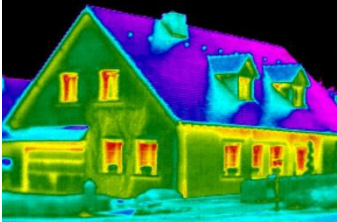


Objectif : Initiation à la thermique

Support	Déroulement	Activités
	Contexte - Présentation	<ul style="list-style-type: none"> Quelques rappels sur la thermique du bâtiment
	1. Les paramètres à retenir	<ul style="list-style-type: none"> Découverte des symboles ou blocks thermiques
	2. La thermique avec Simulink	<ul style="list-style-type: none"> Réalisation du modèle sous simulink
	3. Modèle du caisson	<ul style="list-style-type: none"> Mise en place de capteurs pour visualiser les paramètres
	4. Résultats	
	5. Compléments	

CONTEXTE – PRÉSENTATION

Présentation de notre caisson

Des élèves de SSI ont fabriqué un caisson thermique en vue d'étudier l'impact des isolant dans une structure. Pour cela ils ont utilisés la base d'une ossature bois pour réaliser le caisson et une ampoule à incandescence comme élément chauffant.



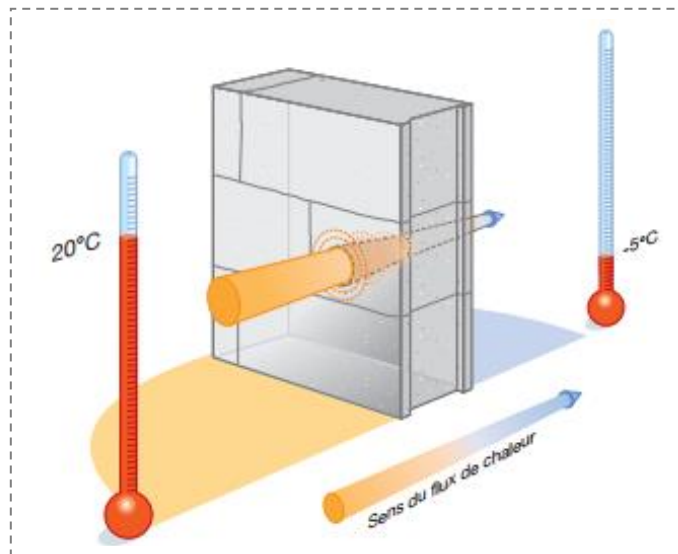
1. Les paramètres à retenir en thermique du bâtiment

Quelques rappels de connaissances

Le phénomène de conduction

C'est la transmission d'énergie de proche en proche dans la partie solide d'un matériau. La chaleur se propage avec plus ou moins de facilité suivant la nature, les caractéristiques et la géométrie du matériau.

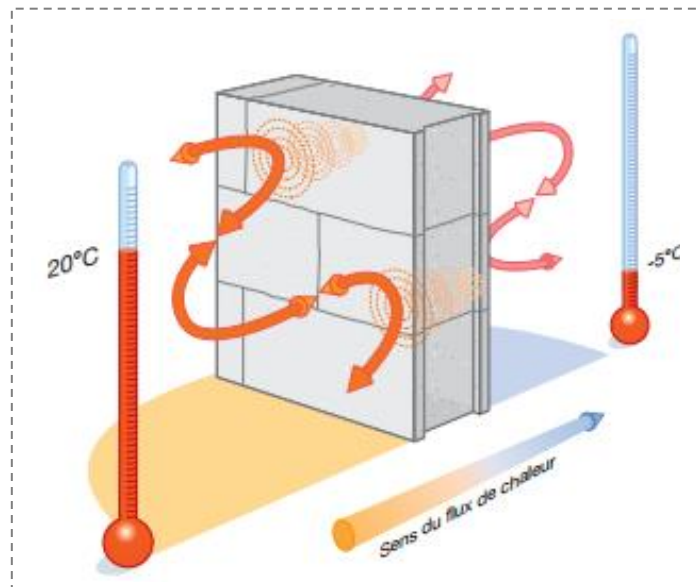
Plus le matériau est isolant, moins il y a de conduction



Le phénomène de convection

Ce mécanisme de transfert de chaleur est propre aux fluides (gaz ou liquide). Au contact d'un élément chaud, le fluide, de l'air par exemple, se met en mouvement et se déplace vers l'élément froid au contact duquel il perd sa chaleur en créant un mouvement vertical qui accélère les échanges thermiques entre les 2 éléments.

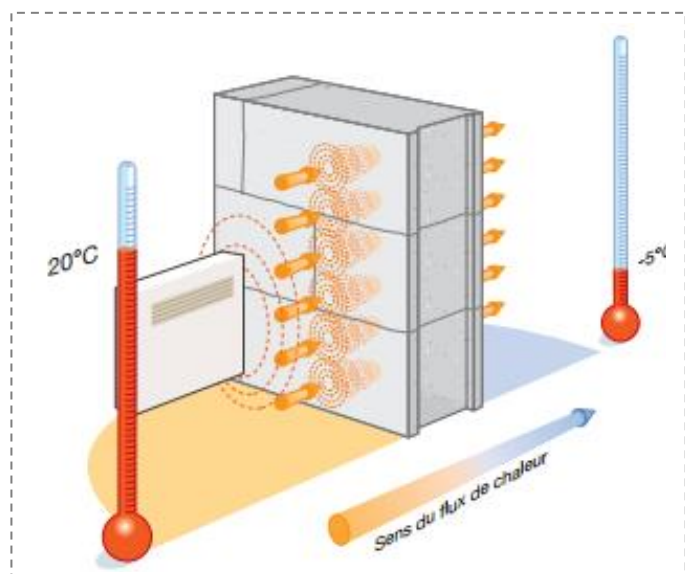
Plus l'air est immobile, moins il y a de convection



Le phénomène de rayonnement

C'est le transfert de chaleur d'un élément vers un autre par onde électromagnétique sans contact direct. Ce type de transfert ne nécessite pas de support matériel, il peut se faire dans le vide.

Plus l'émissivité du matériau est faible, moins il y aura de transfert par rayonnement



□ La conductivité thermique : λ

Elle représente l'aptitude d'un matériau à se laisser traverser par la chaleur.

Plus la conductivité est faible, plus un matériau est isolant.

Elle s'exprime en $W/(m.K)$ ou $W/(m.^{\circ}C)$

□ La résistance thermique d'un matériau : R

La résistance thermique caractérise la capacité d'un matériau à ralentir de transfert de chaleur réalisé par conduction.

Formule : $R = e/\lambda$

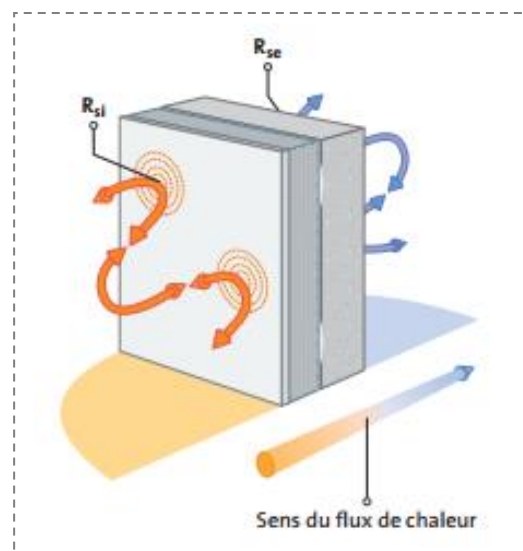
Avec e : épaisseur en mètre (m), λ : conductivité en $W/(m.K)$

Elle s'exprime donc en $(m^2.K)/W$ ou $(m^2.^{\circ}C)/W$

Plus la résistance thermique est élevée, plus un matériau est isolant.

