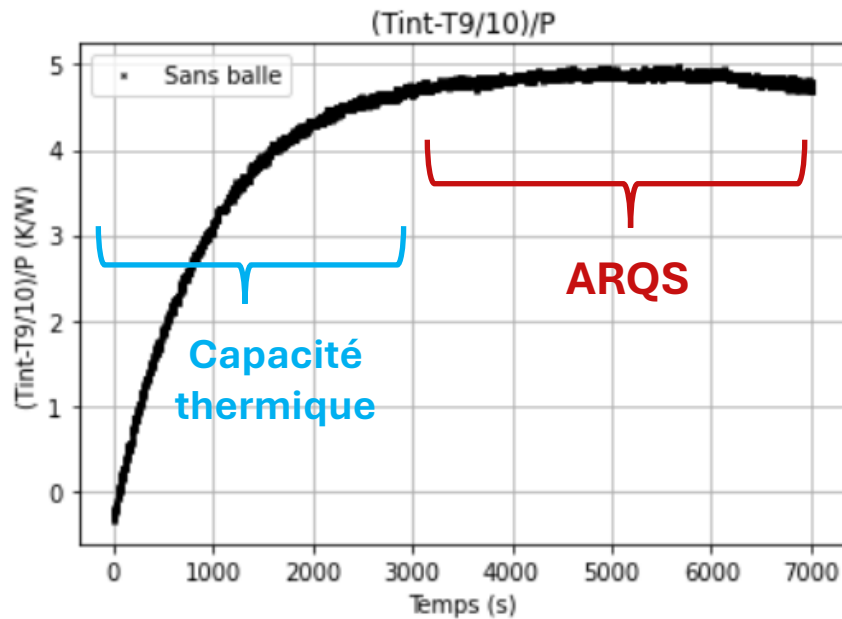
Isolant

Plaque  
Chauffante

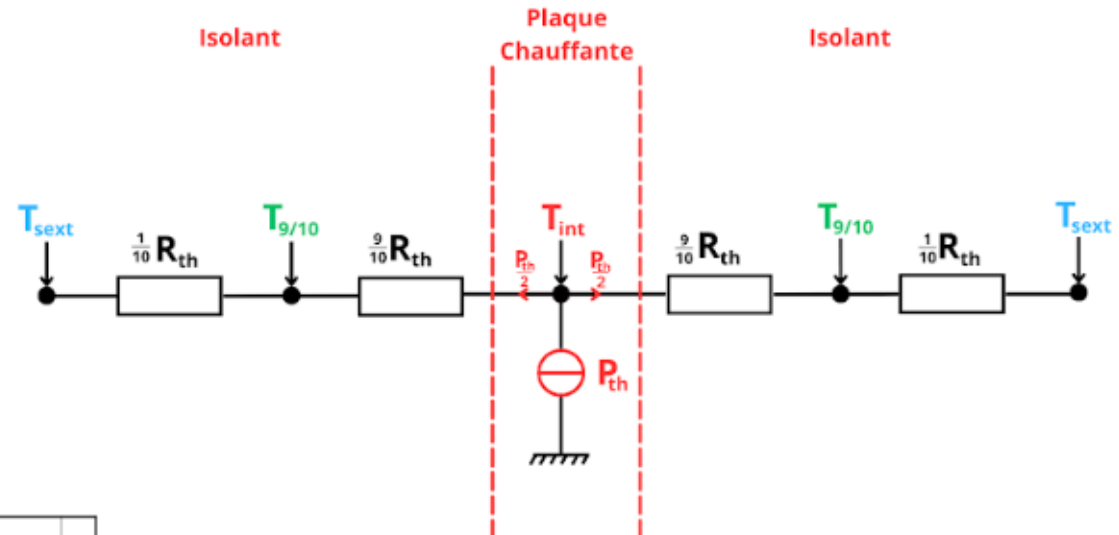
Isolant

**Dans l'ARQS :**

$$T_{int} - T_{9/10} = 9 \frac{R_{th}}{10} \cdot \frac{P_{th}}{2}$$

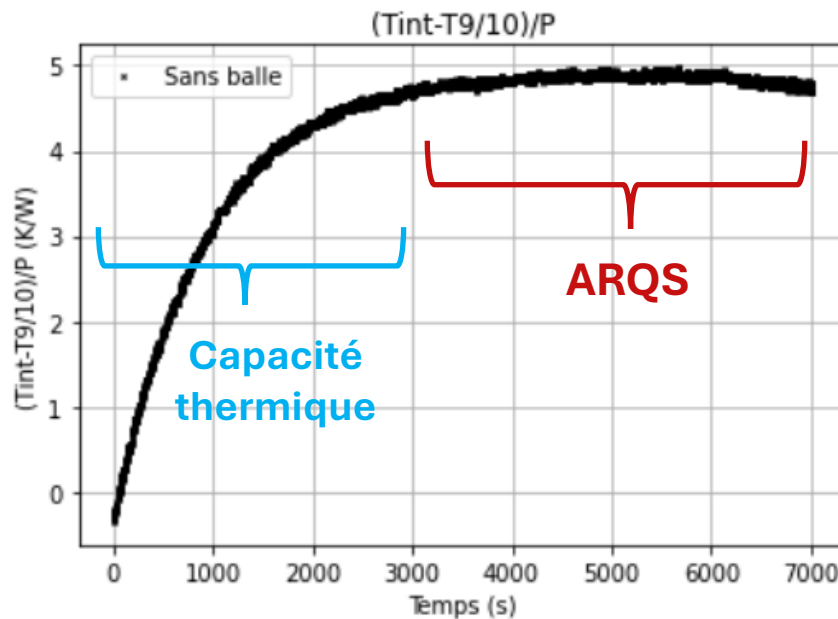


## Mur sans MCP



Dans l'ARQS :

$$T_{int} - T_{9/10} = 9 \frac{R_{th}}{10} \cdot \frac{P_{th}}{2}$$



$$R_{th} = \frac{20}{9 \cdot P} \cdot (T_{int} - T_{\frac{9}{10}})$$

Expérimentalement :

$$R_{th}^{exp} = 12 \text{ K/W}$$

## Mesures, résistances thermiques



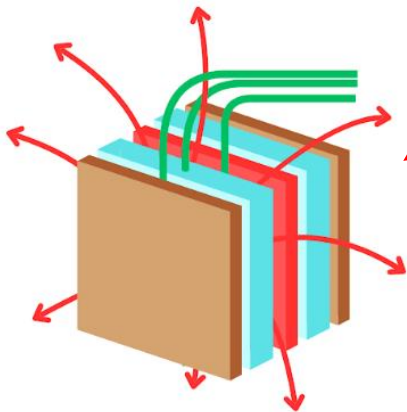
Mur sans MCP

**Théoriquement :**

$$R_{th}^{th} = 24 \text{ K/W}$$

**Expérimentalement :**

$$R_{th}^{exp} = 12 \text{ K/W}$$



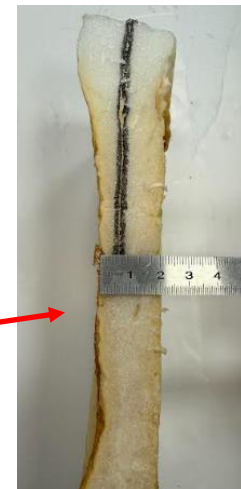
**Ecart notable (facteur 2) :**

**Pertes** de chaleur latérales

**Imperfections** de contact thermique

Mousse **moins dense** que le modèle théorique

Variation de **l'épaisseur** du mur au fil des expériences



# MUR AVEC MATERIAU A CHANGEMENT DE PHASE



Introduction

Objectifs

Le MCP

Conception du mur

MESURES

Modélisation

Conclusion

Mur avec MCP

Isolant

Plaque  
Chauffante

Isolant

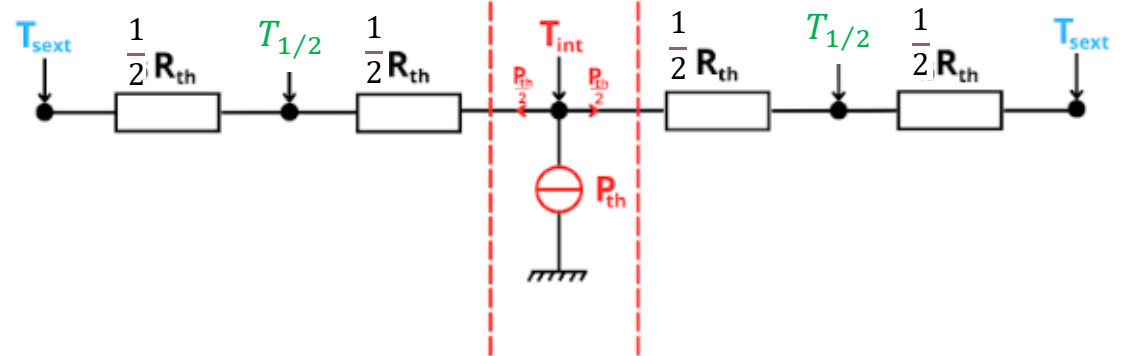


Schéma électrique équivalent

Introduction

Objectifs

Le MCP

Conception du mur

MESURES

Modélisation

Conclusion

Mur avec MCP

Isolant

Plaque  
Chauffante

Isolant

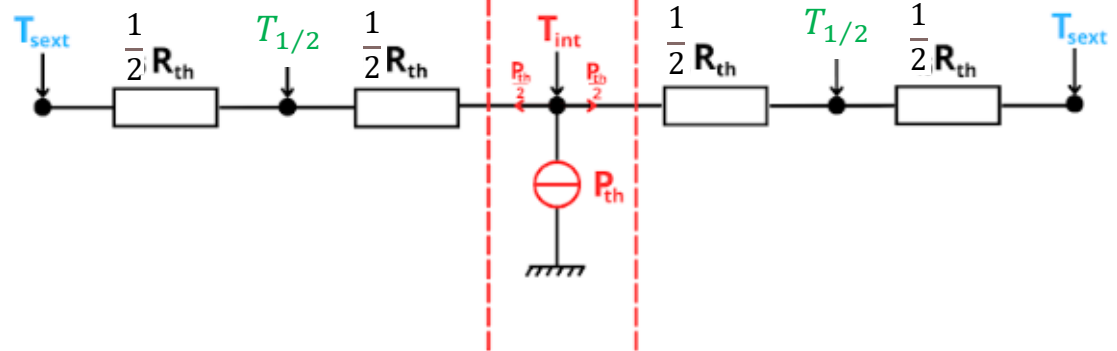


Schéma électrique équivalent

Dans l'ARQS :

$$R_{th} = \frac{4}{P_{th}} \cdot (T_{int} - T_{1/2})$$

Mur avec MCP

Isolant

Plaque  
Chauffante

Isolant

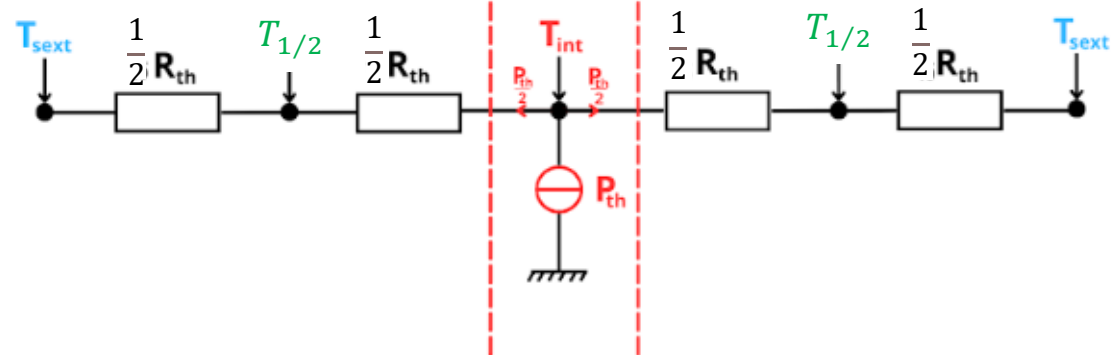


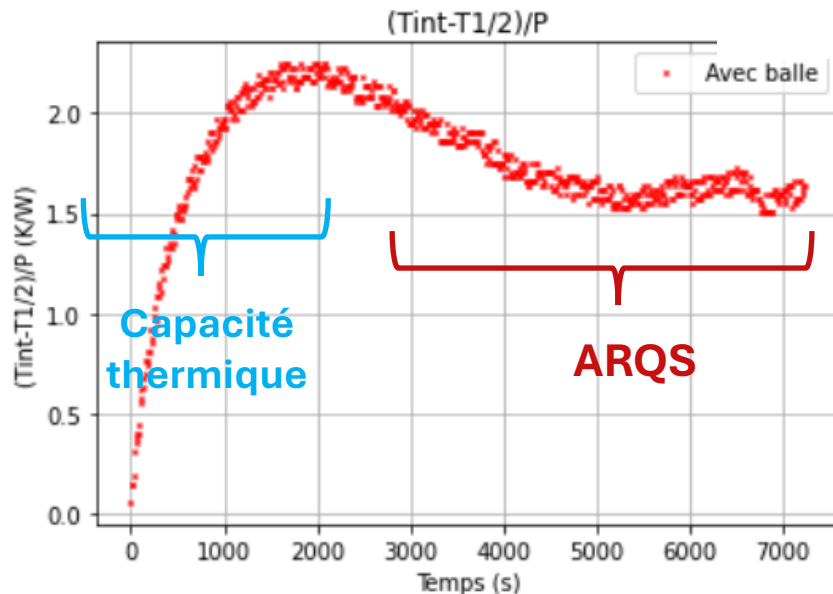
Schéma électrique équivalent

Expérimentalement :

