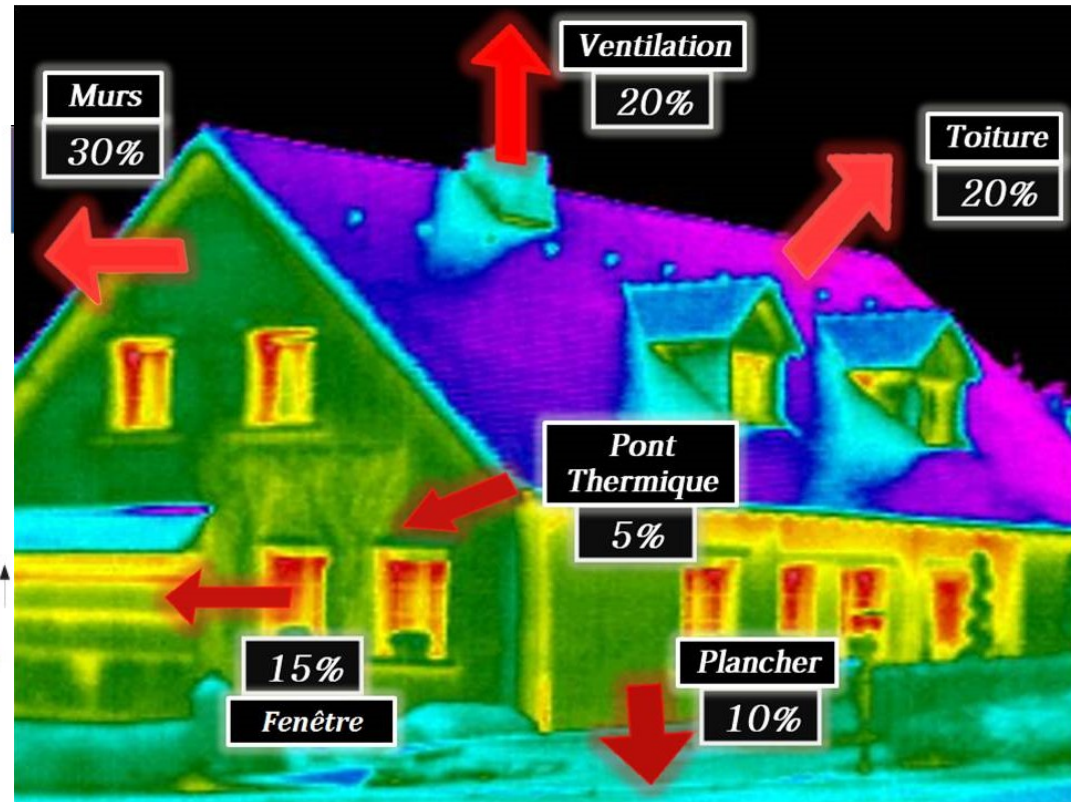
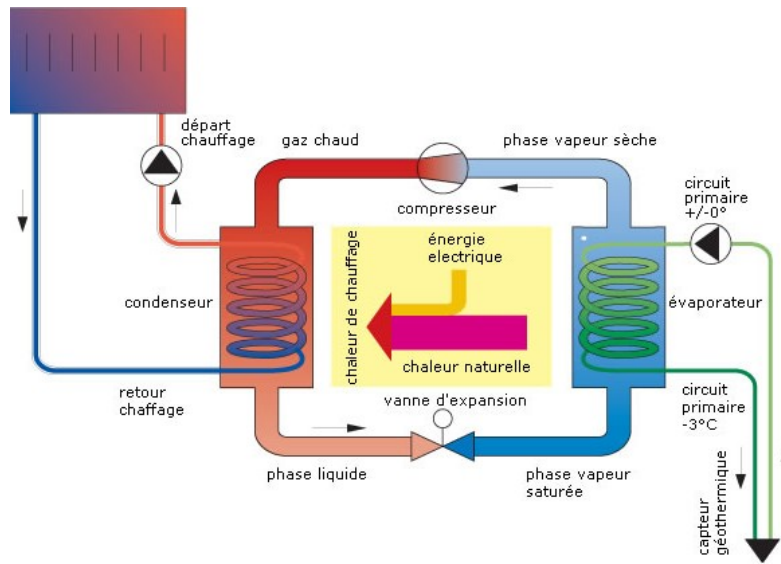


# THERMODYNAMIQUE ET THERMIQUE en STI2D

## Sciences Physiques et Enseignements Technologiques



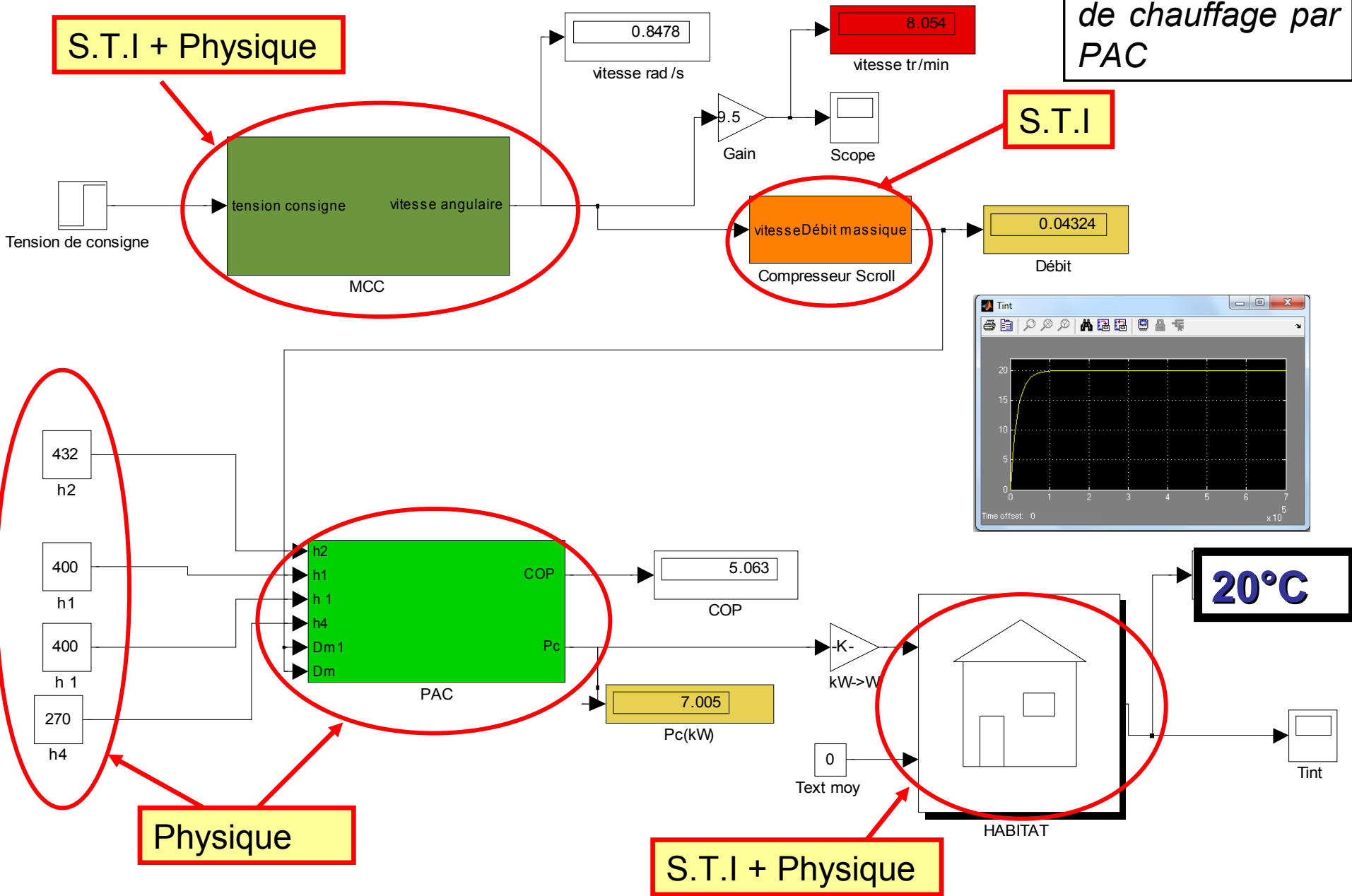
David SABY (Physique – MathSpé P.T)