□ La résistance superficielle d'une paroi : R_{se} et R_{si}

La résistance superficielle d'une paroi caractérise la part des échanges thermiques qui se réalise à la surface des parois par convection et rayonnement : R_{si} pour les échanges sur la surface de paroi interne et R_{se} pour les échanges sur la paroi externe.



Ces transferts thermiques sont caractérisés par les coefficients d'échange thermique superficiel nommés h_e et h_i .

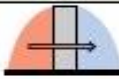


h_e : coefficient d'échange thermique superficiel entre une paroi et une ambiance extérieure en W/m^2K .

h_i : coefficient d'échange thermique superficiel entre une paroi et une ambiance intérieure en W/m^2K .

On définit, à partir de ces coefficients d'échange :

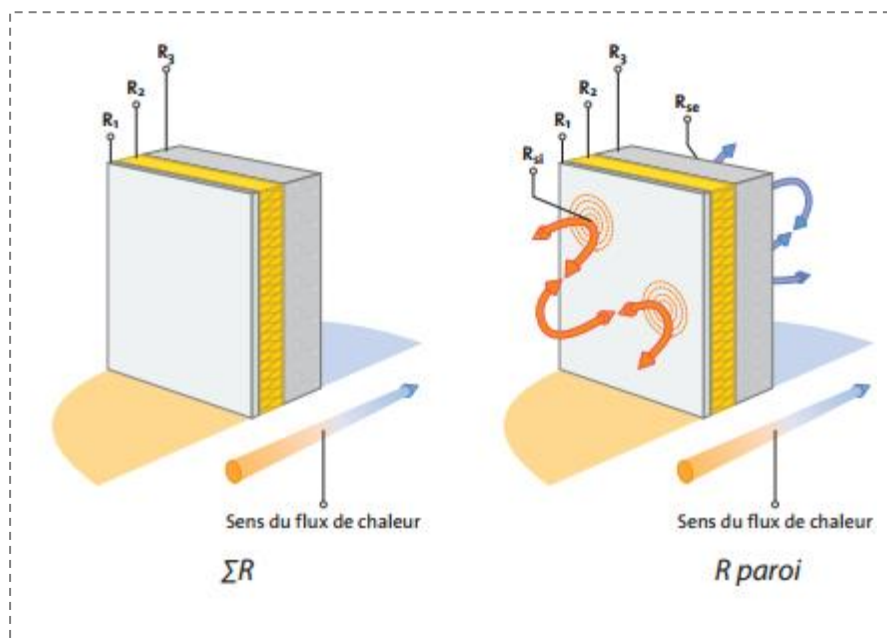
R_{si} : la résistance thermique d'échange d'une surface intérieure $\Rightarrow h_i = 1 / R_{si}$ en $m^2.K/W$.

R_{se} : la résistance thermique d'échange d'une surface extérieure $\Rightarrow h_e = 1 / R_{se}$ en $m^2.K/W$.

Résistances superficielles (en m ² .K/W)							
Sens du flux		Paroi donnant sur l'extérieur			Paroi donnant sur un local non chauffé		
		R _{si}	R _{se}	R _{si} + R _{se}	R _{si}	R _{se}	R _{si} + R _{se}
Horizontal		0,13	0,04	0,17	0,13	0,13	0,26
Ascendant		0,10	0,04	0,14	0,10	0,10	0,20
Descendant		0,17	0,04	0,21	0,17	0,17	0,34

□ La résistance thermique d'une paroi homogène

La résistance thermique totale d'une paroi homogène caractérise la somme des transferts de chaleur réalisés par conduction et des échanges thermiques superficiels réalisés par convection et rayonnement.



Elle se calcule en additionnant :

$$R_{paroi} = \Sigma R + R_{si} + R_{se}$$

Elle s'exprime en (m².K)/W

□ Notion de flux de chaleur

On appelle flux de chaleur traversant une surface donnée, la quantité de chaleur qui s'écoule pendant l'unité de temps.

La chaleur se déplace du corps le plus chaud vers le corps le plus froid jusqu'à ce que la température s'équilibre. Tous les corps, solides, liquides ou gazeux subissent ce phénomène de d'échange de chaleur. L'utilisation de matériaux isolants ou conducteurs permet d'intervenir sur l'intensité de la chaleur transmise.

L'unité de mesure légale de la chaleur est le Watt.

Loi fondamentale de Fourier :

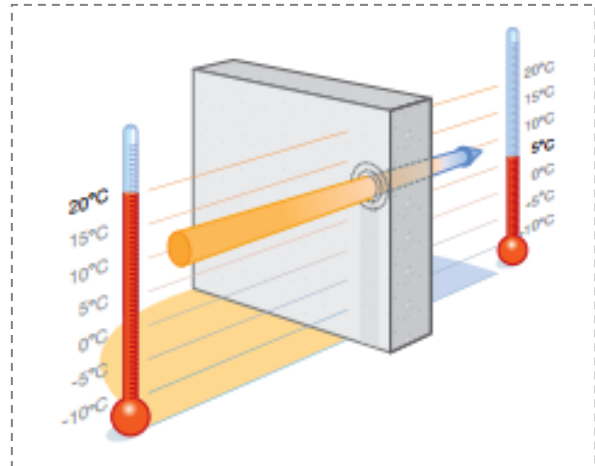
$$\phi = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{e}$$

ϕ = flux de chaleur (W/m²)

λ = conductivité thermique en (W/m.K)

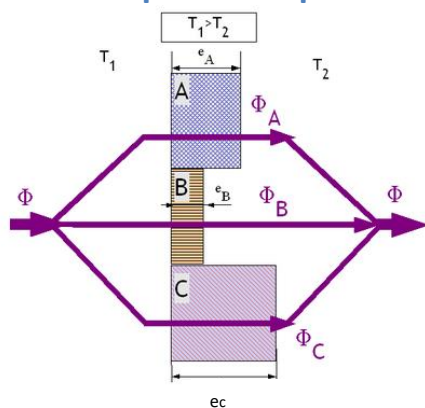
ΔT = écart de température entre les côtés de la paroi (°C)

e = épaisseur de la paroi (mètres)



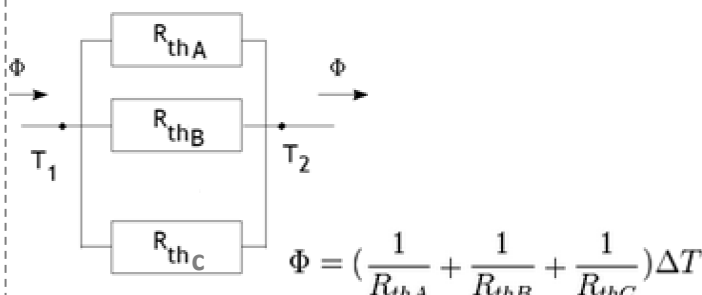
□ Associations : cas des surfaces planes

Surfaces planes en parallèle

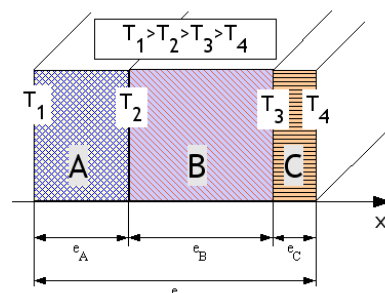


On considère des matériaux plans juxtaposés.