$$R_{th}^{exp} = 8 \text{ K/W}$$

Dans l'ARQS :

$$R_{th} = \frac{4}{P_{th}} \cdot (T_{int} - T_{1/2})$$





Mur avec MCP

Isolant

Plaque  
Chauffante

Isolant

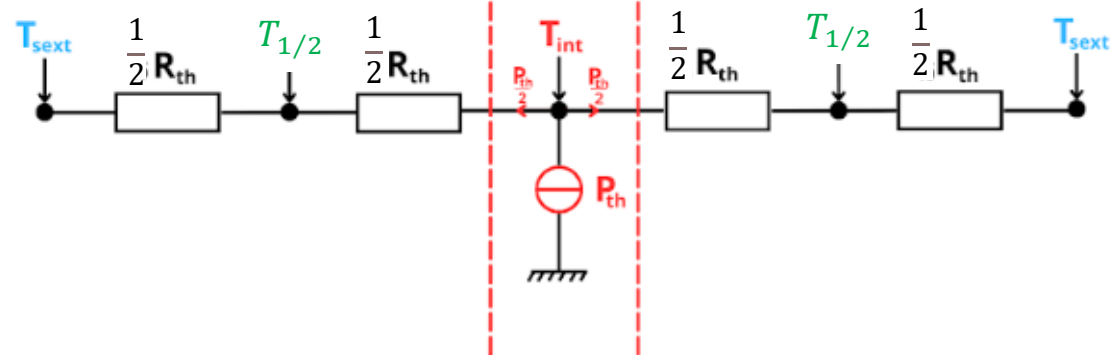


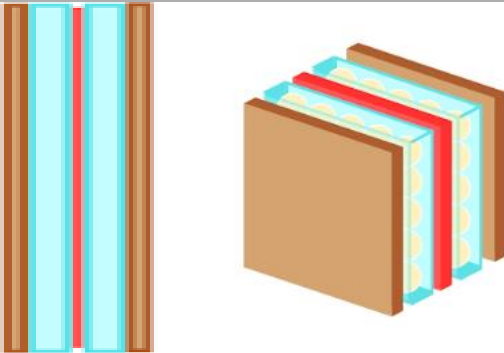
Schéma électrique équivalent

Expérimentalement :

$$R_{th}^{exp} = 8 \text{ K/W}$$

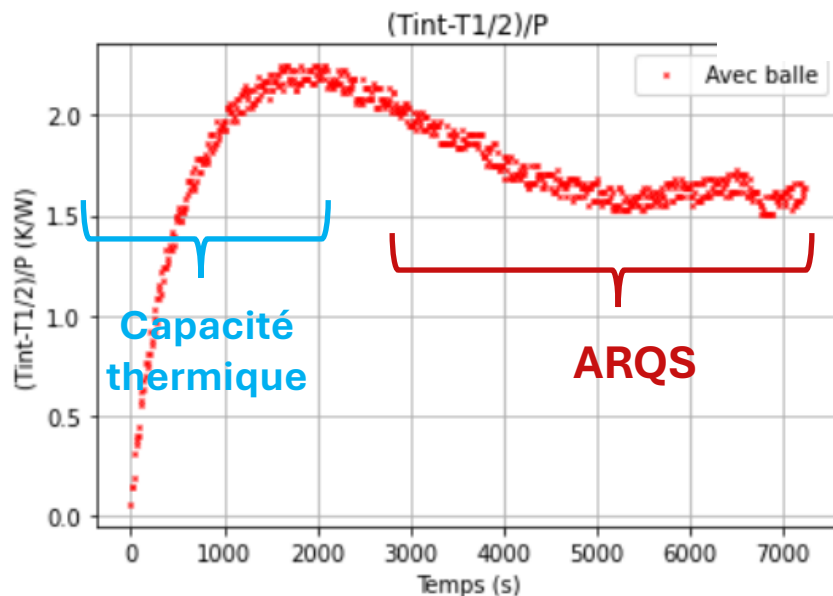
Théoriquement :

⇒ Utilisation de la  
bibliographie



Dans l'ARQS :

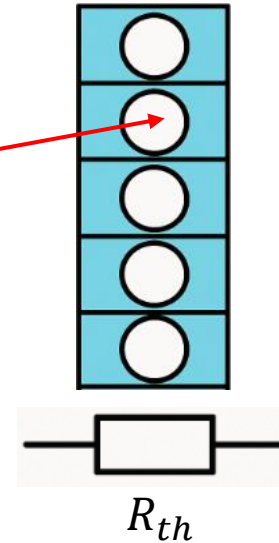
$$R_{th} = \frac{4}{P_{th}} \cdot (T_{int} - T_{1/2})$$



## Mesures, *résistances thermiques*

Modélisation du changement d'état :

$$R_G = R_S \cdot (1 - \phi_L) + R_L \cdot \phi_L$$



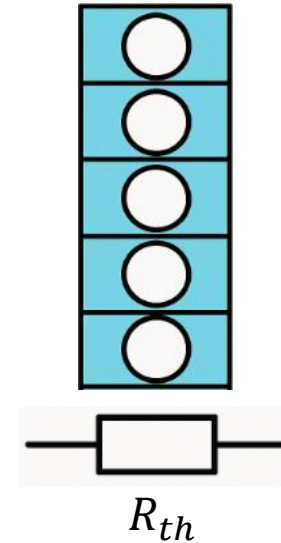
Mur avec MCP

## Mesures, résistances thermiques

Modélisation du changement d'état :

$$R_G = R_S \cdot (1 - \phi_L) + R_L \cdot \phi_L$$

$$\phi_L = \begin{cases} 1 & \text{si } T_L = T_f \\ 0 & \text{si } T_S = T_f \\ \frac{T - T_S}{T_L - T_S} & \text{si } T_S < T < T_L \end{cases}$$



Mur avec MCP

## Mesures, résistances thermiques

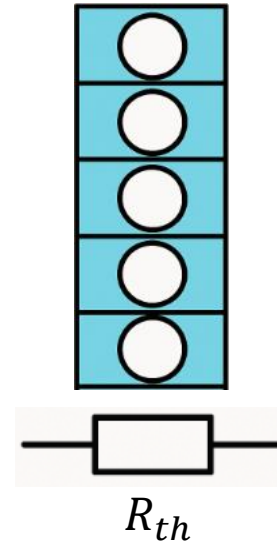
### Modélisation du changement d'état :

$$R_G = R_S \cdot (1 - \phi_L) + R_L \cdot \phi_L$$

$$\phi_L = \begin{cases} 1 & \text{si } T_L = T_f \\ 0 & \text{si } T_S = T_f \\ \frac{T - T_S}{T_L - T_S} & \text{si } T_S < T < T_L \end{cases}$$

$$R_S = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot r \cdot \lambda_S}$$

$$R_L = R_{cl} + R_{cv}$$



Mur avec MCP

## Mesures, résistances thermiques

### Modélisation du changement d'état :

$$R_G = R_S \cdot (1 - \phi_L) + R_L \cdot \phi_L$$

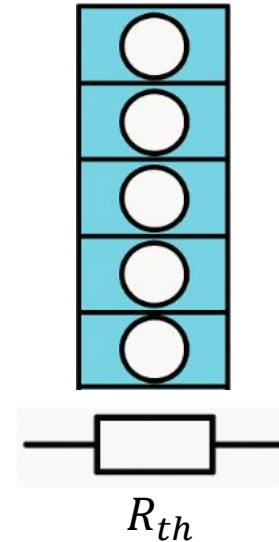
$$\phi_L = \begin{cases} 1 & \text{si } T_L = T_f \\ 0 & \text{si } T_S = T_f \\ \frac{T - T_S}{T_L - T_S} & \text{si } T_S < T < T_L \end{cases}$$

$$R_S = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot r \cdot \lambda_S}$$

$$R_L = R_{cl} + R_{cv}$$

$$R_{cl} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot r \cdot \lambda_L}$$

$$R_{cv} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h}$$



Mur avec MCP

## Mesures, résistances thermiques

### Modélisation du changement d'état :

$$R_G = R_S \cdot (1 - \phi_L) + R_L \cdot \phi_L$$

$$\phi_L = \begin{cases} 1 & \text{si } T_L = T_f \\ 0 & \text{si } T_S = T_f \\ \frac{T - T_S}{T_L - T_S} & \text{si } T_S < T < T_L \end{cases}$$

$$R_S = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot r \cdot \lambda_S}$$

$$R_L = R_{cl} + R_{cv}$$

$$R_{cl} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot r \cdot \lambda_L}$$

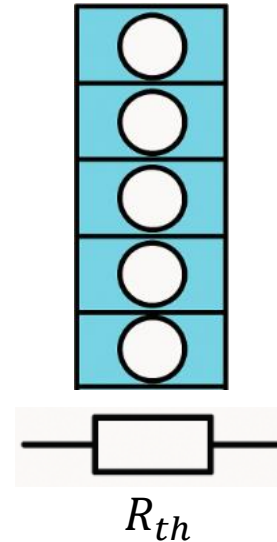
$$R_{cv} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h}$$

$$T_L = T_{chgt \text{ état}} + \varepsilon = 39^\circ\text{C}$$

Changement de phase  
lent et contrôlé

$$T_S = T_{chgt \text{ état}} - \varepsilon = 35^\circ\text{C}$$

Mur avec MCP



## Mesures, résistances thermiques

### Modélisation du changement d'état :

$$R_G = R_S \cdot (1 - \phi_L) + R_L \cdot \phi_L$$

$$\phi_L = \begin{cases} 1 & \text{si } T_L = T_f \\ 0 & \text{si } T_S = T_f \\ \frac{T - T_S}{T_L - T_S} & \text{si } T_S < T < T_L \end{cases}$$

$$R_S = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot r \cdot \lambda_S}$$

$$R_L = R_{cl} + R_{cv}$$

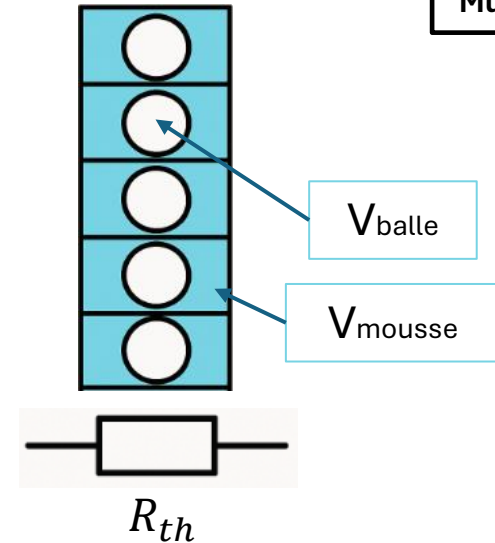
$$R_{cl} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot r \cdot \lambda_L}$$

$$R_{cv} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h}$$

$$T_L = T_{chgt \text{ état}} + \varepsilon = 39^\circ\text{C}$$

Changement de phase  
lent et contrôlé

$$T_S = T_{chgt \text{ état}} - \varepsilon = 35^\circ\text{C}$$



Hypothèse : les balles sont en parallèle

$$\frac{1}{R_{th}} = \frac{V_{balles}}{V_{total}} \cdot \frac{1}{R_G} + \frac{V_{mousse}}{V_{total}} \cdot \frac{1}{R_{mousse}}$$

## Mesures, résistances thermiques

### Modélisation du changement d'état :

$$R_G = R_S \cdot (1 - \phi_L) + R_L \cdot \phi_L$$

$$\phi_L = \begin{cases} 1 & \text{si } T_L = T_f \\ 0 & \text{si } T_S = T_f \\ \frac{T - T_S}{T_L - T_S} & \text{si } T_S < T < T_L \end{cases}$$

$$R_S = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot r \cdot \lambda_S}$$

$$R_L = R_{cl} + R_{cv}$$

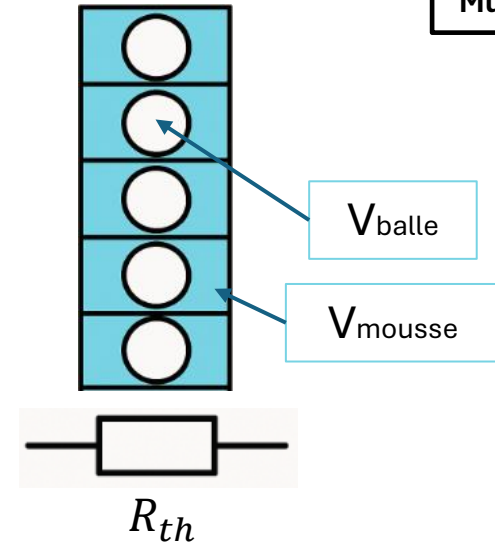
$$R_{cl} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot r \cdot \lambda_L}$$

$$R_{cv} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h}$$

$$T_L = T_{\text{chgt état}} + \varepsilon = 39^\circ\text{C}$$

Changement de phase  
lent et contrôlé

$$T_S = T_{\text{chgt état}} - \varepsilon = 35^\circ\text{C}$$



Hypothèse : les balles sont en parallèle

$$\frac{1}{R_{th}} = \frac{V_{balles}}{V_{total}} \cdot \frac{1}{R_G} + \frac{V_{mousse}}{V_{total}} \cdot \frac{1}{R_{mousse}}$$

$$R_{th} = \frac{V_{total} \cdot R_G \cdot R_{mousse}}{V_{balles} \cdot R_{mousse} + V_{mousse} \cdot R_G}$$