david.saby@prepas.org

Mardi 10 mai 2011 – Lycée Turgot

# Physique et S.I sont complémentaires...

Modèle Matlab  
d'une installation  
de chauffage par  
PAC



- 1 – Thermodynamique : liens entre les programmes de Sciences-Physiques et de Technologie en STI2D.**
- 2- Bases de la thermodynamique des systèmes fermés et ouverts (systèmes industriels). Importance des notations. Lien entre irréversibilités et diminution des performances énergétiques.**  
**Applications : thermodynamique de l'effet Joule, turbine à gaz, capteur de chauffe-eau solaire...**
- 3- La Pompe à Chaleur (PAC) : description, étude du cycle dans le diagramme de Mollier, efficacité, modèle Matlab-Simulink : influences du débit, des irréversibilités internes, des pertes de charge.**
- 4- Transferts thermiques : résistance thermique, analogies électriques, bilan thermique, modèle Simulink d'un habitat, chauffage par une PAC, régulation thermique, conduction-convection à l'interface paroi fluide (capteurs solaires).**
- 5- Régulation thermique : modèle Simulink complet *moteur – compresseur Scroll – PAC – habitat*; régulation par variation de vitesse du moteur.**

***Activités « pratiques » : PAC et modèles Simulink sur postes infos***

# Les programmes

## Sciences Physiques

BO (1<sup>ère</sup>)

Énergie interne, température, capacité thermique massique.

Transferts thermiques, flux thermique, résistance thermique, caractéristiques thermiques des matériaux

Bilan thermique d'une enceinte.

Projets Term :

Pertes de charge, transferts thermiques et changements d'état, transferts d'une source chaude à une source froide (PAC, frigo...), influence des températures des sources.

## S.T.I

Efficacité énergétique d'un système.

Principes de base de la thermodynamique appliquée aux systèmes techniques.

Analyse des pertes de charges fluidiques.

Conservation d'énergie, pertes et rendements, principe de réversibilité.

Échangeurs thermiques, ventilateurs, pompes, compresseurs, moteur thermique.

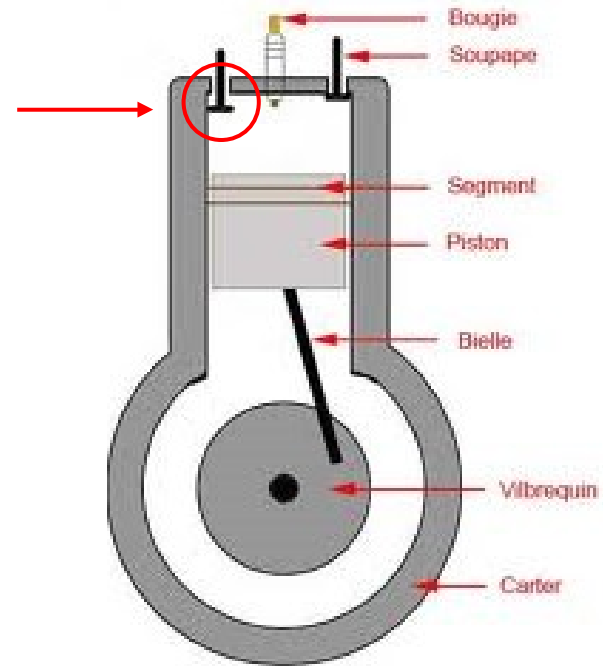
Représentation fonctionnelle, régulation.

## Systèmes fermés



**Pas d'échange de matière  
avec l'extérieur**

## Systèmes ouverts



**Échange de matière avec  
l'extérieur**

# « Construction » de l'énergie totale d'un système

extérieur



$\vec{v}_G$

G

système

Énergies cinétiques

Énergies potentielles

- Déplacement d'ensemble  
du système =  $E_c^{Macro}$

- Déplacement des  
constituants dans le réf.  
barycentrique =  $E_c^{Micro}$

- Des forces extérieures =  
 $E_p^{ext}$

- Des forces intérieures =  
 $E_p^{int}$

Énergie totale :

$$E = E_c^{Macro} + E_p^{ext} + \underbrace{E_c^{micro} + E_p^{int}}$$

Énergie interne

$$U = E_c^{micro} + E_p^{int}$$

J →

# Premier principe pour les systèmes fermés

ystème

extérieur

$$\Delta E = E_2 - E_1 = W_r + Q_r$$

Fonction d'état : indépendante « du chemin »

Travail  
« reçu »

Transfert  
thermique « reçu »

**Grandeurs algébriques comptées positives  
si le système « reçoit », négative sinon**

Machine **motrice** : moteur, turbine ...

$$W_r < 0$$

Machine **réceptrice** : PAC, frigo, compresseur...

$$W_r > 0$$

**On se place du point de vue du fluide et non de l'arbre mécanique de sortie !**

# Premier principe pour les systèmes fermés

$$\Delta E_c^{Macro} + \Delta E_p^{ext} + \Delta U = W_r + Q_r$$

Pendant dt :

$$dE_c^{Macro} + dE_p^{ext} + dU = \delta W_r + \delta Q_r$$

Travail des forces de pression :

$$\delta W_r = -P_{ext} \cdot dV$$

Adiabatique  
(calorifuge) :

$$\delta Q_r = 0$$

Travail électrique :

$$\delta W_r = R \cdot I^2 dt$$

Flux  
thermique :

$$\delta Q_r = \Phi \cdot dt$$

(Watt)



# Variations d'énergie interne

Phases condensées (solide ou liquide)

$$\Delta U = m.c.(T_2 - T_1)$$



Capacité thermique massique

CORPS SIMPLE	$c_p$ (J.KG <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
Al	900
Fe	456
Cu	381
Pb	130
Zn	385

Eau :  $c = 4186 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$

Gaz parfaits (P.V = n.R.T = m.r.T)

$$\Delta U = m.c_V.(T_2 - T_1)$$



Capacité thermique massique  
à volume constant

Air :  $c_v = 710 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$

Dihydrogène :  $c_v = 10\,140 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$

**C : capacité totale du système**

**c : capacité massique**

**C<sub>m</sub> : capacité molaire**

**NOTATIONS**

# Second principe pour les systèmes fermés

système

Extérieur = thermostat à  $T_o$

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \frac{Q_r}{T_o} + S_c \quad S \text{ en J.K}^{-1}$$

Entropie échangée

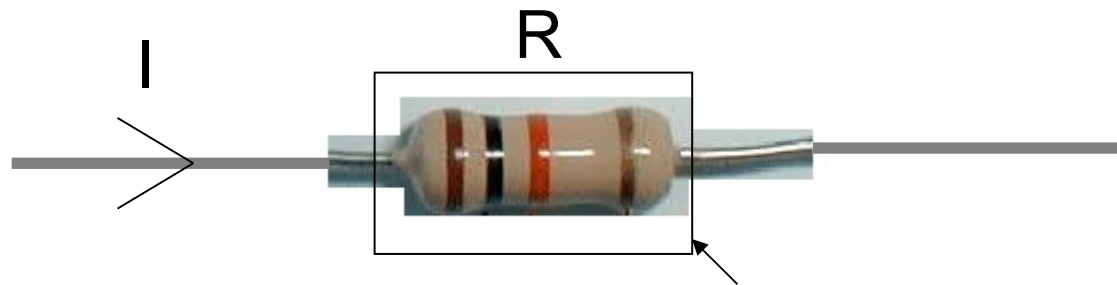
Entropie créée par  
les irréversibilités  
(frottements,  
viscosité...)