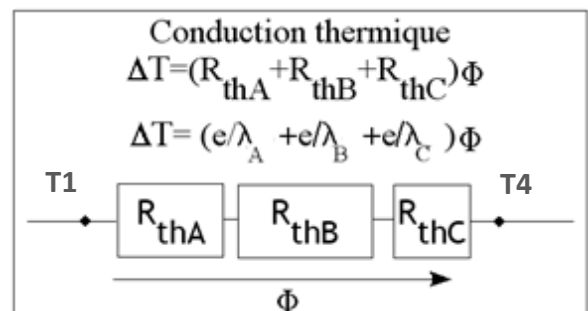
Chaque matériau est homogène et limité par deux plans parallèles. C'est par exemple le cas d'un mur avec une fenêtre. Soit S_A , S_B et S_C les surfaces respectives des éléments A, B et C.



Surfaces planes en série



On considère des matériaux A B et C d'épaisseur respective e_A , e_B et e_C et de conductivité respective λ_A , λ_B et λ_C .

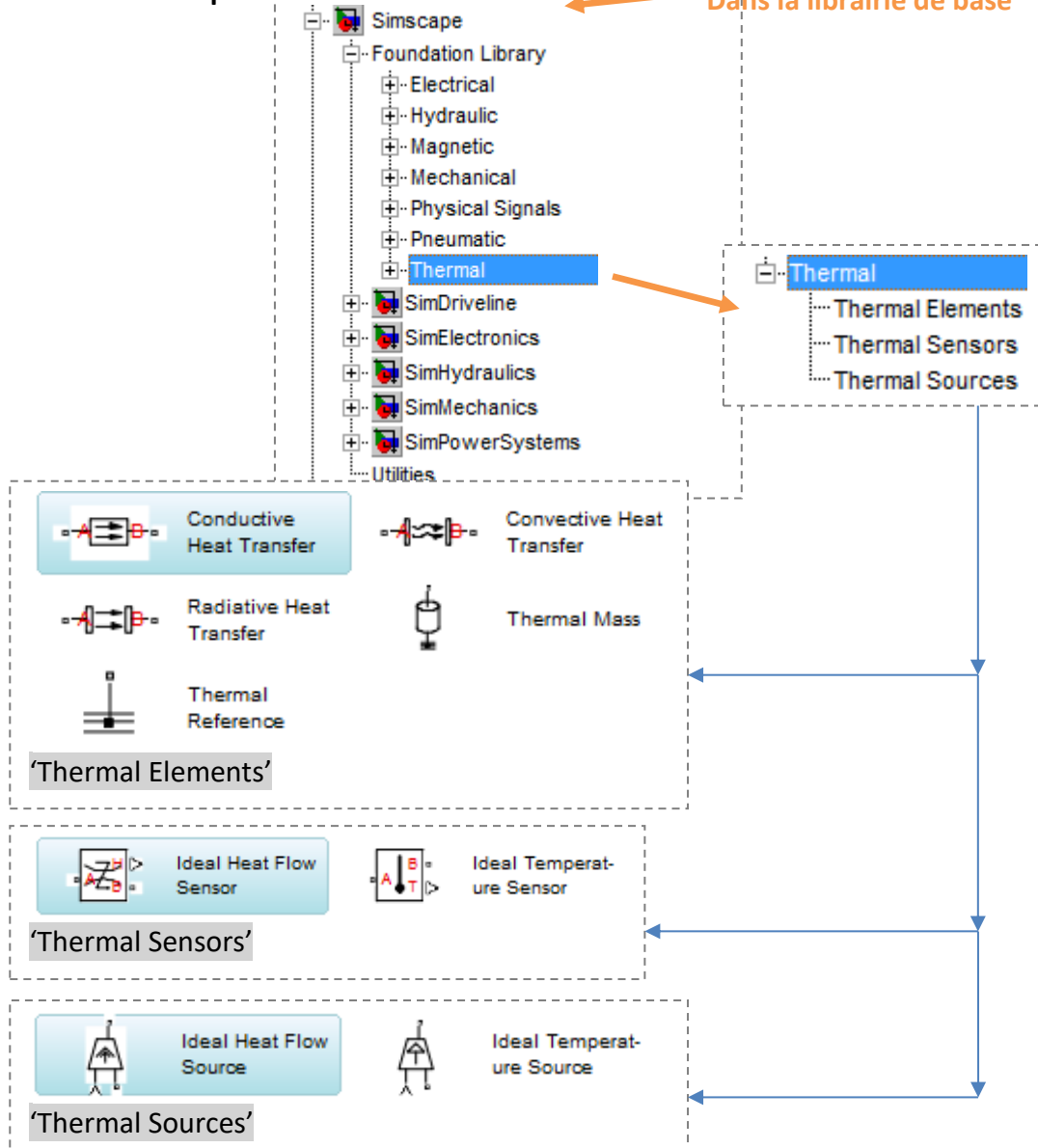


Link : http://www.wikiwand.com/fr/Conduction_thermique

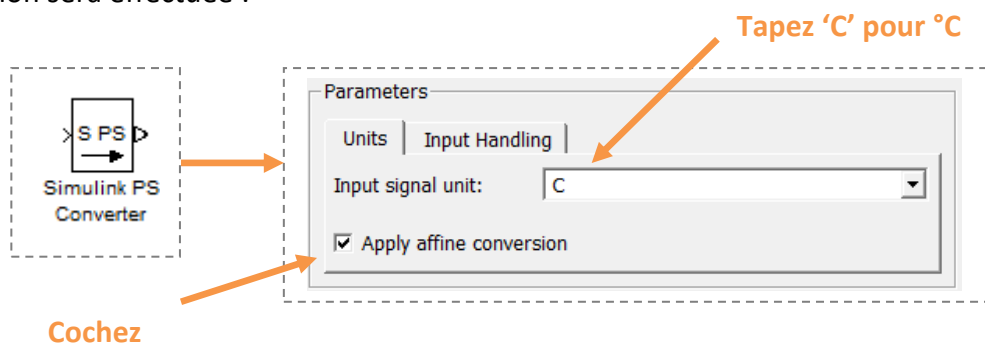
2. La thermique sous Simulink

On retrouve peu de symboles ou blocks liés à la thermique, néanmoins, l'essentiel est présent.