## Mesures, résistances thermiques

### Modélisation du changement d'état :

$$R_G = R_S \cdot (1 - \phi_L) + R_L \cdot \phi_L$$

$$\phi_L = \begin{cases} 1 & \text{si } T_L = T_f \\ 0 & \text{si } T_S = T_f \\ \frac{T - T_S}{T_L - T_S} & \text{si } T_S < T < T_L \end{cases}$$

$$R_S = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot r \cdot \lambda_S}$$

$$R_L = R_{cl} + R_{cv}$$

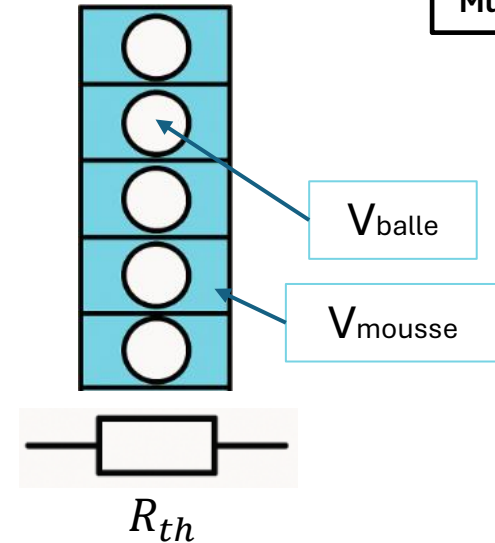
$$R_{cl} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot r \cdot \lambda_L}$$

$$R_{cv} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h}$$

$$T_L = T_{\text{chgt état}} + \varepsilon = 39^\circ\text{C}$$

Changement de phase  
lent et contrôlé

$$T_S = T_{\text{chgt état}} - \varepsilon = 35^\circ\text{C}$$



### Hypothèse : les balles sont en parallèle

$$\frac{1}{R_{th}} = \frac{V_{balles}}{V_{total}} \cdot \frac{1}{R_G} + \frac{V_{mousse}}{V_{total}} \cdot \frac{1}{R_{mousse}}$$

$$R_{th} = \frac{V_{total} \cdot R_G \cdot R_{mousse}}{V_{balles} \cdot R_{mousse} + V_{mousse} \cdot R_G}$$

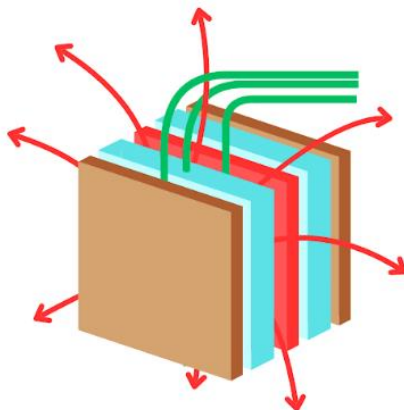
$$R_{th}^{exp} = 15 \text{ K/W}$$

**Mur avec MCP****Expérimentalement :**

$$R_{th}^{th} = 8 \text{ K/W}$$

**Théoriquement :**

$$R_{th}^{exp} = 15 \text{ K/W}$$

**Ecart de rapport d'environ 2 :**

- Pertes latérales
- Dégradation du mur
- Capteur pas vraiment au milieu d'une balle

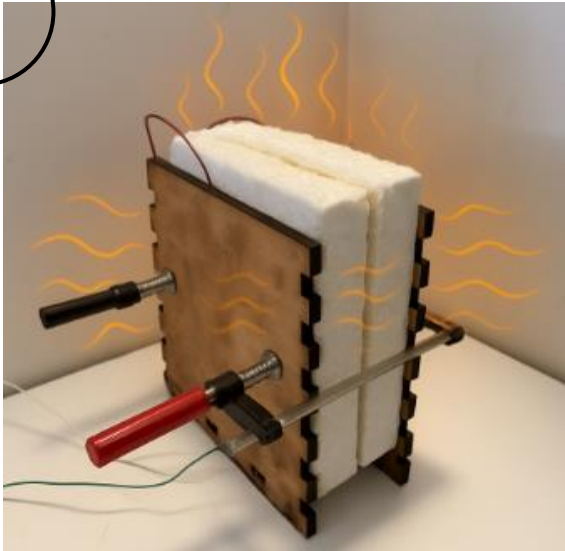
Mur	Capacité thermique	Résistance thermique
Sans MCP	$c_{th}^{exp} = 6 \text{ J/g/K}$	$R_{th}^{exp} = 12 \text{ K/W}$
	$c_{th}^{th} = 1.5 \text{ J/g/K}$	$R_{th}^{th} = 24 \text{ K/W}$
Avec MCP	$c_{th}^{exp} = 7 \text{ J/g/K}$	$R_{th}^{exp} = 8 \text{ K/W}$
	$c_{th}^{th} = 5 \text{ J/g/K}$	$R_{th}^{th} = 15 \text{ K/W}$

# LE DEPHASAGE



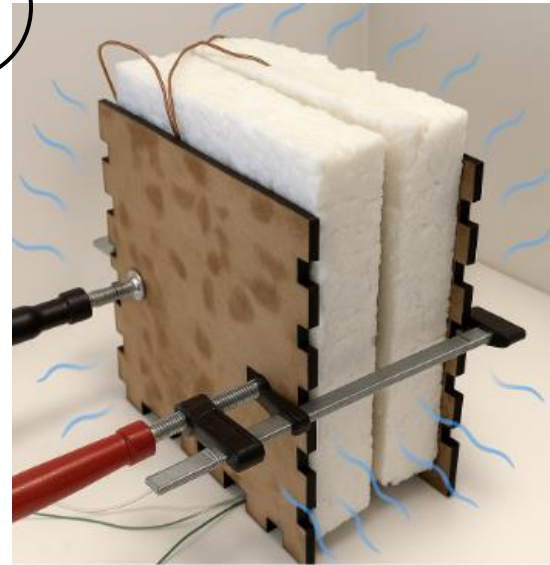
## Mesures, déphasage

1

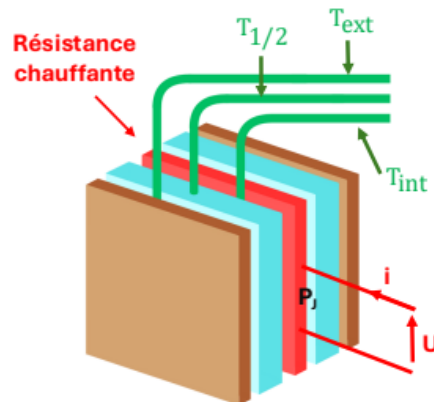


Chauffe du mur  
jusque 95°C

2



Refroidissement à  
l'air libre



Introduction

Objectifs

Le MCP

Conception du mur

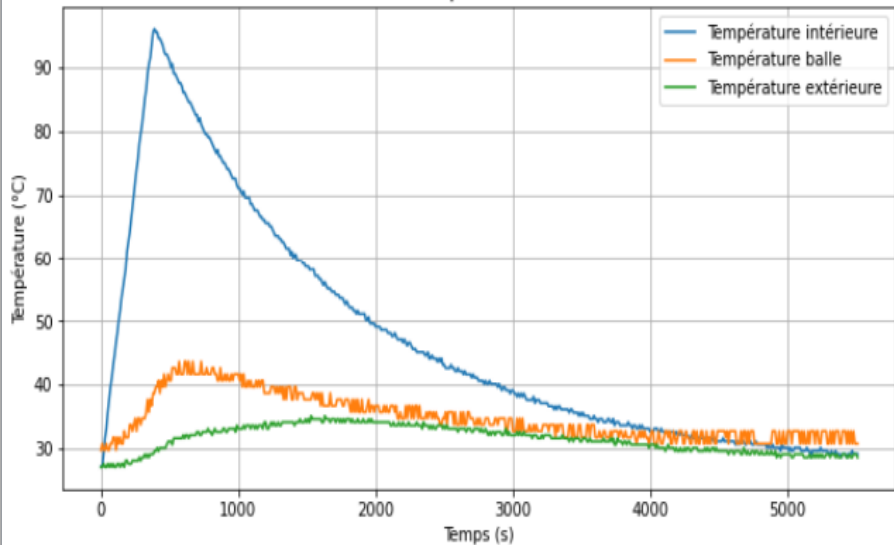
MESURES

Modélisation

Conclusion



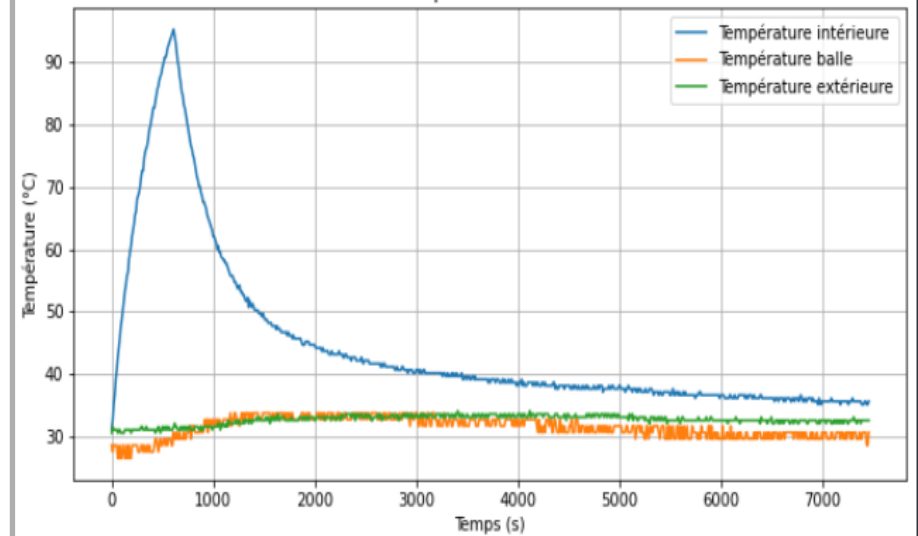
Evolution de la température dans le mur vide