-Transformation proche de la réversibilité :  $S_c = 0 \text{ J.K}^{-1}$

-Transformation « réelle » :  $S_c > 0$

Irréversibilités  $\Rightarrow$  Diminution des rendements et efficacités des machines

# Thermodynamique de l'effet Joule



$$\cancel{\Delta E_c^{Macro}} + \cancel{\Delta E_p^{ext}} + \Delta U = W_r + Q_r$$

**Régime stationnaire** : pas d'accumulation d'énergie interne dans la résistance

$$\Delta U = U_2 - U_1 = 0 = (R.I^2).\Delta t + Q_r$$

$$Q_r = -(R.I^2).\Delta t \quad < 0 : \text{le système cède un transfert thermique}$$

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \frac{Q_r}{T_o} + S_c = 0 \Rightarrow S_c = \frac{R.I^2}{T_o} \Delta t > 0$$

# Manipulations en Sciences-Physiques (1ère – Terminale)

## Premier principe :

- Caisse isolée (laine de verre)
- Résistance chauffante pendant  $\Delta t$
- Mesure de la variation de température de l'air



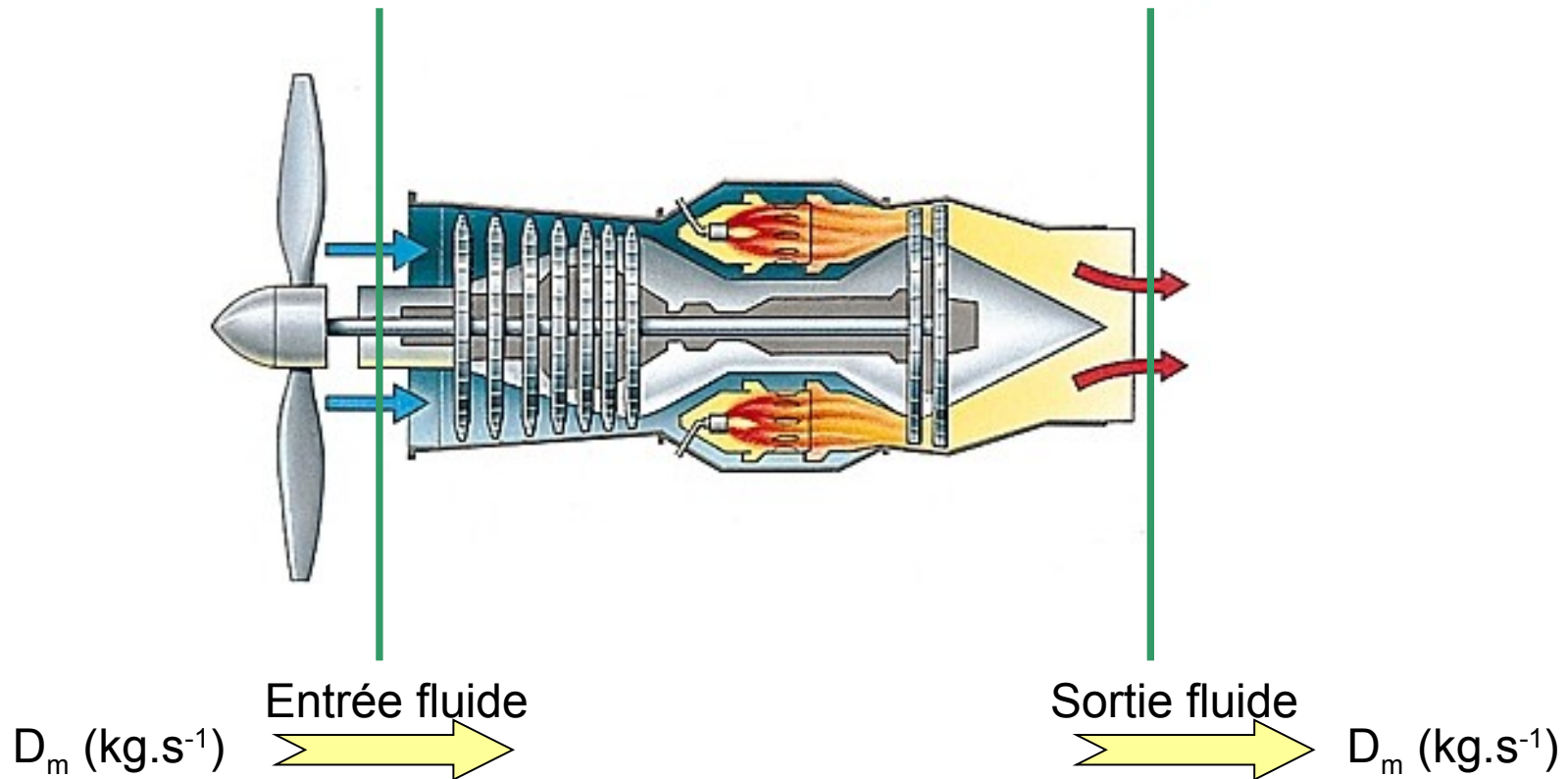
Pour l'air, pendant  $\Delta t$  : 
$$\Delta U = m.c.\Delta T = \rho .V.c.\Delta T$$

A comparer à : 
$$R.I^2.\Delta t$$

Conclure.

# Premier principe pour les systèmes ouverts

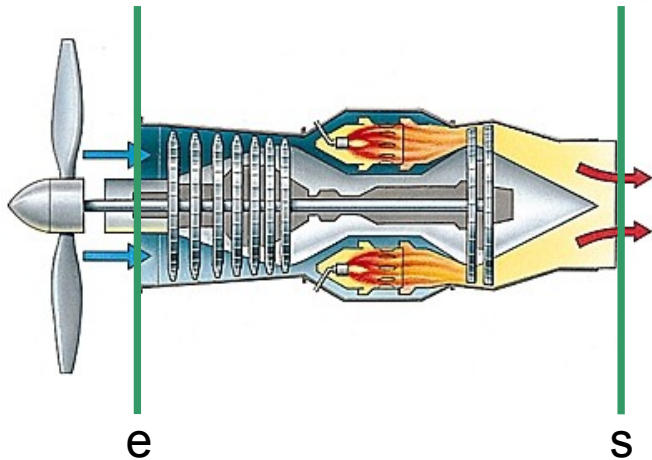
Thermodynamique (industrielle) des fluides en écoulement permanent



**Écoulement « permanent »** : pas d'accumulation (masse, énergie...), débit massique constant.

# Premier principe pour les systèmes ouverts

## Thermodynamique (industrielle) des fluides en écoulement permanent



Système à une entrée et une sortie

En  $\text{J.kg}^{-1}$  :

$$\left(\frac{1}{2}c_s^2 - \frac{1}{2}c_e^2\right) + (g.z_s - g.z_e) + (h_s - h_e) = w_i + q_r$$