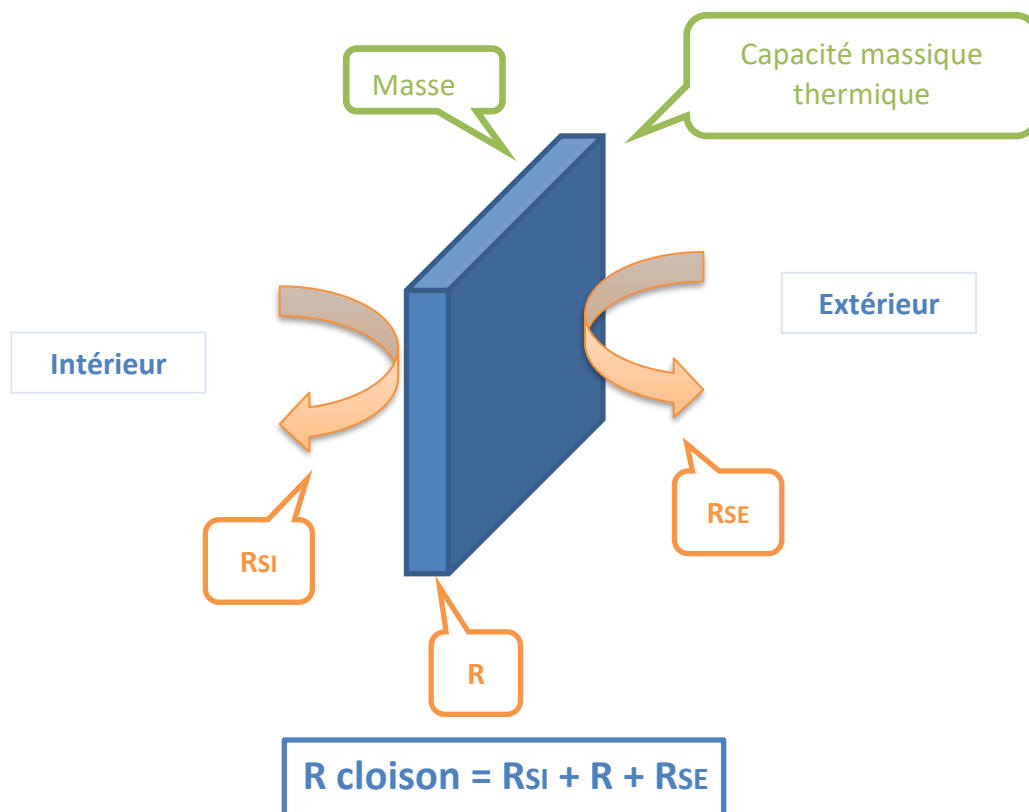
Dans **Simscape** :



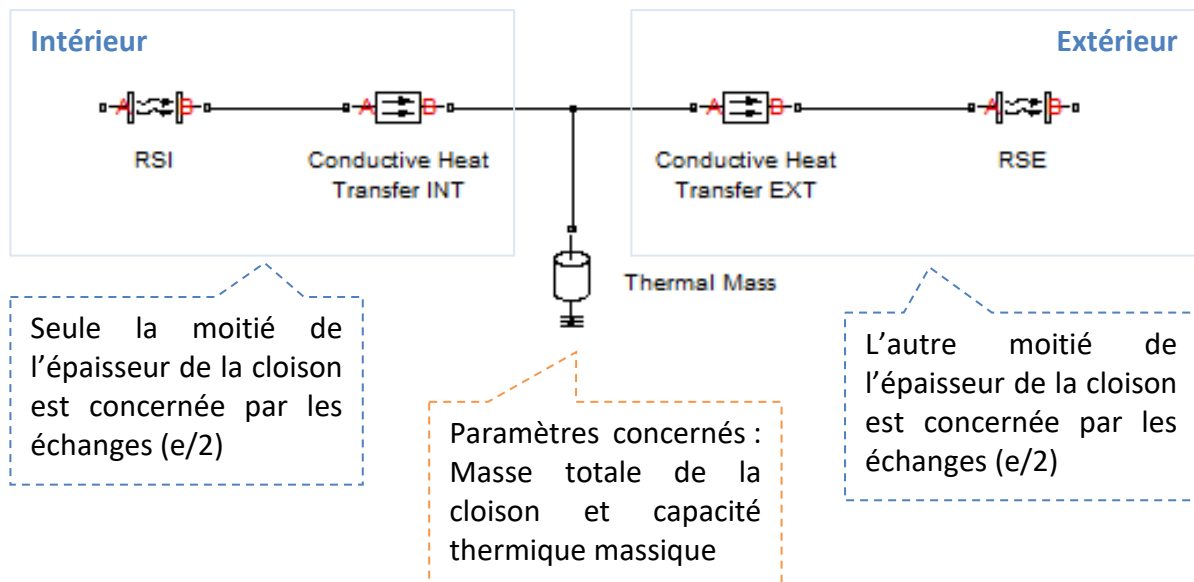
L'unité de base pour la température est le Kelvin. Pour travailler avec le **Celcius**, il va falloir définir cette nouvelle unité sous Simulink. C'est dans les blocks de conversion que cette opération sera effectuée :



Représentation d'une cloison

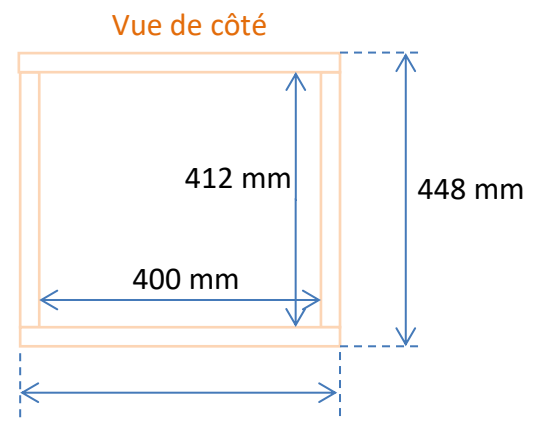
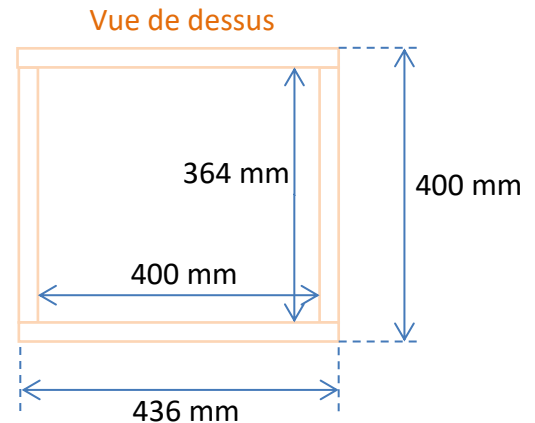
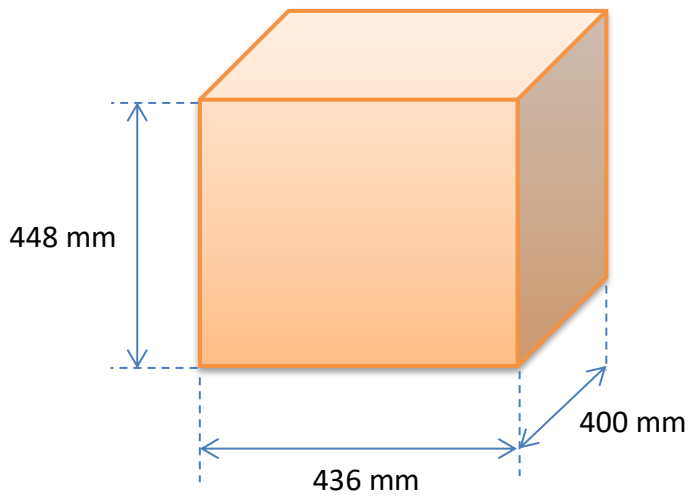