Mur sans MCP



Evolution de la température dans le mur avec balle



Mur avec MCP



Introduction

Objectifs

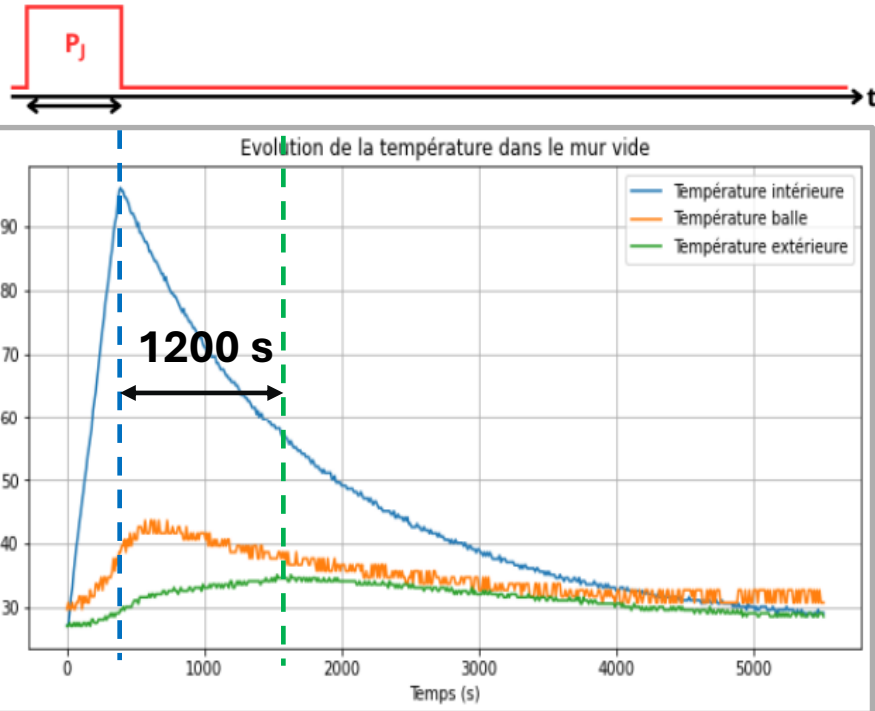
Le MCP

Conception du mur

MESURES

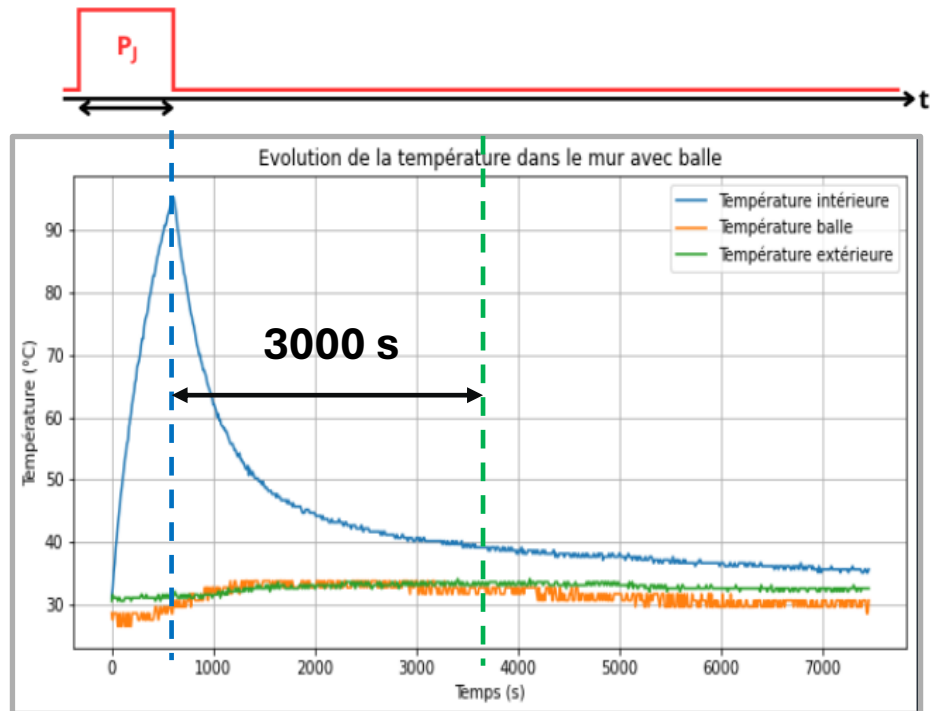
Modélisation

Conclusion



Mur sans MCP

Déphasage de 1200 secondes  
entre intérieur et extérieur



Mur avec MCP

Déphasage de 3000 secondes  
entre intérieur et extérieur



Introduction

Objectifs

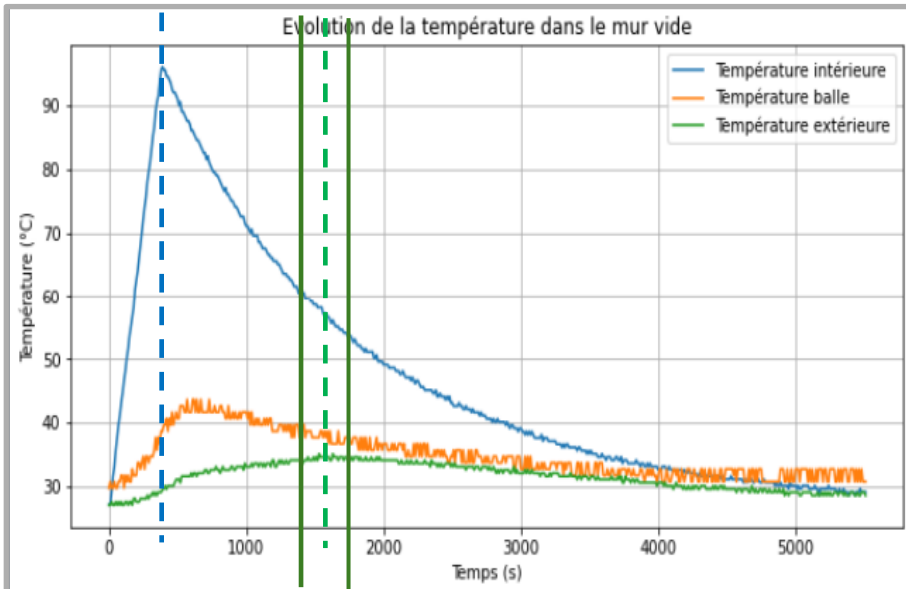
Le MCP

Conception du mur

MESURES

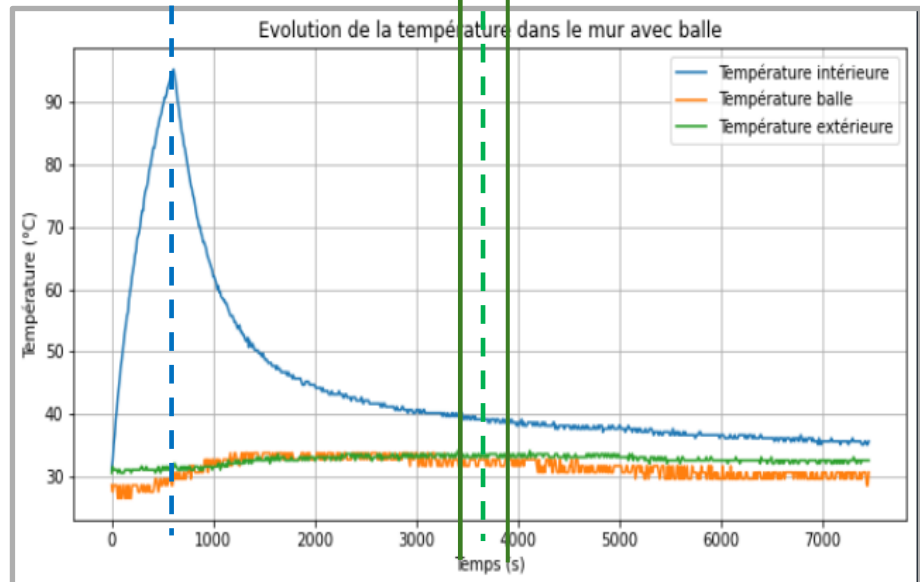
Modélisation

Conclusion



Mur sans MCP

- Déphasage de  $1200 \pm 200$  s



Mur avec MCP

+ Déphasage de  $3000 \pm 200$  s



→ Amélioration du confort thermique avec MCP



Introduction

Objectifs

Le MCP

Conception du mur

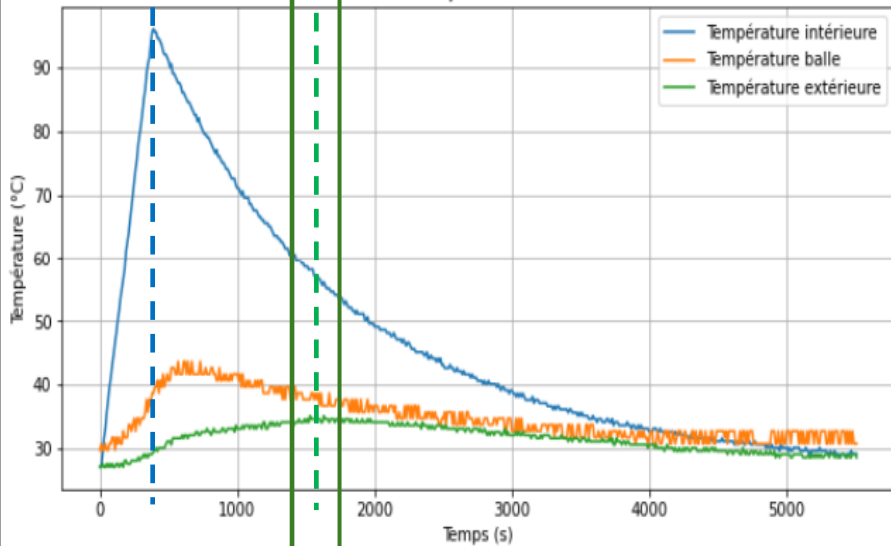
MESURES

Modélisation

Conclusion



Evolution de la température dans le mur vide



Mur sans MCP

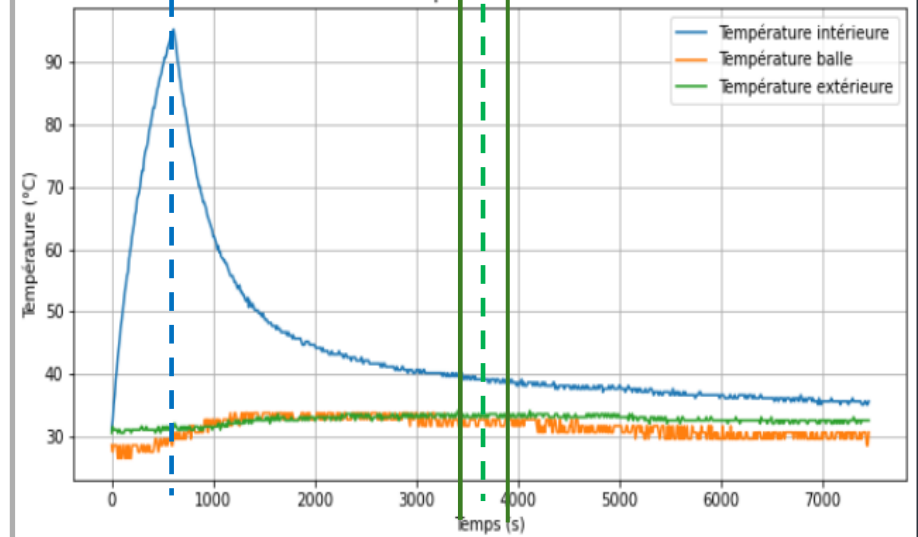
Déphasage de  $1200 \pm 200$  s

$$\Delta t \# \frac{e^2}{D_{\text{sans}}}$$

avec  $D = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$



Evolution de la température dans le mur avec balle



Mur avec MCP

Déphasage de  $3000 \pm 200$  s

$$\Delta t \# \frac{e^2}{D_{\text{avec}}}$$

avec  $D = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$

Introduction

Objectifs

Le MCP

Conception du mur

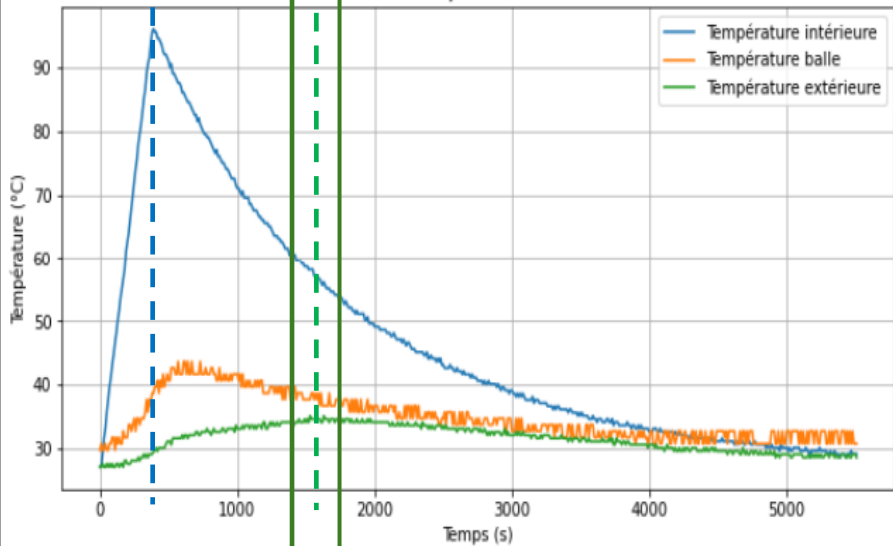
MESURES

Modélisation

Conclusion



Evolution de la température dans le mur vide



Mur sans MCP

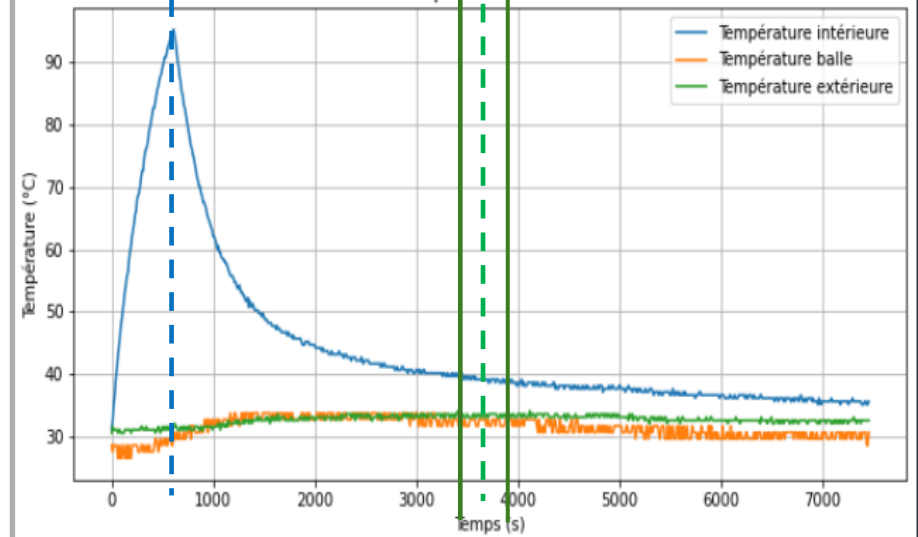
Déphasage de  $1200 \pm 200$  s

$$\Delta t \# \frac{e^2}{D_{\text{sans}}}$$

$$\text{avec } D = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$$

 $\Delta t \# 1800$  s

Evolution de la température dans le mur avec balle



Mur avec MCP

Déphasage de  $3000 \pm 200$  s

$$\Delta t \# \frac{e^2}{D_{\text{avec}}}$$

$$\text{avec } D = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$$

 $\Delta t \# 3600$  s

Mur	Capacité thermique	Résistance thermique	Déphasage
Sans MCP	$c_{th}^{exp} = 6 \text{ J/g/K}$	$R_{th}^{exp} = 12 \text{ K/W}$	$\varphi^{exp} = 1200 \text{ s}$
	$c_{th}^{th} = 1.5 \text{ J/g/K}$	$R_{th}^{th} = 24 \text{ K/W}$	$\varphi^{th} \# 1800 \text{ s}$
Avec MCP	$c_{th}^{exp} = 7 \text{ J/g/K}$	$R_{th}^{exp} = 8 \text{ K/W}$	$\varphi^{exp} = 3000 \text{ s}$
	$c_{th}^{th} = 5 \text{ J/g/K}$	$R_{th}^{th} = 15 \text{ K/W}$	$\varphi^{th} \# 3600 \text{ s}$