Vitesse en sortie

Enthalpie  
massique

Phases condensées  $\Delta h = c.(T_2 - T_1)$

Gaz parfaits  $\Delta h = c_p.(T_2 - T_1)$

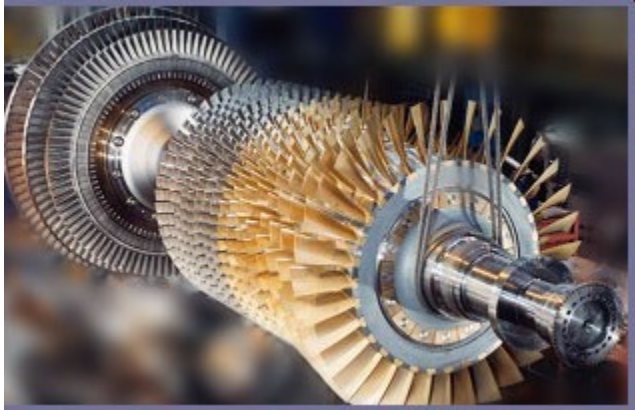
$$h = u + P.v$$

Travail « indiqué »  
échangé **avec les  
parties mobiles**

**h inclut les travaux de pression en amont et en aval qui permettent l'écoulement**

# Premier principe pour les systèmes ouverts

## Premier exemple : puissance récupérée sur l'arbre d'une turbine à gaz



Fluide : air ,  $c_p = 1 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$

Débit massique :  $D_m = 1,2 \text{ kg.s}^{-1}$

Entrée :  $T_e = 1250 \text{ K}$  ,  $P_e = 6,15 \text{ bar}$

Sortie :  $T_s = 1054 \text{ K}$  ,  $P_s = 3,38 \text{ bar}$

Détente adiabatique (car rapide)

$$\cancel{\left(\frac{1}{2}c_s^2 - \frac{1}{2}c_e^2\right)} + \cancel{(g.z_s - g.z_e)} + (h_s - h_e) = w_i + \cancel{q_r}$$

$$(h_s - h_e) = w_{ir}$$

**Si hypothèse gaz parfait :**  $(h_s - h_e) = c_p.(T_s - T_e) = w_{ir} = -196 \text{ kJ.kg}^{-1}$

Puissance sur  
l'arbre :

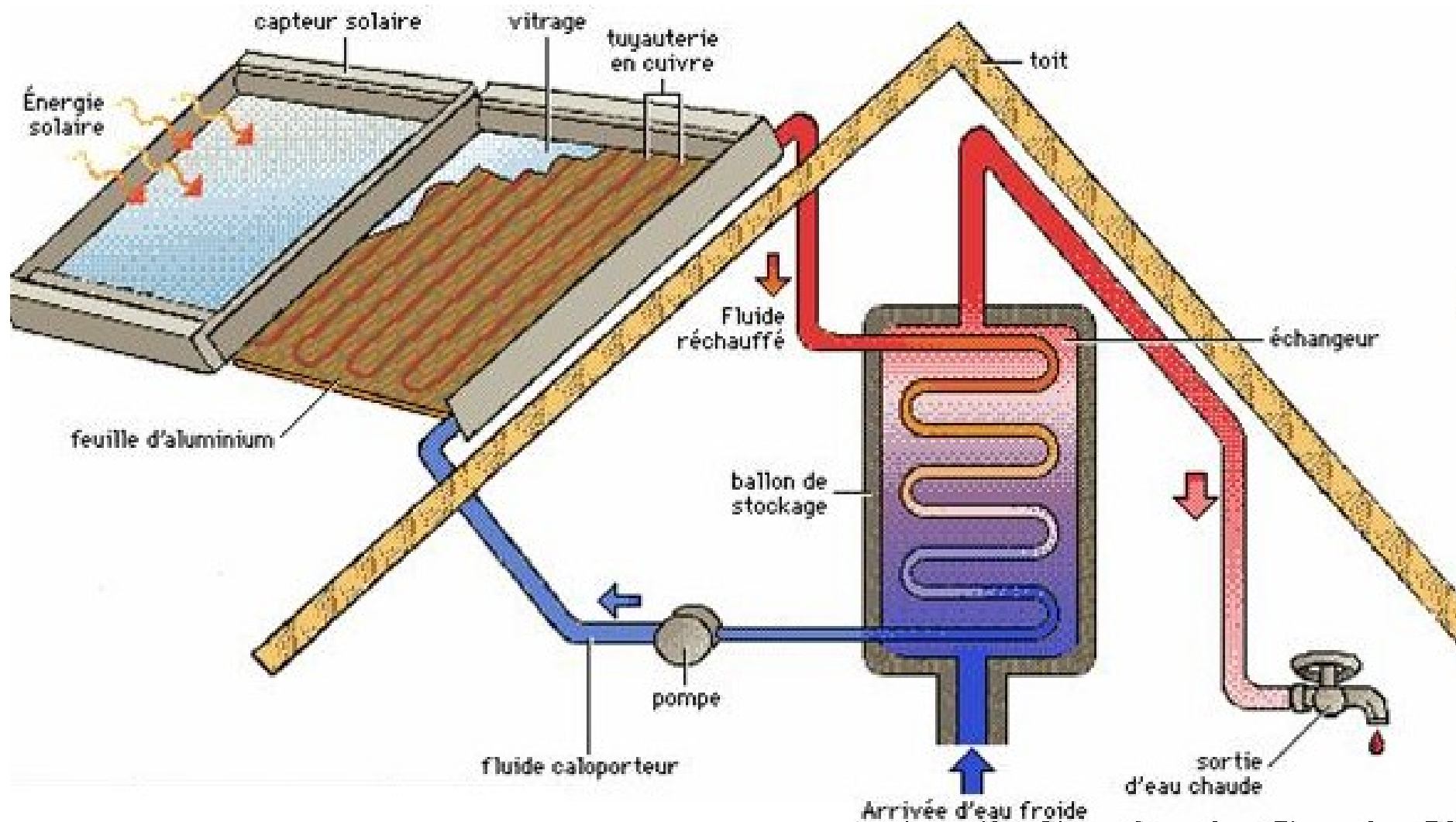
$$P_i = D_m \cdot w_{ir}$$

Watt                      kg/s                      J/kg

$$P_i = -235 \text{ kW}$$

# Premier principe pour les systèmes ouverts

## Second exemple : échangeur thermique

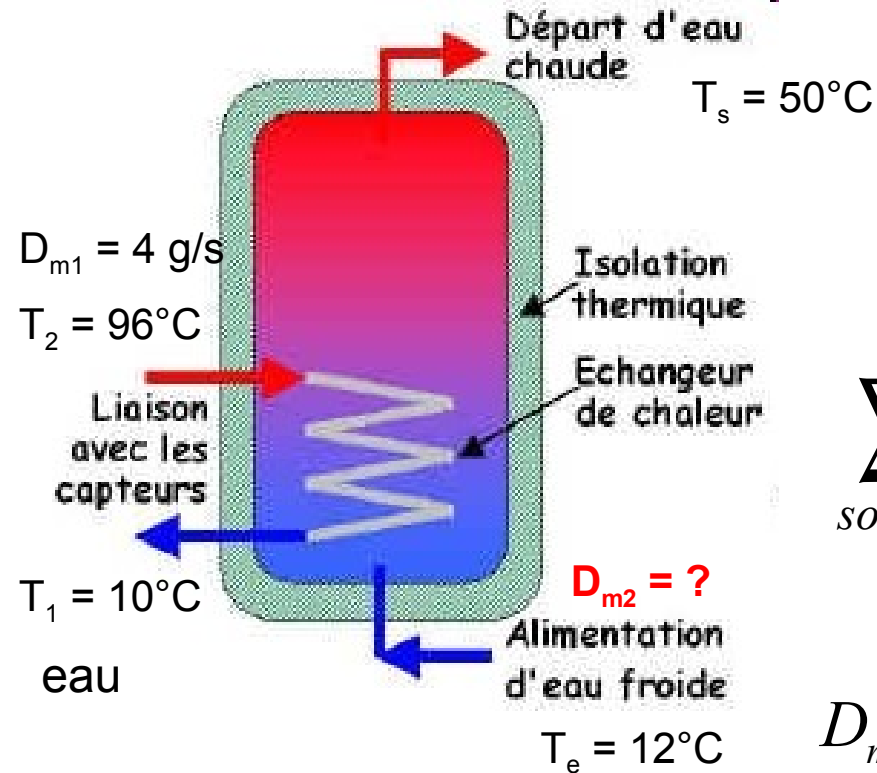


***Le chauffe-eau « solaire »***



# Premier principe pour les systèmes ouverts

## Second exemple : échangeur thermique



Ensemble calorifugé, pas de parties mobiles.