Le modèle sous Simulink : on partage la cloison en 2



3. Construction de notre modèle Simulink du caisson

Dimensions – Surfaces - volumes



Épaisseur des parois : 18 mm

a) Calcul du volume d'air à l'intérieur du caisson : V_{air}

$$V_{\text{air}} = 400 \times 364 \times 412 = 0,0599 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{air}} = 0,06 \text{ m}^3$$

b) Masse d'air contenu dans le caisson : M_{air}

À la température $T_{20} = 293,15 \text{ K}$ (20°C), où $\rho_{\text{air}20} = 1,204 \text{ kg/m}^3$

$$\text{Donc } M_{\text{air}} = 1,204 \times 0,058752 = 0,0722 \text{ kg}$$

c) Surfaces mise en jeu dans les échanges thermiques avec l'extérieur :

$$S_{\text{parois}} = (448 \times 436) \times 2 + (448 \times 400) \times 2 = 0.749 \text{ m}^2$$

$$S_{\text{parois}} = 0,749 \text{ m}^2$$

$$S_{\text{sol}} = 436 \times 400 = 0,1744 \text{ m}^2$$

$$S_{\text{sol}} = 0,1744 \text{ m}^2$$

$$S_{\text{plafond}} = 436 \times 400 = 0,1744 \text{ m}^2$$

$$S_{\text{plafond}} = 0,1744 \text{ m}^2$$

d) Surfaces mis en jeu pour les échanges thermiques avec l'intérieur :

$$S'_{\text{parois}} = (364 \times 412) \times 2 + (400 \times 412) \times 2 = 0.62954 \text{ m}^2$$

$$\mathbf{S'_{\text{parois}} = 0,62954 \text{ m}^2}$$

$$S'_{\text{sol}} = 400 \times 364 = 0,1456 \text{ m}^2$$

$$\mathbf{S'_{\text{sol}} = 0,1456 \text{ m}^2}$$

$$S'_{\text{plafond}} = 400 \times 364 = 0,1456 \text{ m}^2$$

$$\mathbf{S'_{\text{plafond}} = 0,1456 \text{ m}^2}$$

e) Volumes :

$$V_{\text{parois}} = S'_{\text{parois}} \times 18\text{mm} = 0,01136 \text{ m}^3$$

$$\mathbf{V_{\text{parois}} = 0,01133 \text{ m}^3}$$

$$V_{\text{sol}} = S_{\text{sol}} \times 18\text{mm} = 0,003488 \text{ m}^3$$

$$\mathbf{V_{\text{sol}} = 0,00314 \text{ m}^3}$$

$$V_{\text{plafond}} = S_{\text{plafond}} \times 18\text{mm} = 0,003488 \text{ m}^3$$

$$\mathbf{V_{\text{sol}} = 0,00314 \text{ m}^3}$$

f) Masses :

En mesurant la masse d'une planche de $400 \times 436 \times 18 = 3\,139\,200 \text{ mm}^3 = 0,00314 \text{ m}^3$, on trouve : Masse = 2,345 kg

On obtient donc une masse volumique de 747 kg/m^3

$$\mathbf{M_{\text{parois}} = 747 \times 0,01133 = 8,464 \text{ kg}}$$

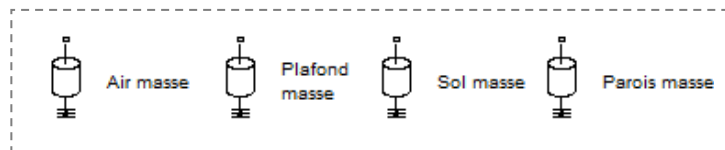
$$\mathbf{M_{\text{sol}} = 747 \times 0,00314 = 2,346 \text{ kg}}$$

$$\mathbf{M_{\text{plafond}} = 747 \times 0,00314 = 2,346 \text{ kg}}$$

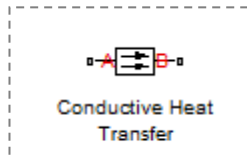
Élaboration du modèle Simulink du caisson

Tout d'abord, incérons tous les éléments liés à notre caisson :

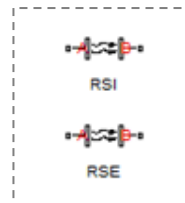
- Les différentes masses



- Les résistances thermiques de conduction



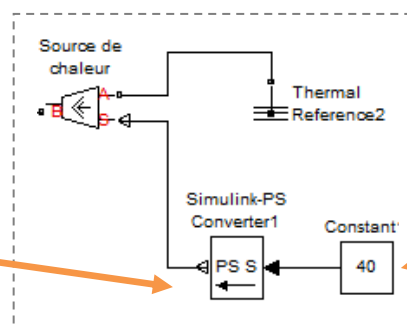
- Les résistances thermiques de convection RSI



- Les résistances thermiques de convection RSE

- Une source de chaleur à l'intérieur du caisson

Block de conversion en signal physique, ici une puissance en (J/s)

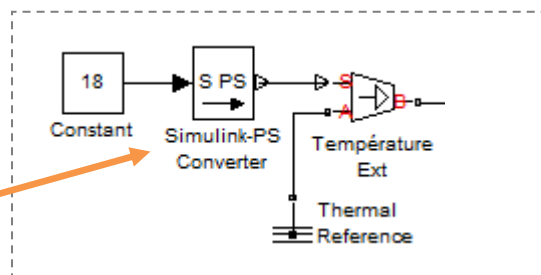


Une ampoule de 40W

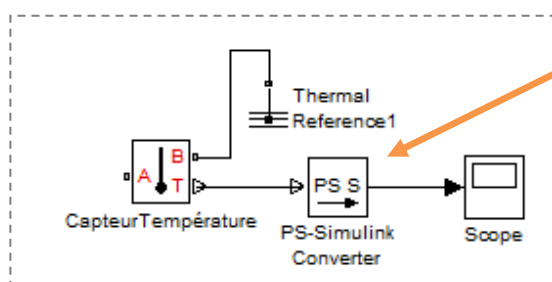
- Des références thermiques

- La déclaration d'une température extérieure de 18°C (dans le labo...)