# **VALIDATION DU MODELE PAR SIMULATION NUMERIQUE**

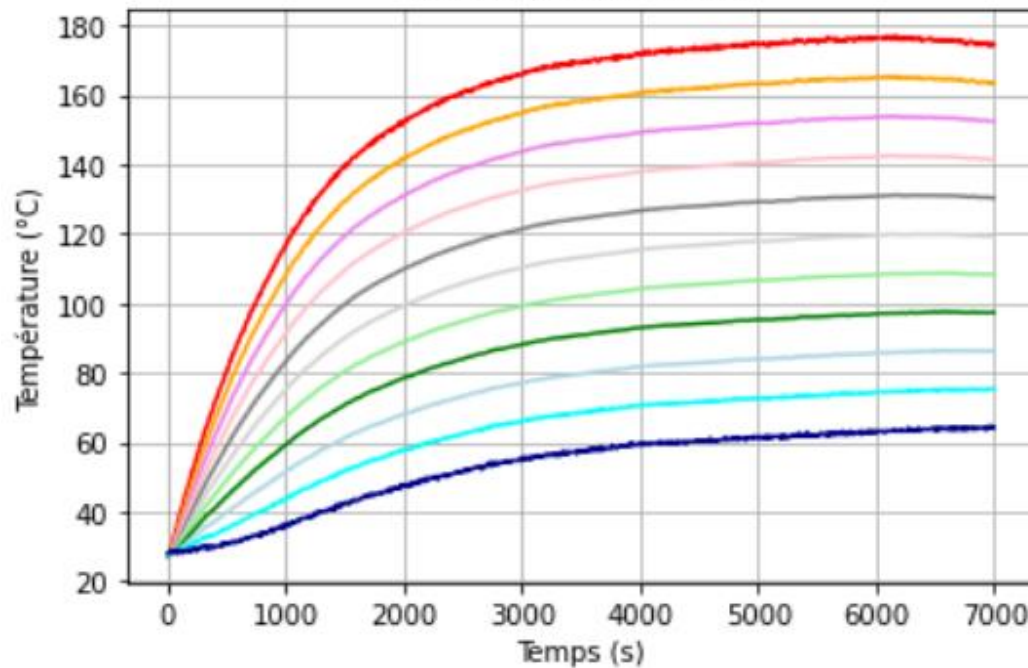


## Modélisation numérique, SANS MCP

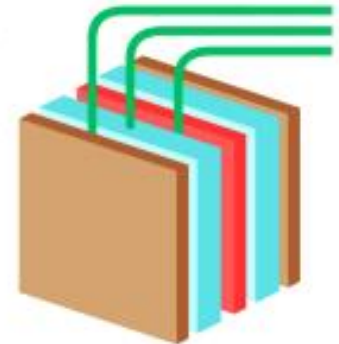
### Equation de chaleur :

$$T_j^{n+1} = T_j^n + \Delta t \cdot D \cdot \frac{T_{j-1}^n - 2 \cdot T_j^n + T_{j+1}^n}{\Delta z^2}$$

Simulation sans balle



— Tint  
 — T1/10  
 — T2/10  
 — T3/10  
 — T4/10  
 — T5/10  
 — T6/10  
 — T7/10  
 — T8/10  
 — T9/10  
 — T<sub>ext</sub>



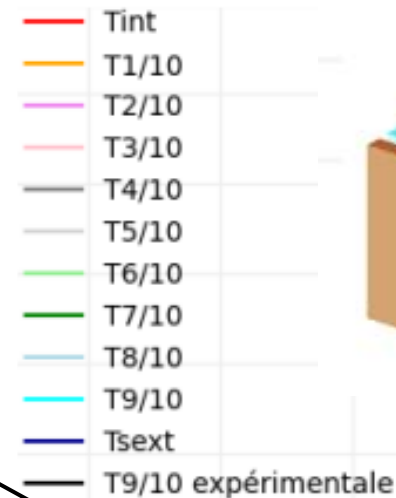
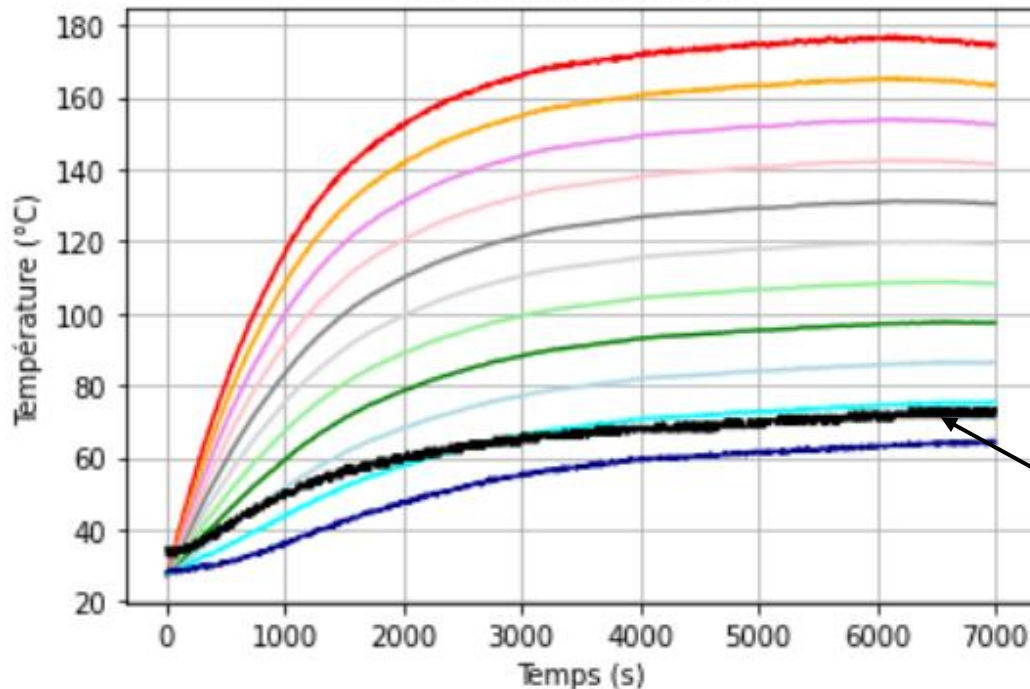
Températures simulées pour chaque 10<sup>ème</sup> de l'épaisseur du mur

## Modélisation numérique, SANS MCP

### Equation de chaleur :

$$T_j^{n+1} = T_j^n + \Delta t \cdot D \cdot \frac{T_{j-1}^n - 2 \cdot T_j^n + T_{j+1}^n}{\Delta z^2}$$

Simulation sans balle



Ajout des valeurs  
expérimentale



Températures simulées pour chaque 10<sup>ième</sup> de l'épaisseur du mur

Introduction

Objectifs

Le MCP

Conception du mur

Mesures

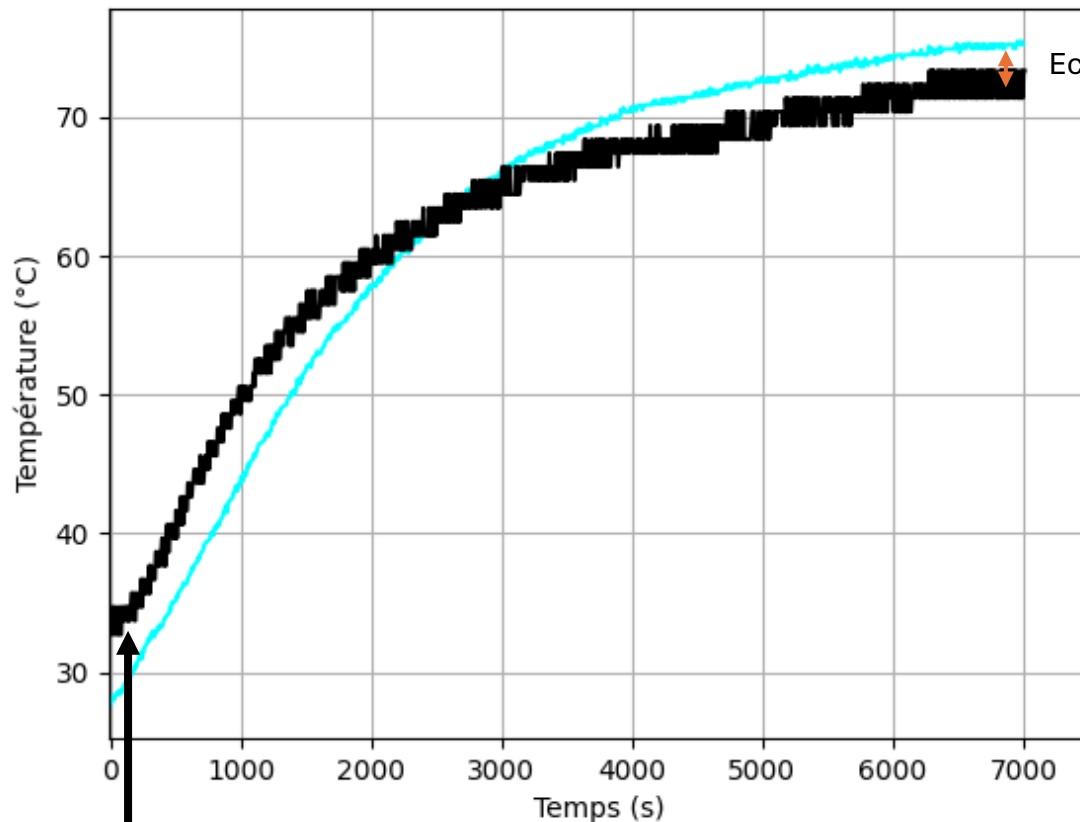
**SIMULATION**

Conclusion

## Comparaison sans MCP

**Valeurs expérimentales  
interpolées**

Simulation sans balle



Ecart : 2°C

Pertes thermiques  
dans le modèle  
expérimental

— T9/10

— T9/10 expérimentale



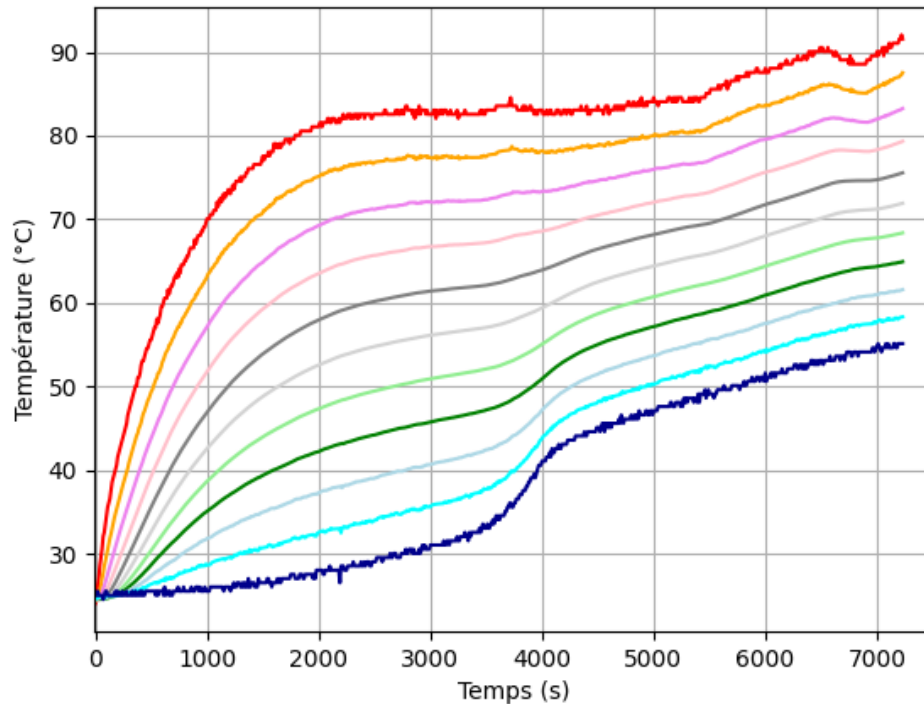
Mur encore chaud avant la mesure

## Modélisation numérique, AVEC MCP

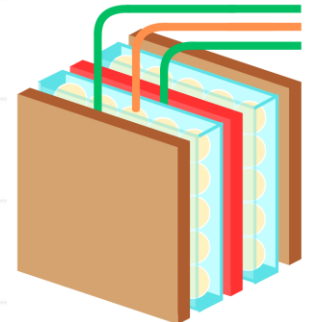
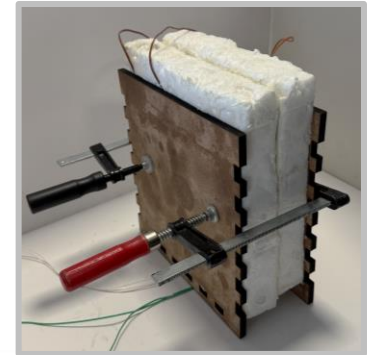
### Equation de chaleur :

$$T_j^{n+1} = T_j^n + \Delta t \cdot D \cdot \frac{T_{j-1}^n - 2 \cdot T_j^n + T_{j+1}^n}{\Delta z^2}$$