Système ouvert à 2 entrées, 2 sorties

Premier principe en Watt :

$$\sum_{\text{sorties}} D_{ms} \cdot h_s - \sum_{\text{entrées}} D_{me} \cdot h_e = P_i + P_{TH}$$

$\uparrow \quad \uparrow$   
0      0

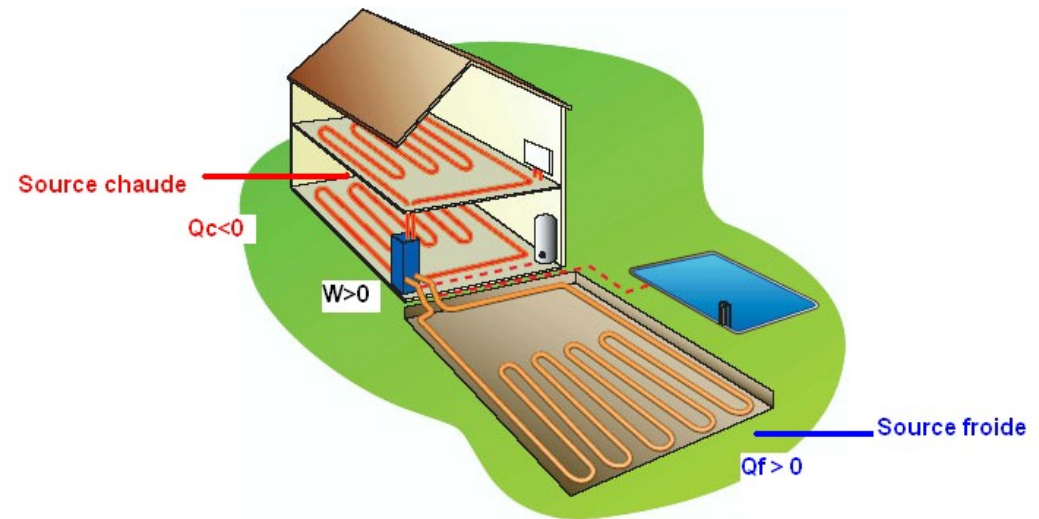
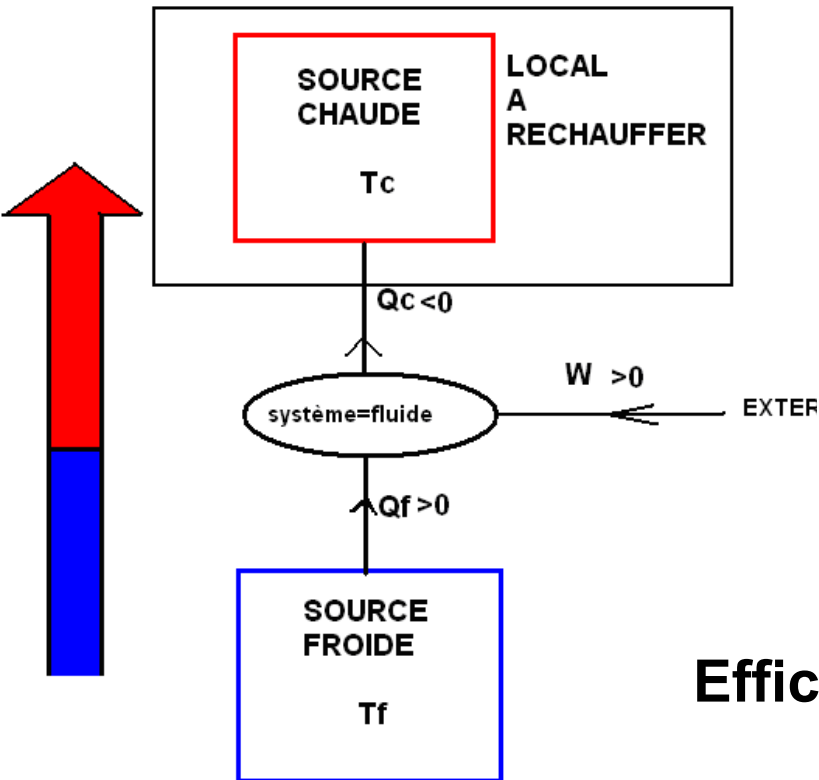
$$D_{m2} \cdot h_s + D_{m1} \cdot h_1 - D_{m2} \cdot h_e - D_{m1} \cdot h_2 = 0$$

$$D_{m2} \cdot c \cdot (T_s - T_e) + D_{m1} \cdot c \cdot (T_1 - T_2) = 0$$

Grandeur à régler  $\longrightarrow D_{m2} = D_{m1} \cdot \frac{T_2 - T_1}{T_s - T_e} = 9 \text{ g/s}$

# La pompe à chaleur (PAC)

## Description



Efficacité (ou COP) :

$$e = \frac{-q_c}{w_r}$$

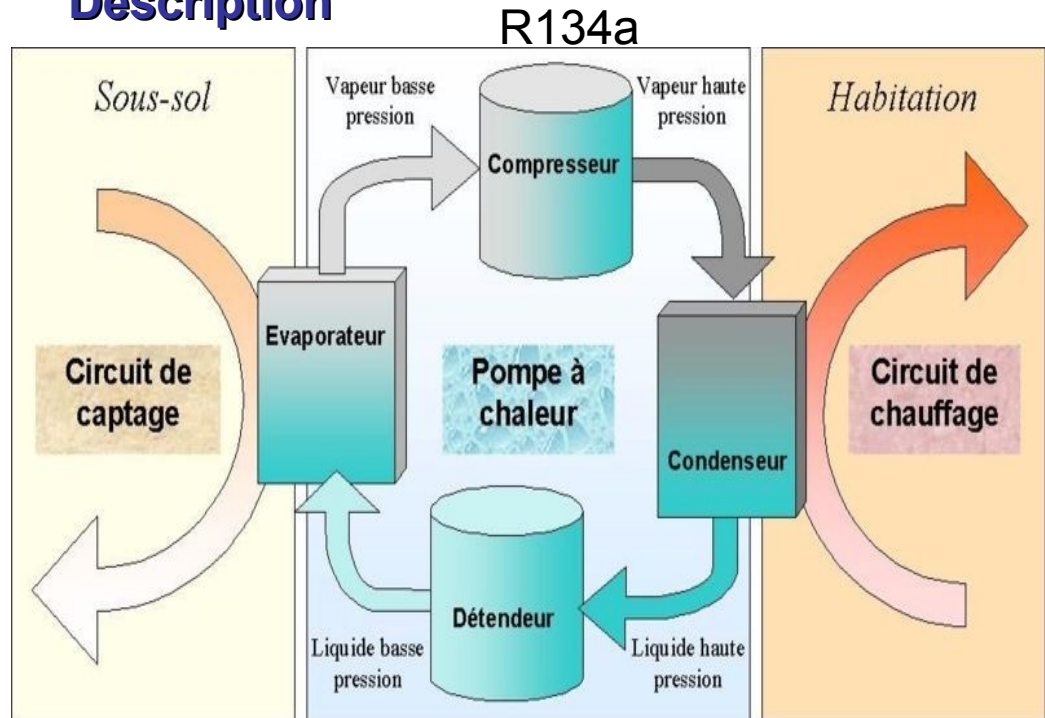
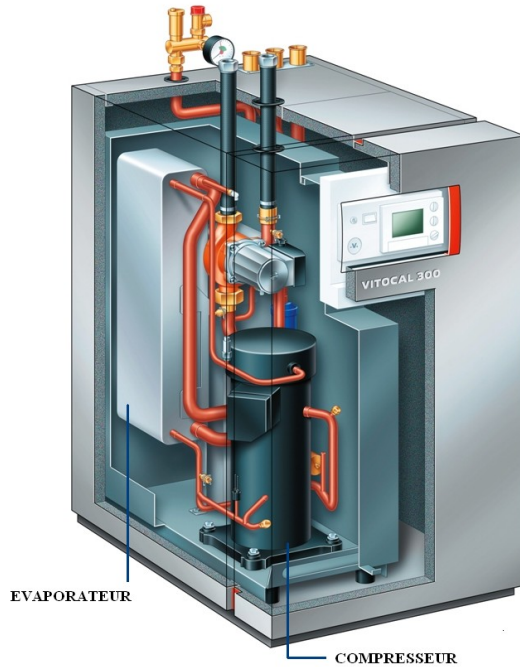
Grandeur « valorisable » (pointing to  $-q_c$ )