Block de conversion pour indiquer avec quelle grandeur on travaille : °C

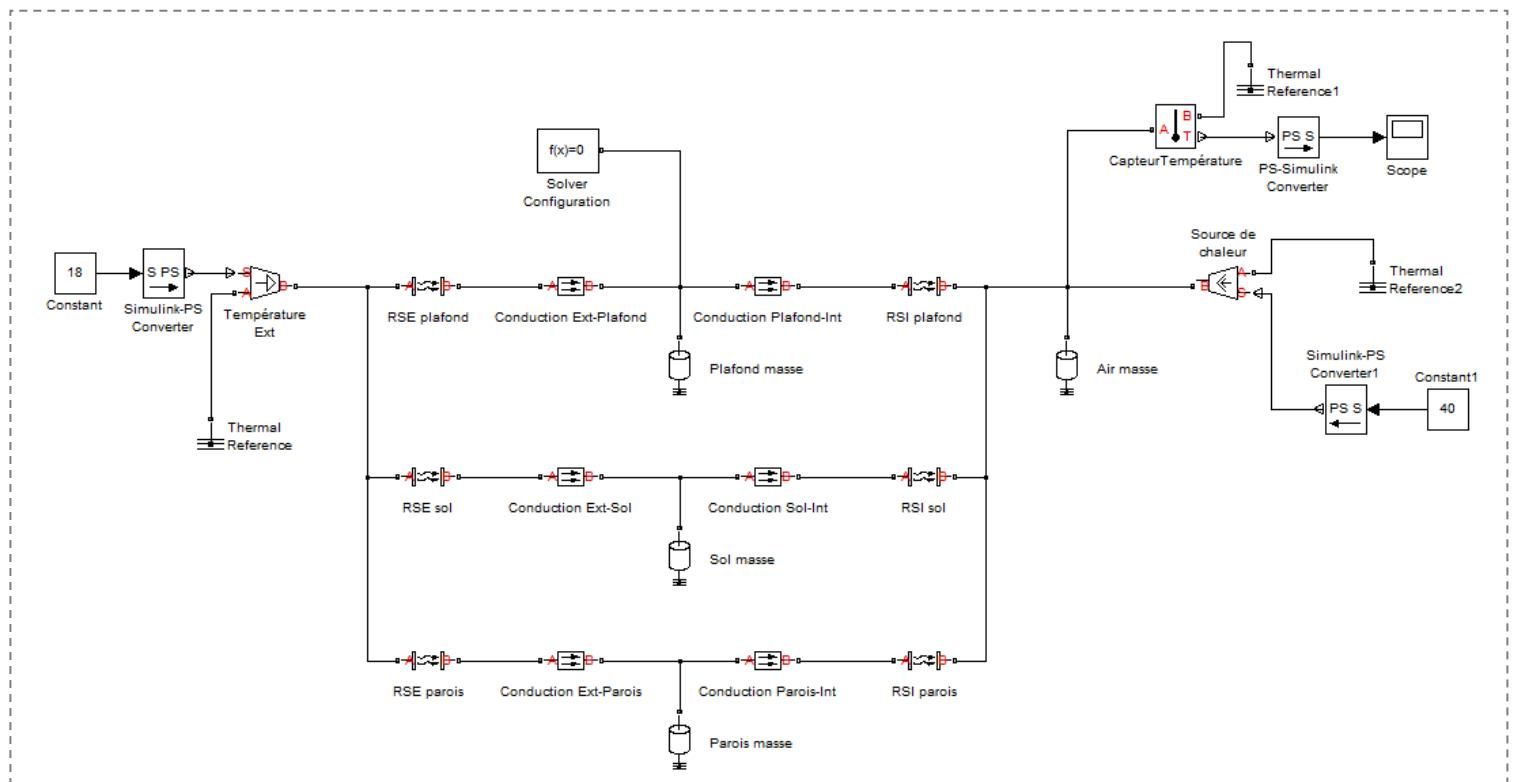


- Un capteur de température à l'intérieur du caisson relié à un scope via un convertisseur de signal 'physique-math'

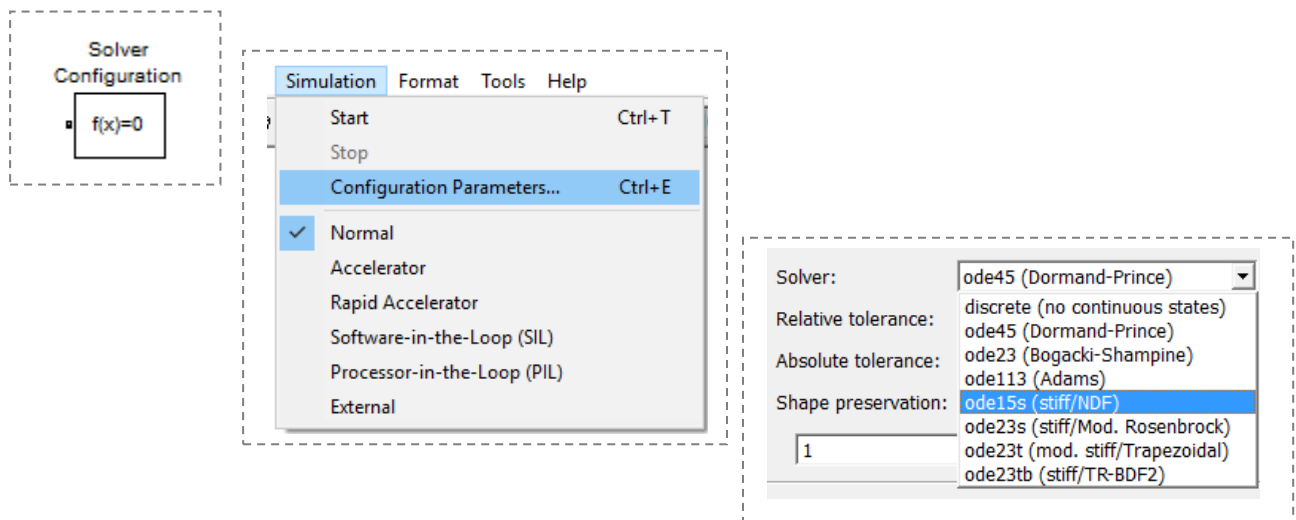


Ici, le block fait la conversion du signal physique en valeurs numériques compatibles avec le 'scope'

Notre modèle complet est donc le suivant :



On n'oublie pas de rajouter le 'moteur' qui va indiquer à Simulink avec quelle méthode il va calculer. Comme souvent, il faut configurer de la façon suivante :



Renseignement des différents blocks

✓ Commençons par le block 'Air masse' :

The screenshot shows the 'Block Parameters: Air masse' dialog box. It contains a 'Thermal Mass' section with descriptive text and a 'Parameters' section with input fields for Mass, Specific heat, and Initial temperature. Orange arrows point from labels to specific fields: 'Mair' points to the Mass field, 'Capacité thermique massique' points to the Specific heat field, and 'Température ambiante au départ de l'expérience' points to the Initial temperature field.

Annotations:

- Mair → Mass: 0.0722 kg
- Capacité thermique massique → Specific heat: 1004 J/kg/K
- Température ambiante au départ de l'expérience → Initial temperature: 18 C

Pour renseigner les paramètres liés aux parois, il faut trouver des valeurs correspondantes à notre matériaux : planche de bois aggloméré recouvert de couches de Formica.

matériau	densité (kg/m ³)	conductivité thermique λ (W/m.K)	chaleur spécifique (J/kg.K)	résistance diffusion vapeur d'eau μ mu (-)	énergie d'origine renouvelable (kWh/m ³)	grise impact non environnemental/ changement climatique (kg eq CO ₂ /m ³)
Plaque plâtre BA13	825	0.250	1008	7	1100	200
Fermacell	1125	0.360	1265	11	1669	412
Carreau de plâtre	957	0.320	1000	7	1290	234
Panneau d'aggloméré type OSB	620	0.130	1584	40	2066	-473
Panneau de particules agglomérées	670	0.120	1584	33	1900	-540
Panneau MDF 1	528	0.100	1584	16	3100	-480

Le block 'Parois masse' :

The screenshot shows the 'Block Parameters: Parois masse' dialog box. It contains a 'Thermal Mass' section with descriptive text and a 'Parameters' section with input fields for Mass, Specific heat, and Initial temperature. The values are: Mass: 8,464 kg, Specific heat: 1584 J/kg/K, and Initial temperature: 18 C.

Résistance superficiel vers l'extérieur : RSE parois

Sparois

Dans nos conditions :

$RSE = 0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$

Block Parameters: RSE parois

Convective Heat Transfer

The block represents an energy transfer by convection between two bodies by means of fluid motion. The transfer is governed by the Newton law of cooling and is directly proportional to the convection heat transfer coefficient, surface area, and the temperature difference.

Connections A and B are thermal conserving ports associated with the points between which the energy transport by convection takes place. The block positive direction is from port A to port B. This means that the heat flow is positive if it flows from A to B.

[View source for Convective Heat Transfer](#)

Parameters

Area: 0.749 m²

Heat transfer coefficient: 1/0.13 W/(m² * K)

OK Cancel Help Apply

Résistance superficiel vers l'intérieur : RSI parois

Dans nos conditions :

$RSI = 0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$

Block Parameters: RSI parois

Convective Heat Transfer

The block represents an energy transfer by convection between two bodies by means of fluid motion. The transfer is governed by the Newton law of cooling and is directly proportional to the convection heat transfer coefficient, surface area, and the temperature difference.

Connections A and B are thermal conserving ports associated with the points between which the energy transport by convection takes place. The block positive direction is from port A to port B. This means that the heat flow is positive if it flows from A to B.