Simulation avec balle



— Tint  
 — T1/10  
 — T2/10  
 — T3/10  
 — T4/10  
 — T5/10  
 — T6/10  
 — T7/10  
 — T8/10  
 — T9/10  
 — Tsext



Températures simulées pour chaque 10<sup>ième</sup> de l'épaisseur du mur

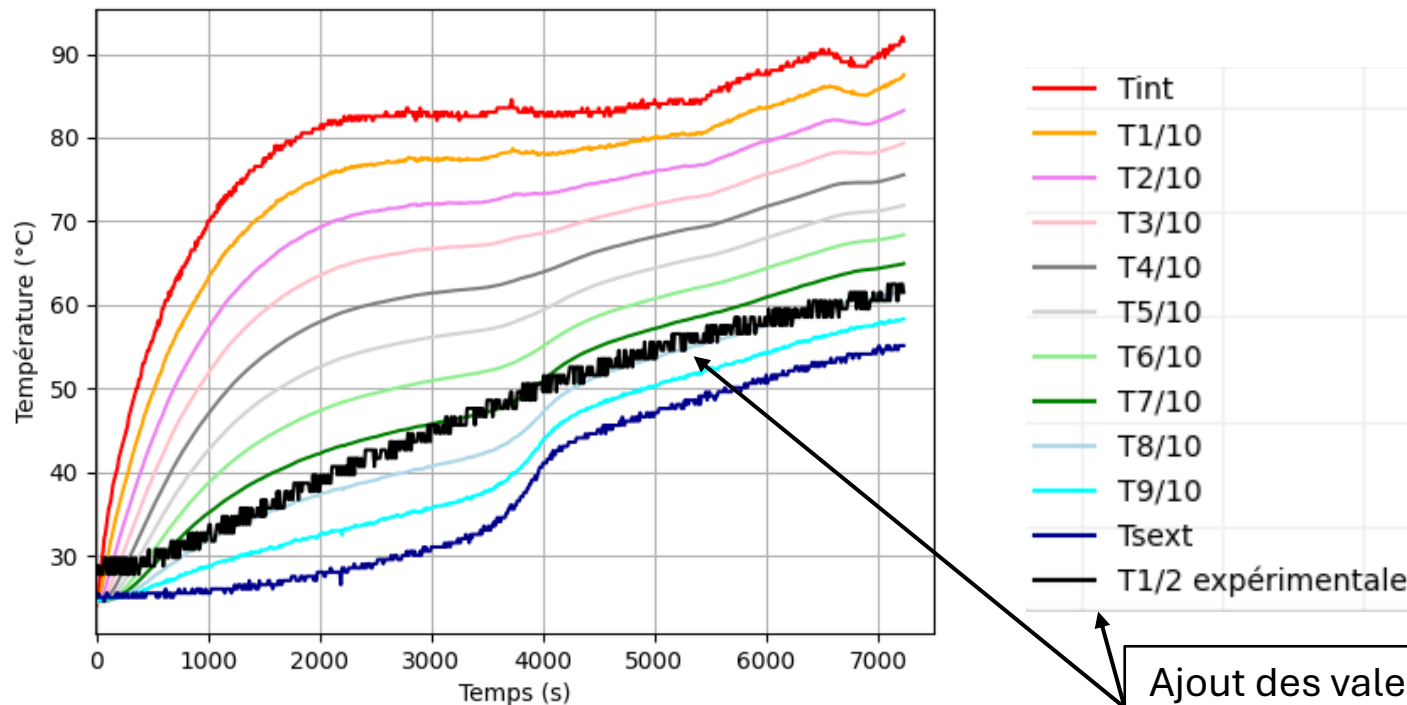


## Modélisation numérique, AVEC MCP

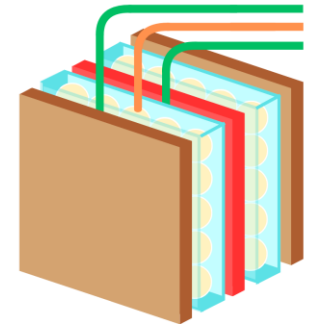
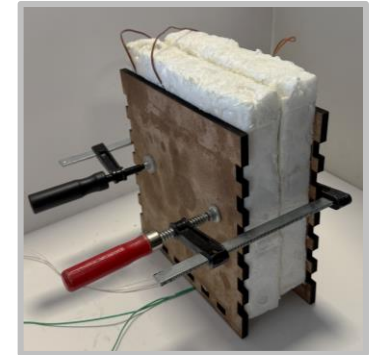
### Equation de chaleur :

$$T_j^{n+1} = T_j^n + \Delta t \cdot D \cdot \frac{T_{j-1}^n - 2 \cdot T_j^n + T_{j+1}^n}{\Delta z^2}$$

Simulation avec balle



Ajout des valeurs  
expérimentale



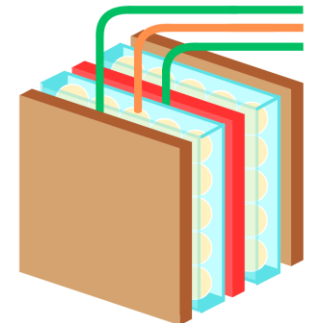
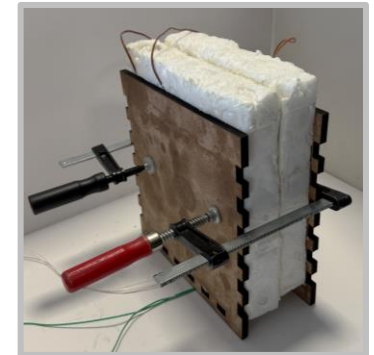
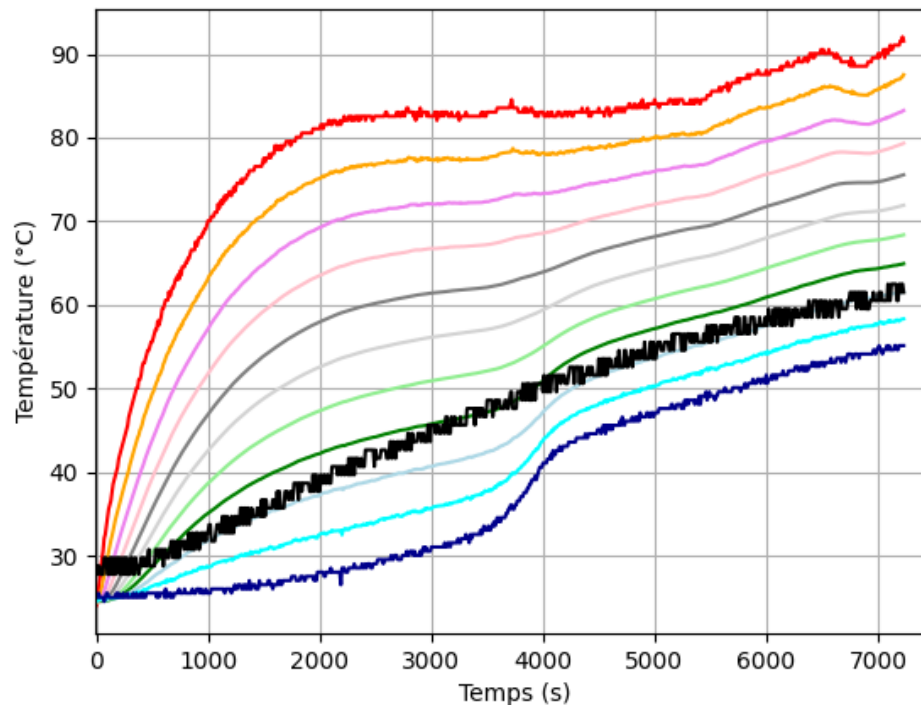
Températures simulées pour chaque 10<sup>ème</sup> de l'épaisseur du mur

## Modélisation numérique, AVEC MCP

### Equation de chaleur :

$$T_j^{n+1} = T_j^n + \Delta t \cdot D \cdot \frac{T_{j-1}^n - 2 \cdot T_j^n + T_{j+1}^n}{\Delta z^2}$$

Simulation avec balle



**Courbe expérimentale semblable à 8/10**

► Capteur excentré



Mur	Capacité thermique	Résistance thermique	Déphasage	Rapprochement par rapport à la simulation
Sans MCP	$c_{th}^{exp} = 6 \text{ J/g/K}$	$R_{th}^{exp} = 12 \text{ K/W}$	$\varphi^{exp} = 1200 \text{ s}$	
	$c_{th}^{th} = 1.5 \text{ J/g/K}$	$R_{th}^{th} = 24 \text{ K/W}$	$\varphi^{th} \# 1800 \text{ s}$	
Avec MCP	$c_{th}^{exp} = 7 \text{ J/g/K}$	$R_{th}^{exp} = 8 \text{ K/W}$	$\varphi^{exp} = 3000 \text{ s}$	
	$c_{th}^{th} = 5 \text{ J/g/K}$	$R_{th}^{th} = 15 \text{ K/W}$	$\varphi^{th} \# 3600 \text{ s}$	

Introduction

Objectifs

Le MCP

Conception  
du mur

Mesures

Simulation

**CONCLUSION**

## Retour sur l'introduction

### LAINES DE VERRE



$$R_{th} = 1,14 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Déphasage (4 cm) : 9 min

### LAINES DE BOIS

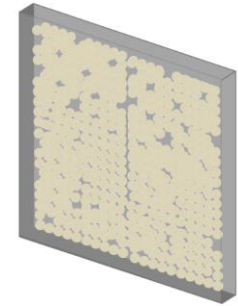


$$R_{th} = 1 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Déphasage (4 cm) : 29 min

## TIPE

### MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE



$$R_{th} = 0.4 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Déphasage (4 cm) : 50 min

## Retour sur l'introduction

### LAINES DE VERRE



$$R_{th} = 1,14 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Déphasage (4 cm) : 9 min

### LAINES DE BOIS



$$R_{th} = 1 \text{ m}^2\text{K/W}$$

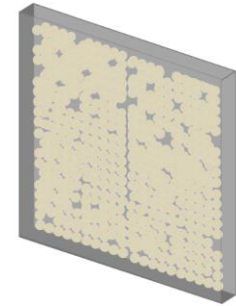
Déphasage (4 cm) : 29 min

### Conclusion :

Utile pour le confort estival : la chaleur accumulée la journée est restituée le soir lorsqu'elle est moins dérangeante

## TIPE

### MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE



$$R_{th} = 0.4 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Déphasage (4 cm) : 50 min

Introduction

Objectifs

Le MCP

Conception  
du mur

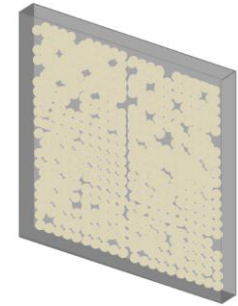
Mesures

Simulation

**CONCLUSION**

## TIPE

### MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE



$$R_{th} = 0.4 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Déphasage (4 cm) : 50 min

### LAIN DE VERRE



$$R_{th} = 1,14 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Déphasage (4 cm) : 9 min

### LAIN DE BOIS



$$R_{th} = 1 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Déphasage (4 cm) : 29 min

### Conclusion :

Utile pour le confort estival : la chaleur accumulée la journée est restituée le soir lorsqu'elle est moins dérangement