Grandeur « coûteuse » (pointing to  $w_r$ )

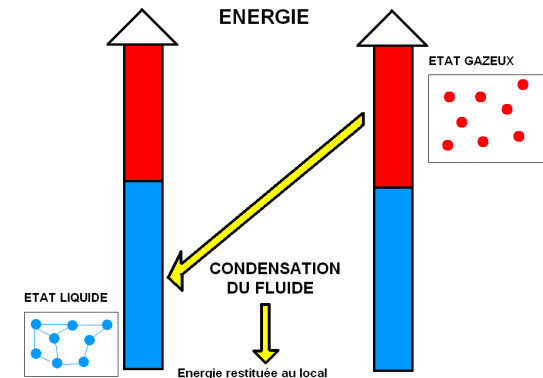
$$e > 1$$

# La pompe à chaleur (PAC)

## Description



<i>Phénomènes endothermiques (absorbant de la chaleur)</i>	<i>Phénomènes exothermiques (produisant de la chaleur)</i>
Fusion d'un solide	Solidification d'un liquide
<b>Vaporisation d'un liquide</b>	<b>Condensation d'une vapeur</b>
Sublimation d'un solide	Condensation en phase solide
Désorption d'un gaz ou d'une vapeur (d'un liquide ou d'un solide)	Absorption d'un gaz ou d'une vapeur (dans un liquide (absorption), dans un solide (adsorption))
Détente d'un gaz comprimé	Compression d'un gaz

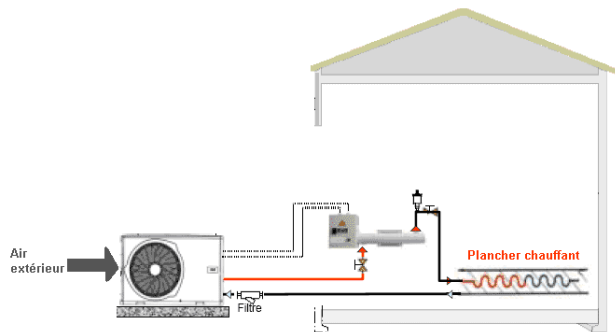


# La pompe à chaleur (PAC)

## Description

### Les PAC air/eau :

La chaleur est prélevée dans l'air extérieur pour être restituée à un circuit d'eau (plancher chauffant ou radiateurs).



### Les PAC eau/eau :

La chaleur est prélevée dans une nappe phréatique et restituée à un circuit d'eau.



### Les PAC géothermiques :

La chaleur est prélevée dans le sol et restituée à un circuit de chauffage.

PAC sol/sol (à détente directe)	PAC eau-glycolée/eau	PAC sol/eau (procédé mixte)
Le fluide frigorigène circule dans les capteurs et le plancher chauffant.	De l'eau additionnée d'antigel circule dans les capteurs et de l'eau circule dans les émetteurs de chauffage.	Le fluide frigorigène de la PAC circule dans les capteurs et de l'eau circule dans les émetteurs de chauffage.

Horizontal à 60 cm : 37 W/m<sup>2</sup>

$$2,5 < e < 3$$

$$5 < e < 5,5$$

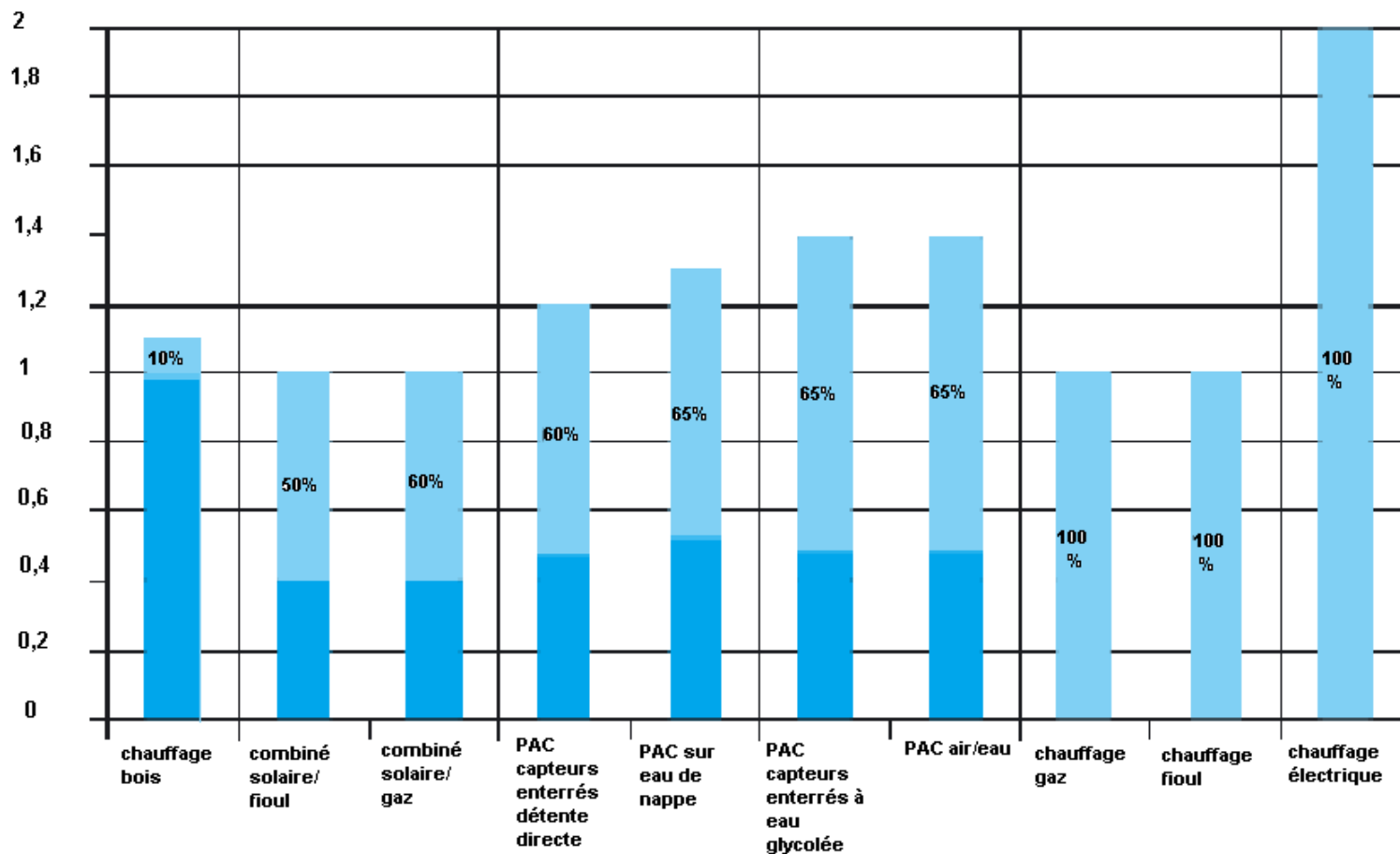
$$3,5 < e < 5$$

**Les PAC émettent environ quatre à six fois moins de CO<sub>2</sub> que le système de chauffage au gaz et huit fois moins que le chauffage au fioul.**

# PAC et énergies renouvelables

Quantité d'énergie primaire renouvelable et d'énergie primaire non renouvelable nécessaires pour produire 1 kWh d'énergie thermique.

Consommation relative par rapport au chauffage par chaudière gaz.