[View source for Convective Heat Transfer](#)

Parameters

Area: 0.62954 m²

Heat transfer coefficient: 1/0.13 W/(m² * K)

OK Cancel Help Apply

Résistance thermique par conduction Ext-Parois :

On considère la moitié de l'épaisseur de la paroi

$\lambda \text{ bois} = 0,12 \text{ W}/\text{mK}$

Block Parameters: Conduction Ext-Parois

Conductive Heat Transfer

The block represents heat transfer by conduction through a layer of material. The transfer is governed by the Fourier law and is directly proportional to the material thermal conductivity, area normal to the heat flow direction, temperature difference, and is inversely proportional to the thickness of the layer.

Connections A and B are thermal conserving ports associated with the material layers. The block positive direction is from port A to port B. This means that the heat flow is positive if it flows from A to B.

[View source for Conductive Heat Transfer](#)

Parameters

Area: 0.749 m²

Thickness: 9 mm

Thermal conductivity: 0.12 W/(m*K)

OK Cancel Help Apply

Résistance thermique par conduction Parois-Int :

Block Parameters: Conduction Parois-Int

Conductive Heat Transfer

The block represents heat transfer by conduction through a layer of material. The transfer is governed by the Fourier law and is directly proportional to the material thermal conductivity, area normal to the heat flow direction, temperature difference, and is inversely proportional to the thickness of the layer.

Connections A and B are thermal conserving ports associated with material layers. The block positive direction is from port A to port B. This means that the heat flow is positive if it flows from A to B.

[View source for Conductive Heat Transfer](#)

Parameters

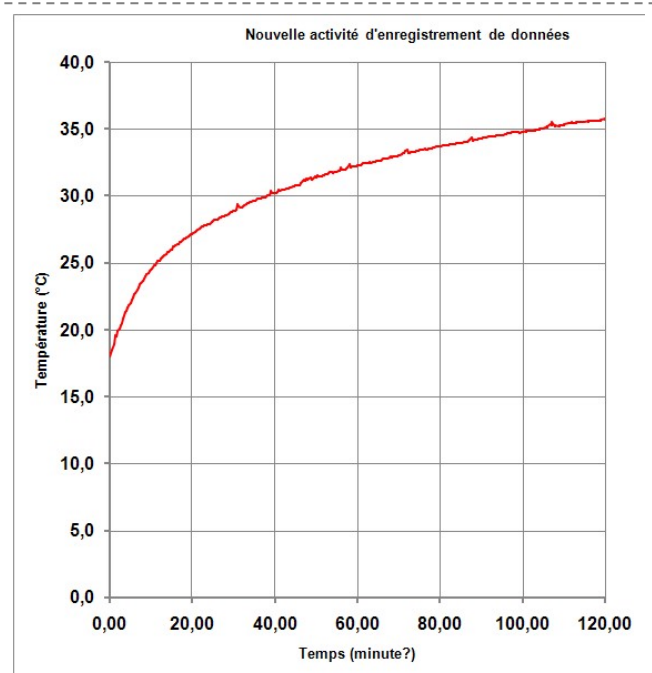
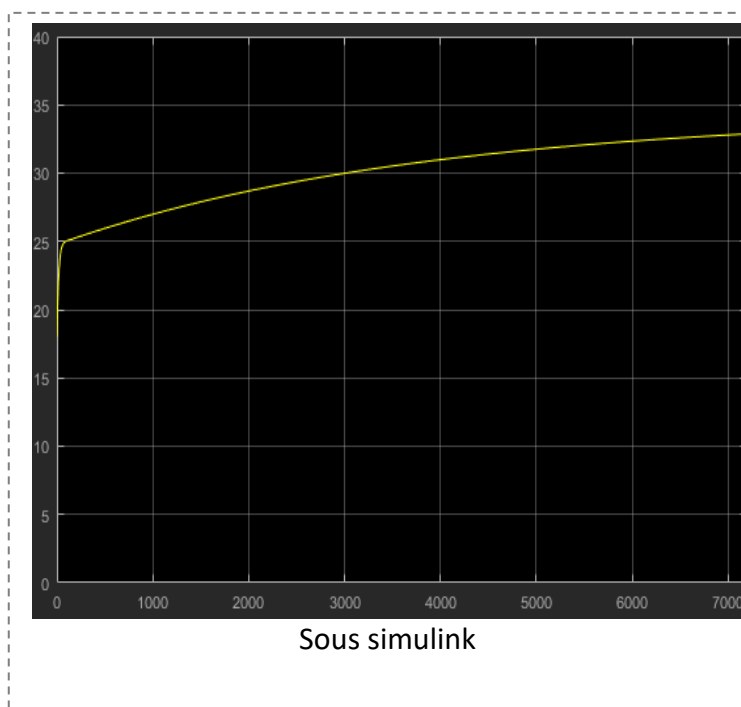
Area:	0.62954	m ²
Thickness:	9	mm
Thermal conductivity:	0.12	W/(m*K)

OK Cancel Help Apply

Il faut maintenant renseigner tous les paramètres liés aux autres parois : un travail un peu long mais nécessaire.

4. Simulations et résultats

Lançons une simulation sur 2 heures soit 2x3600s



Mesures de température faites en réel

- Quantifier l'écart entre le modèle simulé et le modèle réel
- Déterminer ce qui peut engendrer cet écart.

5. Compléments : pour les plus rapides

Essais thermique du caisson avec un isolant

Le test se fait avec un polystyrène d'une épaisseur de 6 cm ce qui vient perturber tous les calculs précédents.

On notera également que le fond du caisson n'est pas recouvert d'isolant.

(32cm en hauteur à l'intérieur)



Paramètres à retenir pour l'isolant :

matériau	densité (kg/m ³)	conductivité thermique λ (W/m.K)	chaleur spécifique (J/kg.K)	résistance diffusion vapeur d'eau μ mu (-)	énergie d'origine renouvelable (kWh/m ³)	impact grise environnemental/ non changement climatique (kg eq CO ₂ /m ³)
Laine de roche en vrac	35	0.065	1030	1	315	77
Polystyrène expansé	18	0.039	1450	60	486	67
Polystyrène extrudé (Plaques expansées aux HCFC)	34	0.035	1450	150	918	126
Mousse de polyuréthane 30kg/m ³ (plaques moulées)	34	0.029	1450	150	905	131