Dans le contexte climatique et économique : le MCP retarde les pics de chaleurs



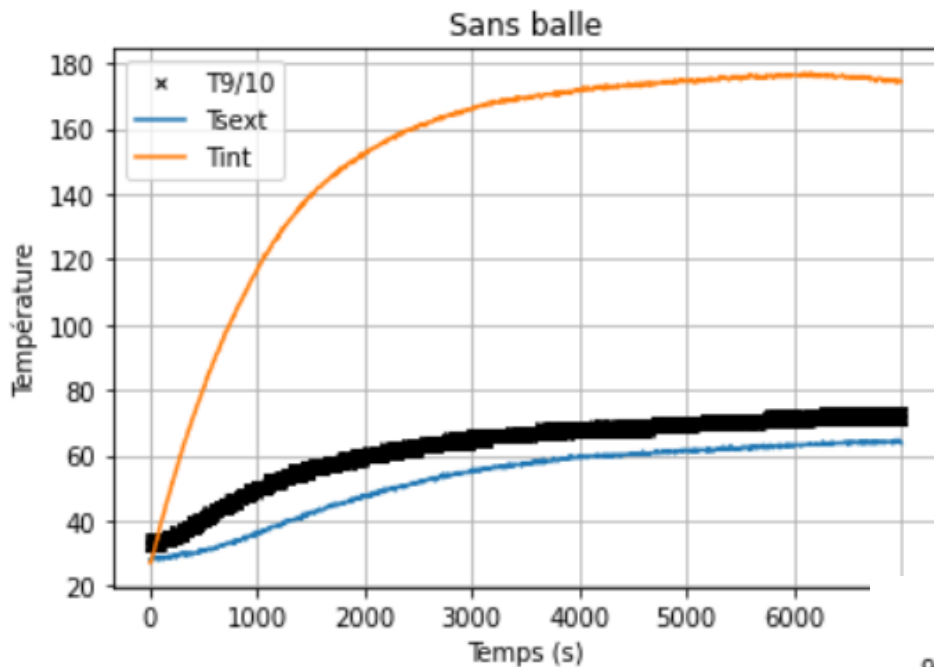
**MERCI POUR  
VOTRE ECOUTE !**



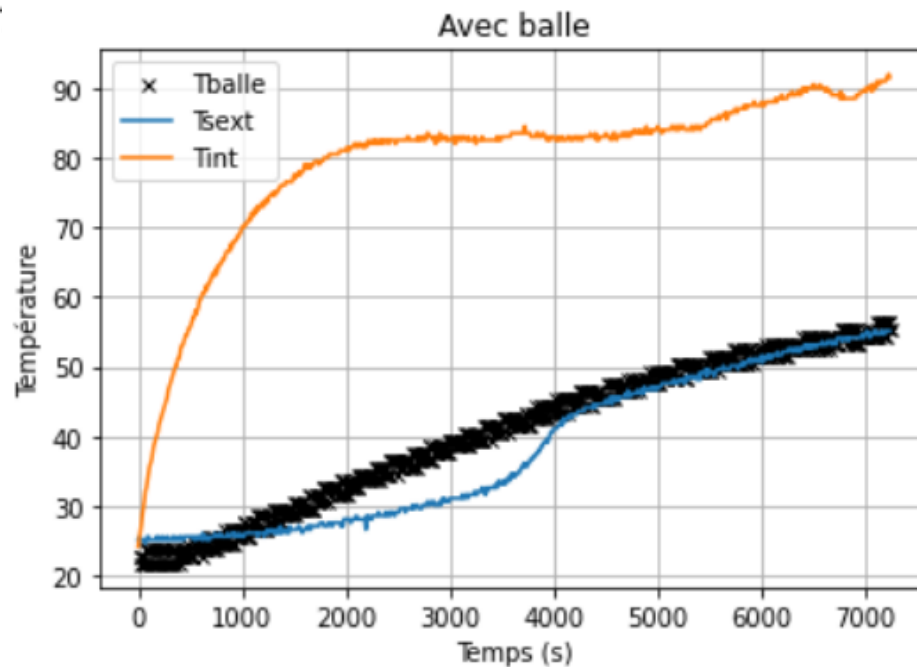
**ANNEXE**



# ANNEXE



*Courbe de chauffe*



*Courbe de chauffe*

Introduction

Objectifs

Le MCP

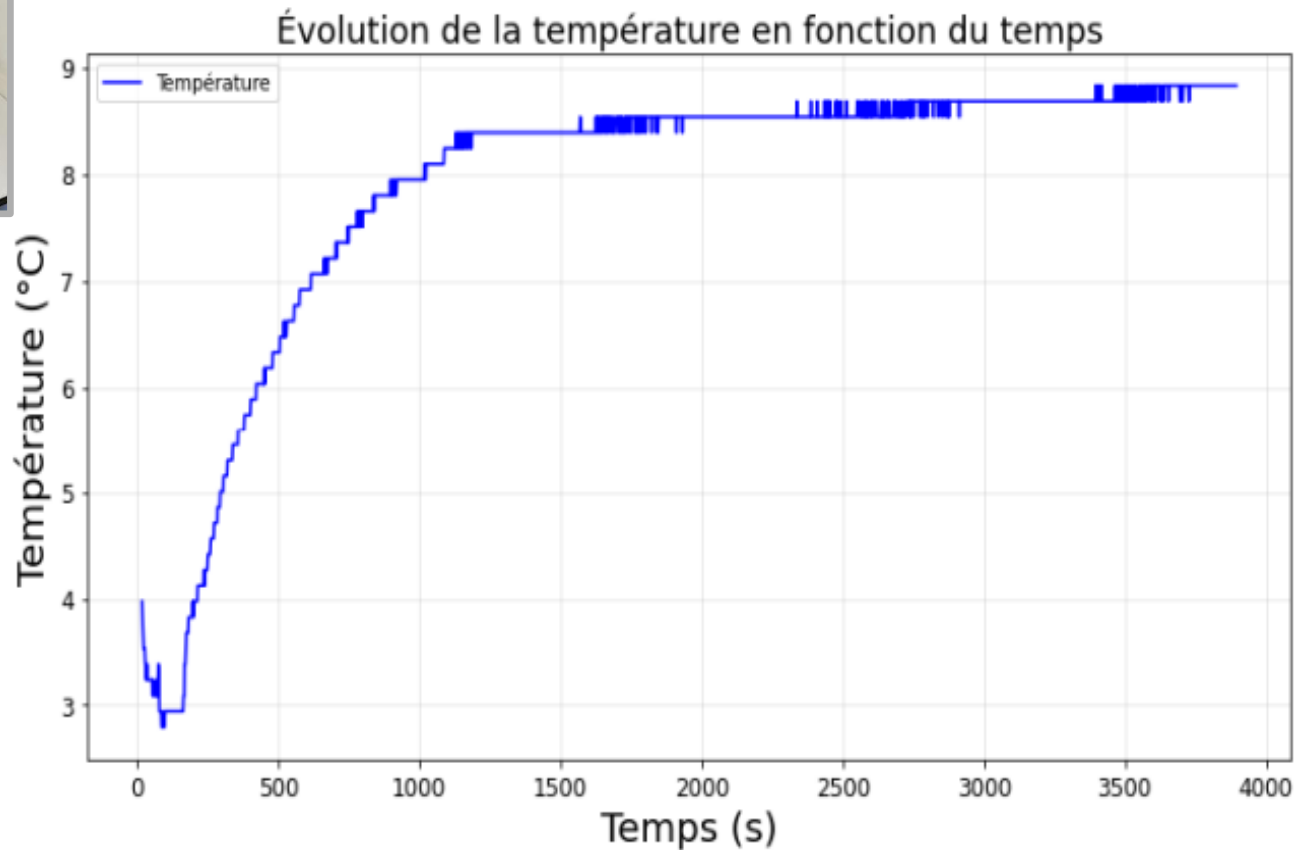
Conception du  
mur

MESURES

Modélisation

Conclusion

## Mesures, capacité thermique



*Calorimétrie pour notre MCP*

Introduction

Objectifs

Le MCP

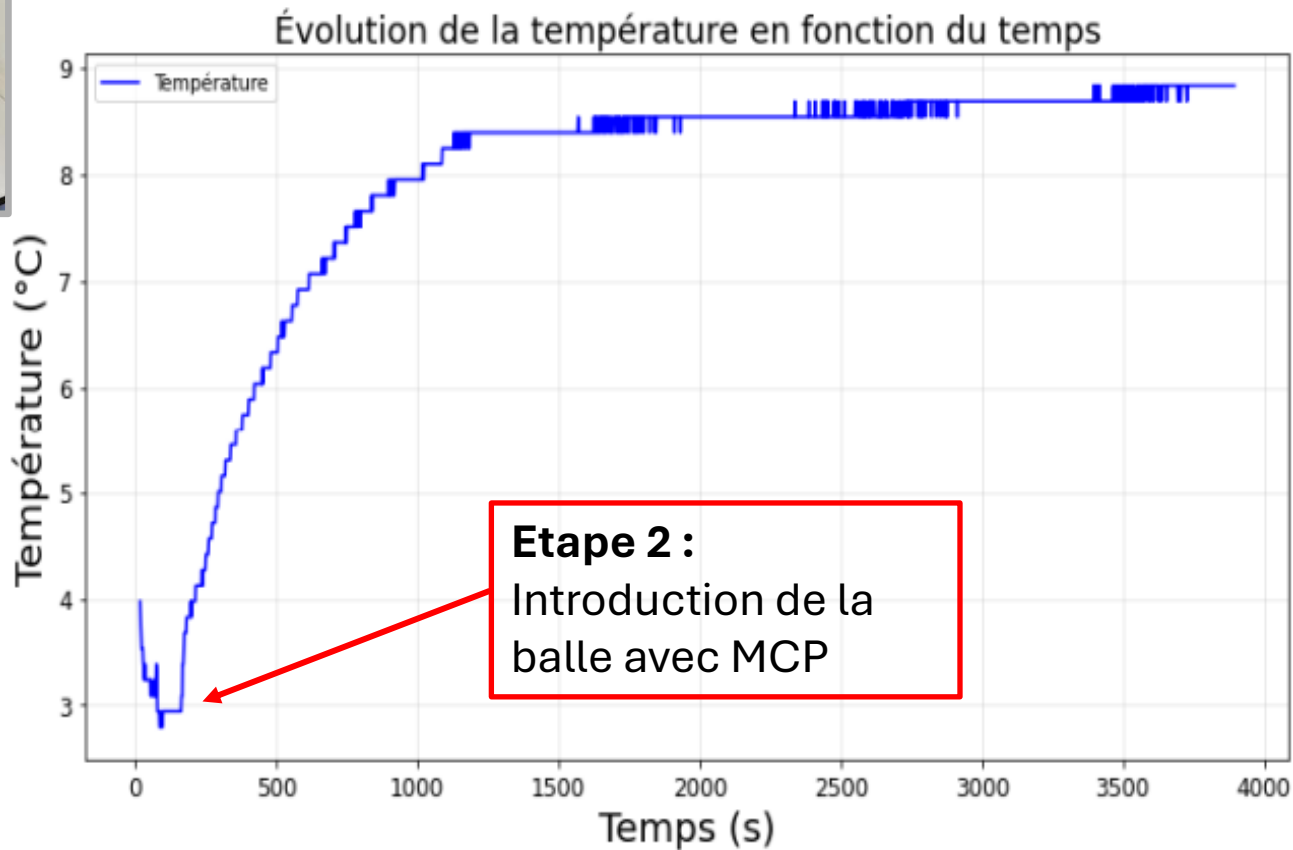
Conception du  
mur

**MESURES**

Modélisation

Conclusion

## Mesures, capacité thermique



*Calorimétrie pour notre MCP*

Introduction

Objectifs

Le MCP

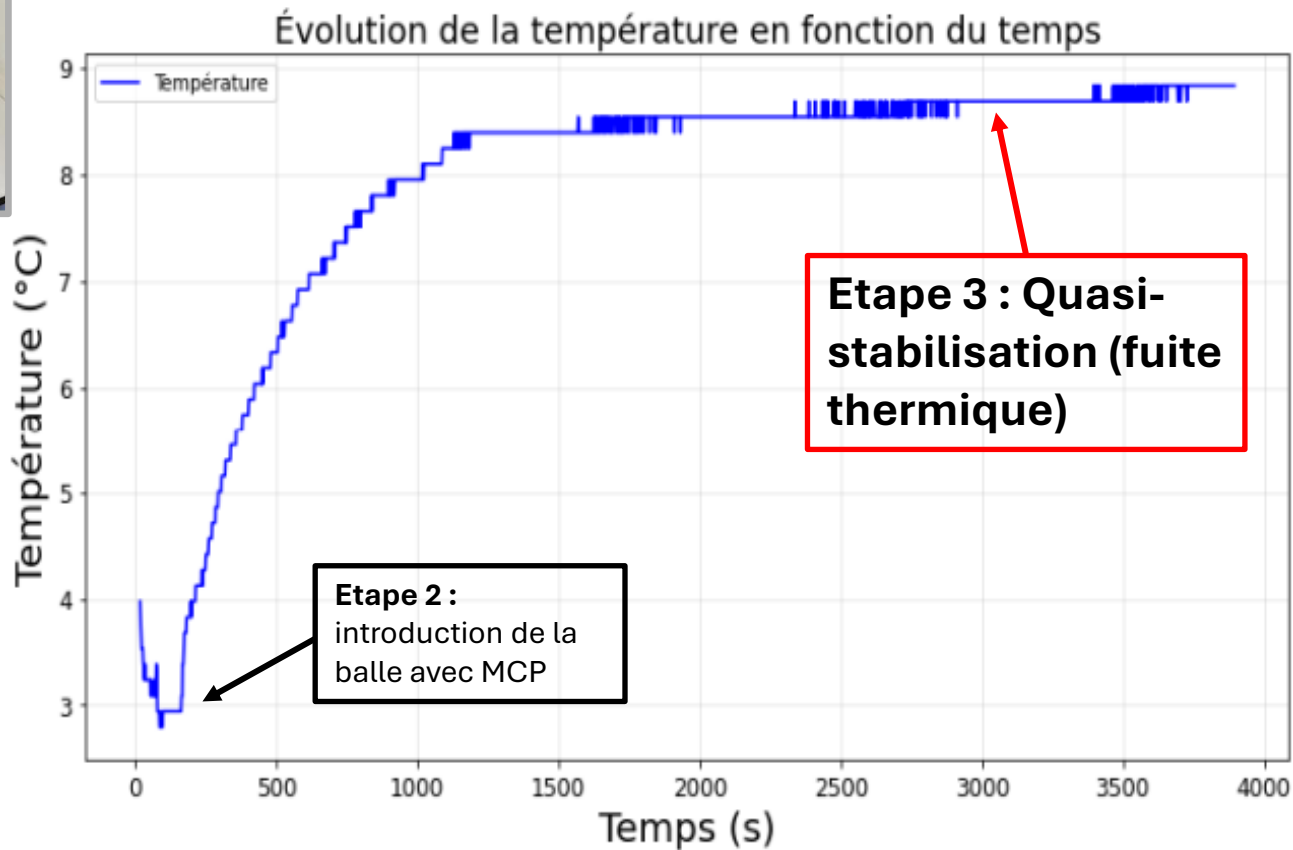
Conception du  
mur

**MESURES**

Modélisation

Conclusion

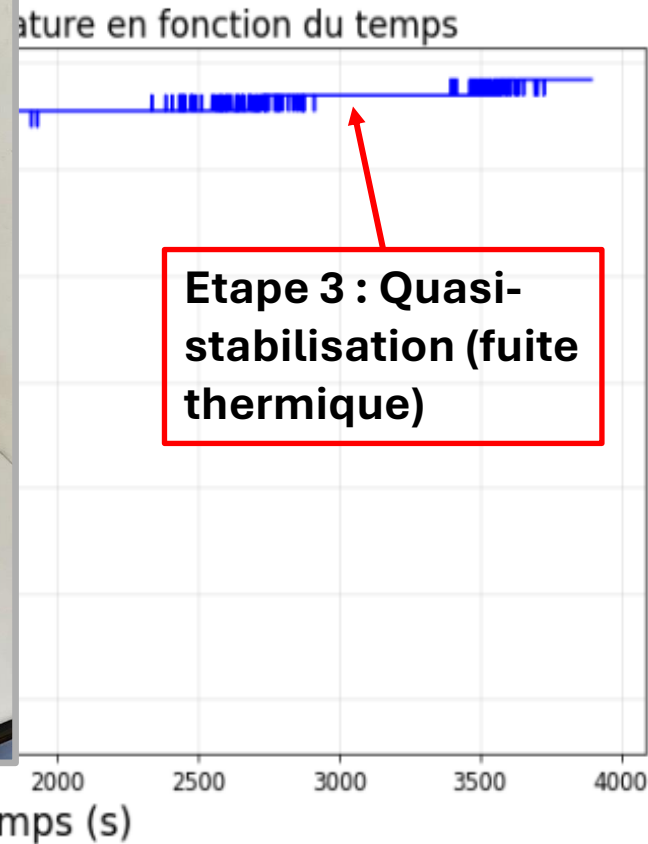
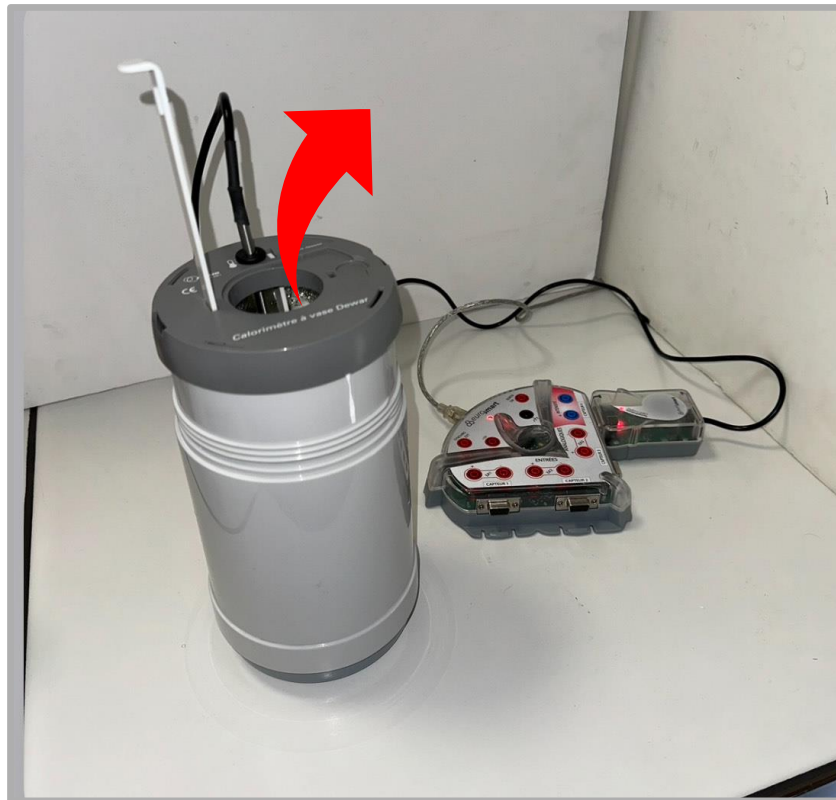
## Mesures, capacité thermique



*Calorimétrie pour notre MCP*



## Mesures, capacité thermique



*Calorimétrie pour notre MCP*

Introduction

Objectifs

Le MCP

Conception du mur

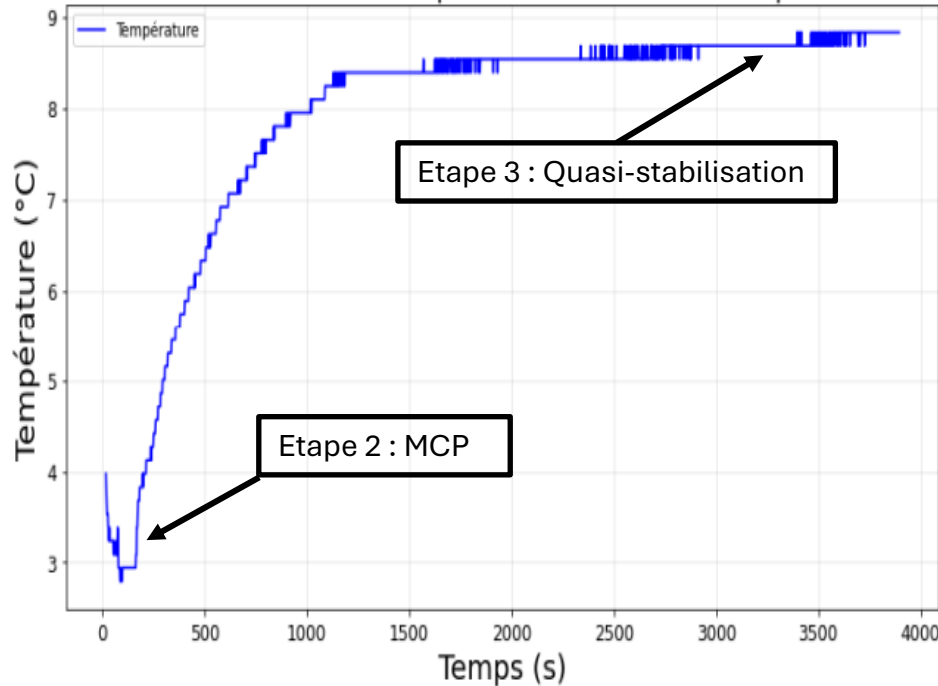
**MESURES**

Modélisation

Conclusion

## Mesures, capacité thermique

Évolution de la température en fonction du temps



$$m_1 c_{eau} (T_f - T_0) + m_2 c_x (T_f - T_2) + C_{calo} (T_f - T_0) = 0$$

### Résultats expérimentaux :

$$c_{eau} = 4,2 \text{ J/g/K}$$