■ Part d'énergie non renouvelable mobilisée

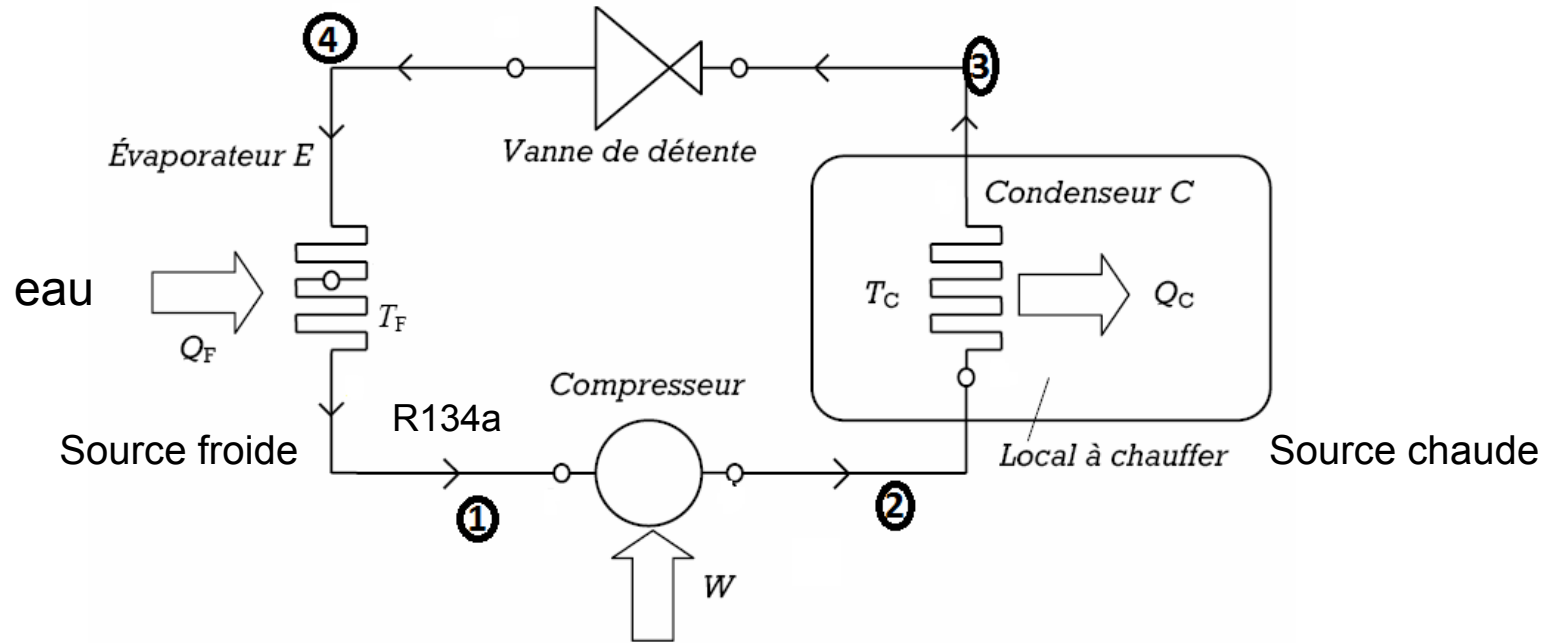
■ Part d'énergie renouvelable mobilisée

Les PAC nécessitent entre 20 à 40% de plus d'énergie primaire que la chaudière gaz pour produire 1 kWh

**Les PAC consomment entre 10 à 30% de moins d'énergie primaire non renouvelable que les systèmes de chauffage au gaz et au fuel.**

# La pompe à chaleur (PAC)

## Étude thermodynamique



Fluide R134a

Wattmètre

# La pompe à chaleur (PAC)

## Manipulations en Sciences-Physiques (1<sup>ère</sup> – Terminale)

### Mesure de l'efficacité de la PAC

$$e = \frac{-q_c}{w_r} = \frac{-P_{SC}}{P_{comp}} = \frac{P_{eau}}{P_{comp}}$$

- Mettre en route la PAC pendant  $\Delta t (= 2 \text{ min})$
- Mesurer  $\Delta T_c$  et  $P_{comp}$ . En déduire  $e$ .

On a  $\Delta T_c = 3^\circ \text{C}$  et  $P_{comp} = 122 \text{ W}$

Eau :  $m = 4 \text{ kg}$  et  $c_{eau} = 4186 \text{ J.K}^{-1}\text{kg}^{-1}$

$$Q_{r-eau} = m.c.\Delta T_c$$

$$P_{eau} = \frac{Q_{r-eau}}{\Delta t} = m.c.\frac{\Delta T_c}{\Delta t}$$

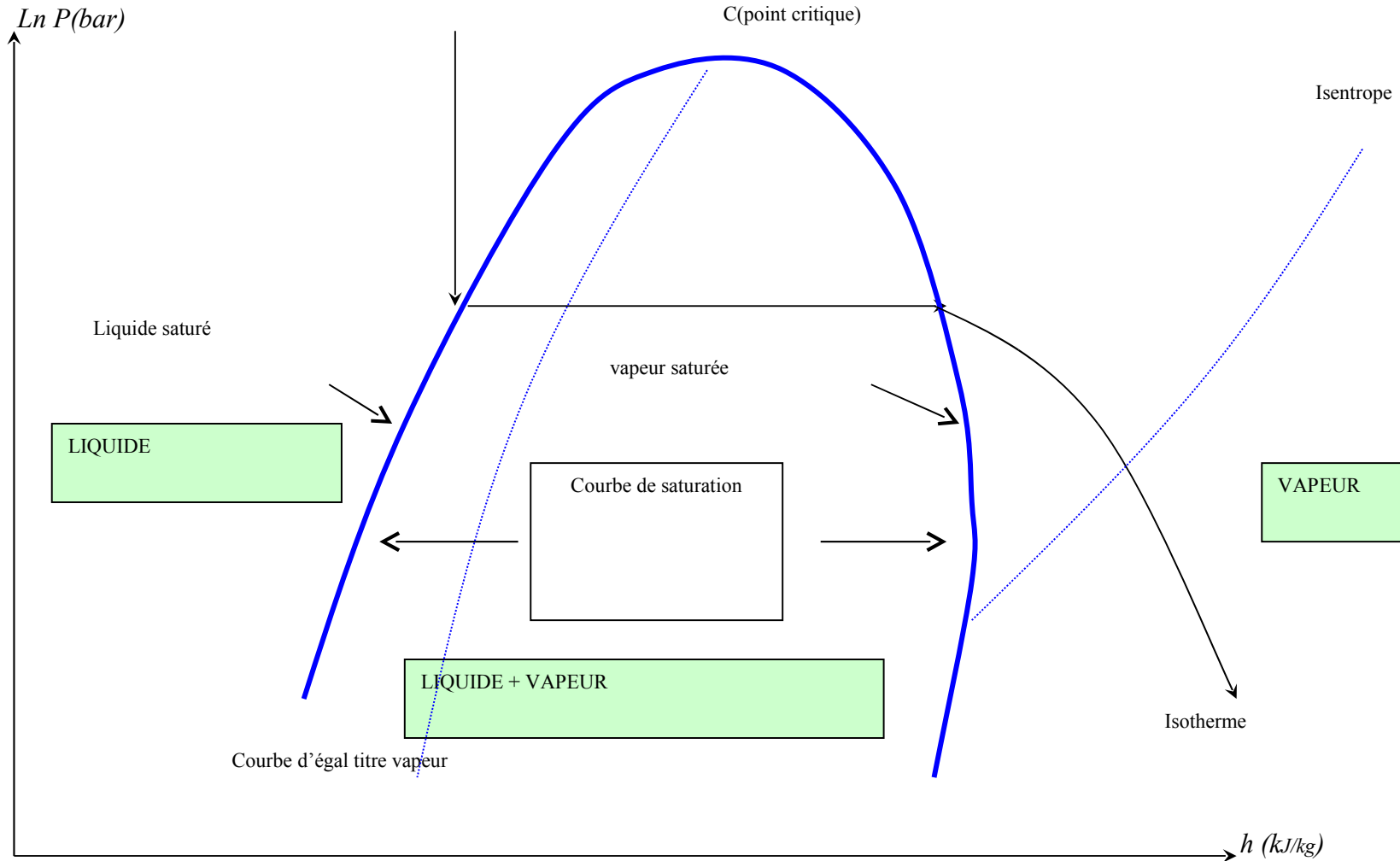
$$P_{eau} = 418,6 \text{ W} \longrightarrow e = 3,4$$

- Montrer le réchauffement de la source chaude
- Montrer le refroidissement de la source froide
- En déduire la nature des changements d'état du fluide R134a sur un cycle
- Montrer que  $e$  diminue lorsque l'écart  $T_c - T_f$  augmente
- Intérêt d'une PAC par rapport au chauffage électrique ( $e > 1$ ).