Surfaces et volumes

- Nouveau volume d'air à l'intérieur : **0.04 m³**

Et masse de l'air dans ce cas : **0.04816 kg**

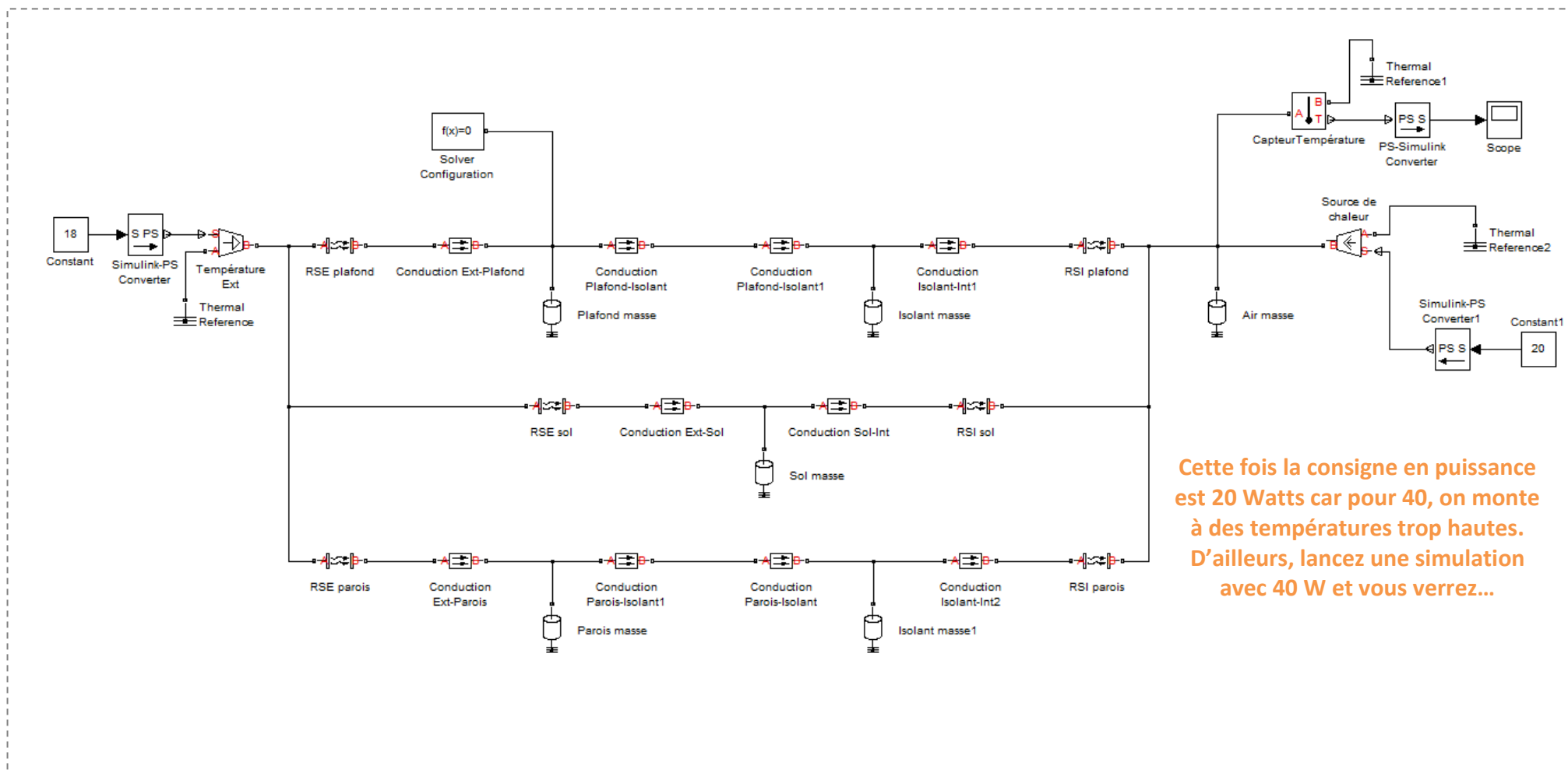
- Surface de l'isolant sur les parois intérieur : **0,3296 m²**
- Volume de l'isolant contre les parois : **0,02458m³**

Et masse de l'isolant contre les parois : **0,836 kg**

- Surface de l'isolant sur le plafond intérieur : 275x235 = **0,0646 m²**
- Volume de l'isolant sur le plafond : 0,0646x.06 = **0,003876 m³**

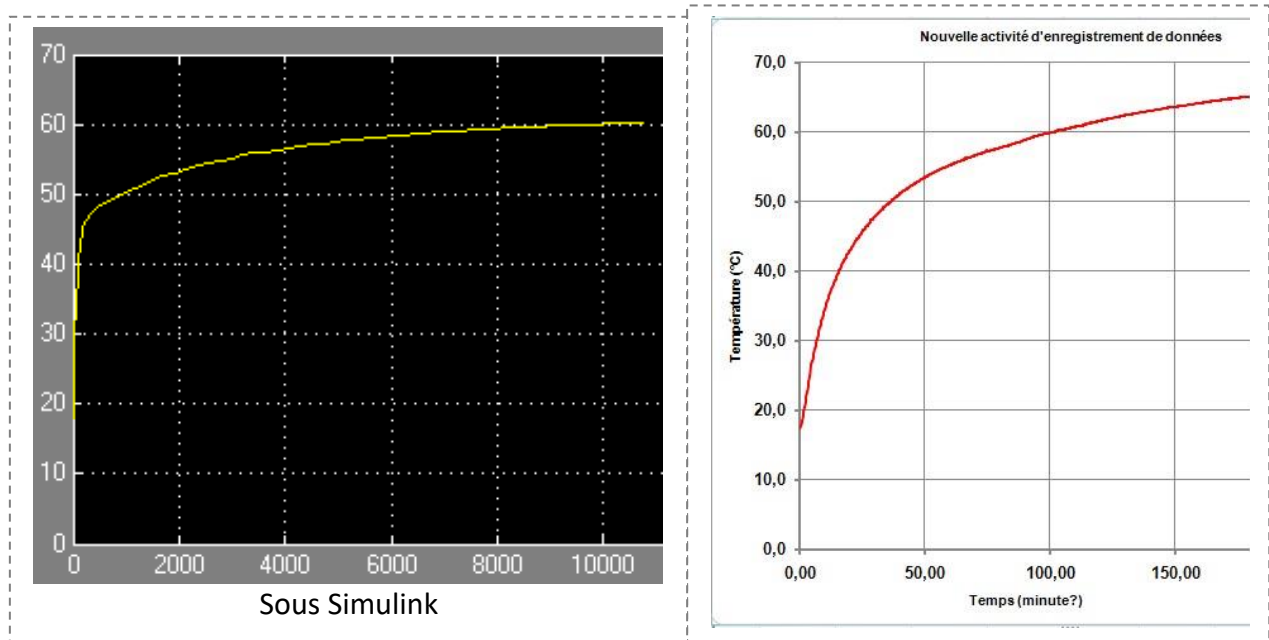
Et masse de l'isolant sur le plafond : **0,132 kg**

Voici le nouveau schéma sous Simulink :



Cette fois la consigne en puissance est 20 Watts car pour 40, on monte à des températures trop hautes. D'ailleurs, lancez une simulation avec 40 W et vous verrez...

Résultats avec un temps de simulation de 10800 secondes soit 3 heures :



Encore une fois, les résultats ne sont pas éloignés.

Document ressource : récapitulatif des données du caisson

			Surface Int	Volume Int	Masse		Epaisseur des cloisons				Surface Ext	Volume Ext
Intérieur du Caisson		m²	m³	kg	Air à 20 °C	18mm (attention on travail par 1/2 cloisons=9 mm)	Extérieur du Caisson		m²	m³		
	AIR int		0,06	0,0722	kg/m3							
	S'parois	0,62954	0,01133	8,4635	1,204			Sparois	0,749			
	S'plafond	0,1456	0,1456					Splafond	0,1744	0,00314		
	S'sol	0,1456	0,1456		J/kg.K			Ssol	0,1744	0,00314		
					1004							
RSI et RSE		Heat transfert Coef (W/m².K)	1/0,13≈ 7,692									
AVEC ISOLANT												
			Surface Int	Volume Int	Masse							
Intérieur du Caisson		m²	m³	kg	Polystirène Extrudé							
	AIR int		0,04	0,0482	kg/m3							
	S'paroisIsola	0,3296	0,02458	0,8357	34							
	S'plafond Iso	0,0646	0,003876	0,1318	J/kg.K							
					1450							
					λ (W/(m.K)							
					0,035							