$$c_{balle} = \text{négligeable}$$

$$c_{MCP} = 1,4 \text{ J/g/K}$$

$$C_{calo} = 2000 \text{ J/K}$$

$$c_{mousse} = 6,2 \text{ J/g/K}$$

### Résultats théoriques :

$$c_{MCP}^{th} = 0,9 \cdot c_{huile}^{th} + 0,1 \cdot c_{paraffine}^{th}$$

$$c_{MCP}^{th} = 1,37 \text{ J/g/K}$$



### **MCP Organiques :**

- Paraffines : sous-produits de distillation de pétrole (20 à 90 °C)
- Mélange organique : mélange d'alcane (plus la chaîne carbonée est longue, plus le point de fusion est haut)
- Acide gras



### **MCP Inorganiques :**

- Sels hydratés (grande densité énergétique, faible expansion volumique, bonne conductivité thermique)
- Métaux (peu utilisés en raison de leur poids)



### **MCP eutectiques :**

- Mélange de deux corps purs ou plus qui change d'état à température constante (les plus utilisés d'après la littérature pour le stockage d'énergie)

Introduction

Objectifs

Le MCP

Conception du mur

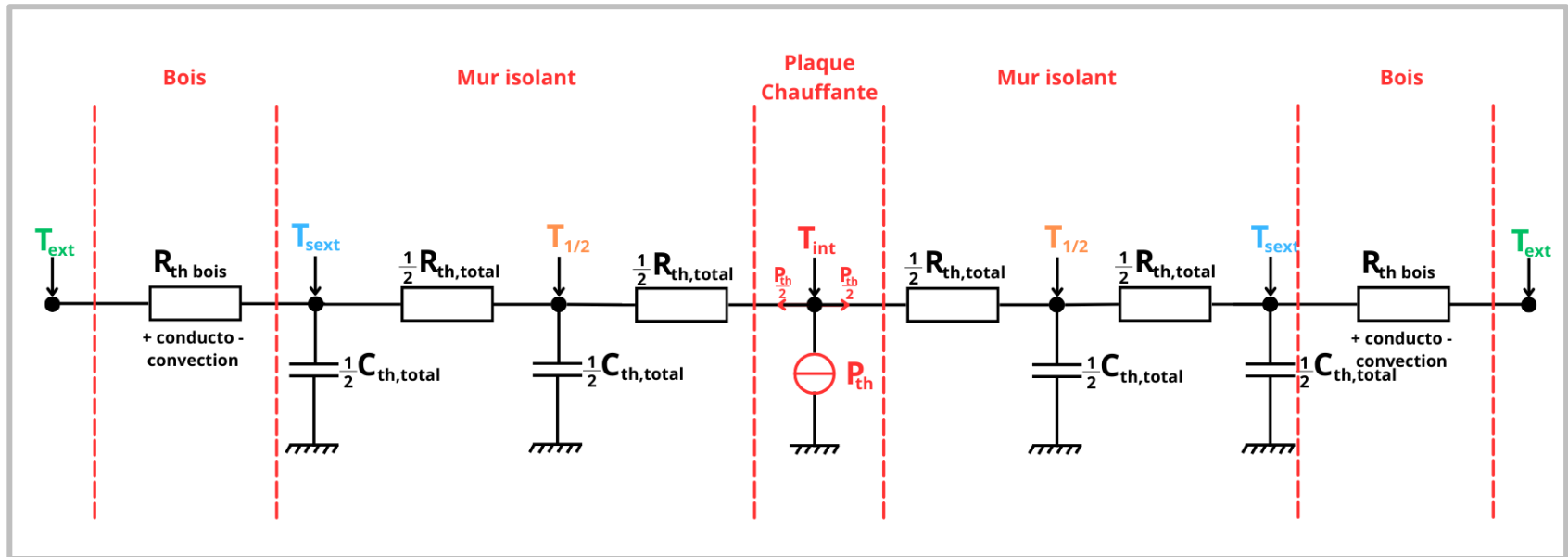
MESURES

Modélisation

Conclusion

## Mesures, résistances thermiques

Mur avec MCP



$$R_G = R_S \cdot (1 - \phi_L) + R_L \cdot \phi_L$$

$$\frac{1}{R_{th, total}} = \frac{V_{balles}}{V_{total}} \cdot \frac{1}{R_G} + \frac{V_{mousse}}{V_{total}} \cdot \frac{1}{R_{mousse}}$$

$$C_{th, total} = \frac{V_{balles}}{V_{total}} \cdot C_{MCP} + \frac{V_{mousse}}{V_{total}} \cdot C_{mousse}$$