# La pompe à chaleur (PAC)

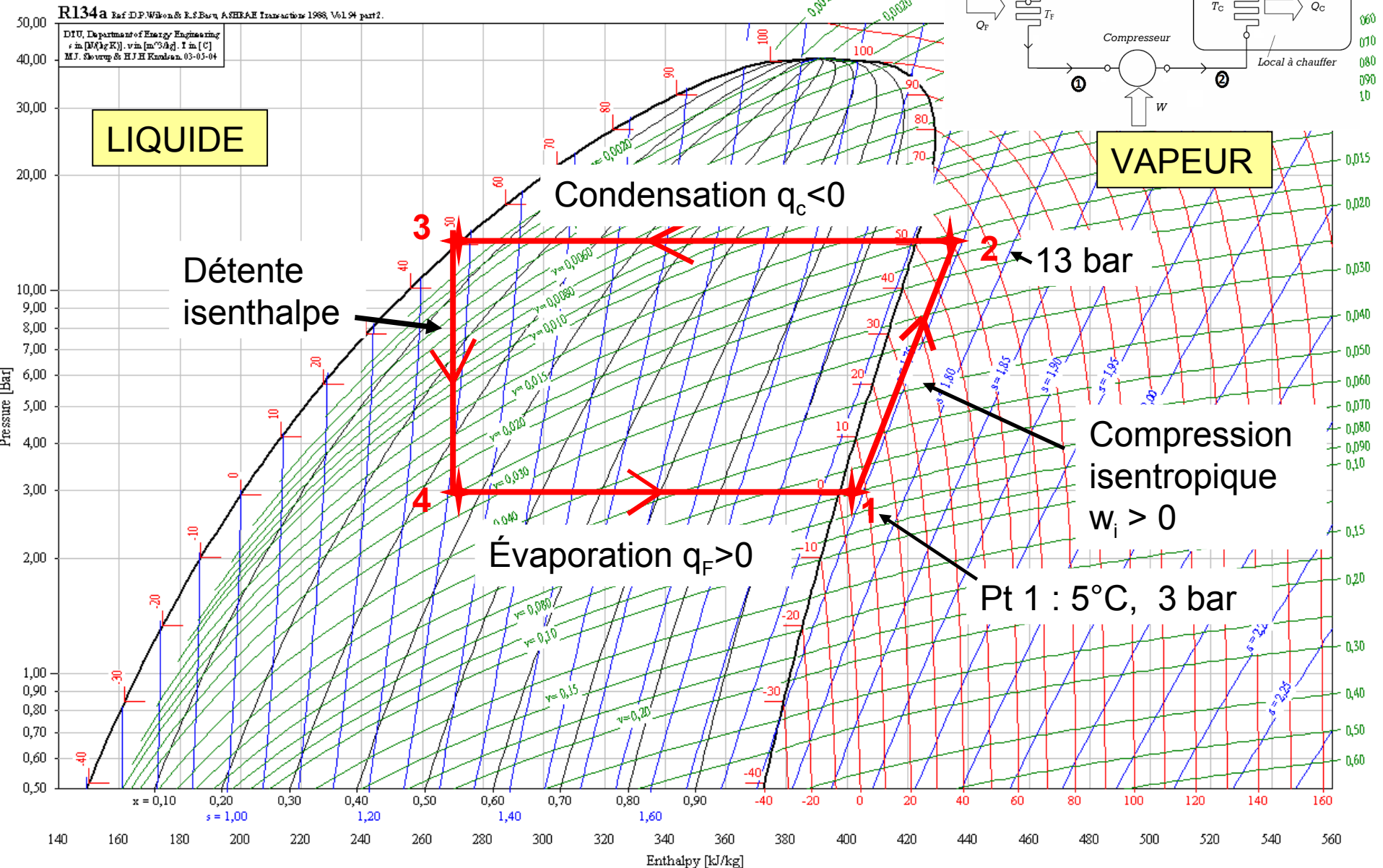
## Diagramme enthalpique (ou de Mollier)





# Diagramme enthalpique (ou de Mollier) R134a : PAC idéalisée

Placer les points sur le diagramme fourni



# Diagramme enthalpique (ou de Mollier) R134a : détermination du COP

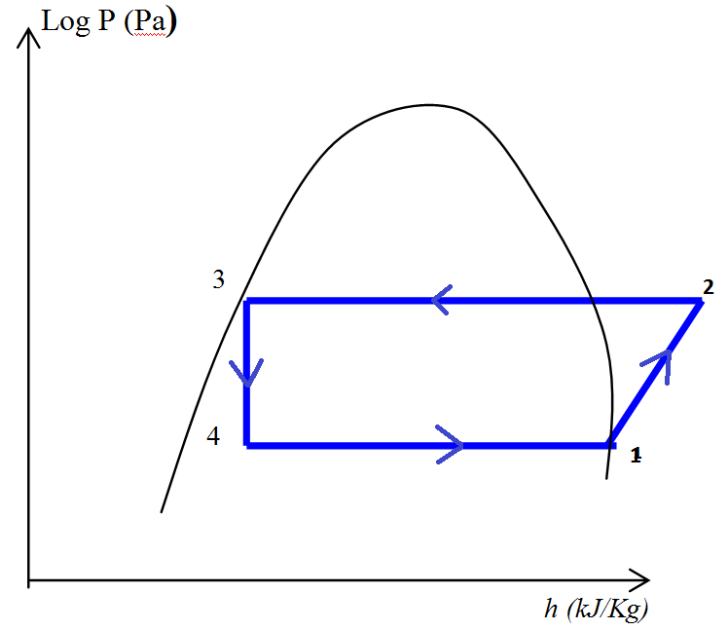
$$COP = e = \frac{-q_c}{w_i}$$

Compresseur et condenseur sont des systèmes ouverts :

$$(h_s - h_e) = w_i + q_r$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Compresseur : } w_i = h_2 - h_1 \\ \text{Condenseur : } q_c = h_3 - h_2 \end{array} \right\}$$

$$e = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$$



**Exercice**

-Lire  $h_1$  ,  $h_2$  ,  $h_3$  et en déduire  $e$ .

-Si  $D_m = 4,2$  g/s, calculer la puissance  $P_c$  fournie au local.

# Modélisation de la PAC sous Matlab-Simulink (S.T.I)

## Paramètres influents

**Puissances mises en jeu** sur chacun des 4 éléments de la PAC :

$P_{12} = D_m \cdot (h_2 - h_1) > 0$  puissance reçue par R134a dans le compresseur

$P_{23} = D_m \cdot (h_3 - h_2) < 0$  puissance « fournie » par R134a au local

$P_{34} = 0$  détendeur isenthalpe

$P_{41} = D_m \cdot (h_1 - h_4) > 0$  puissance reçue par R134a (air, eau ou sol).

$$P_{12} + P_{23} + P_{34} + P_{41} = 0 \text{ donc } -P_{23} = P_{12} + P_{41}$$

**Puissance reçue par le local à réchauffer :**

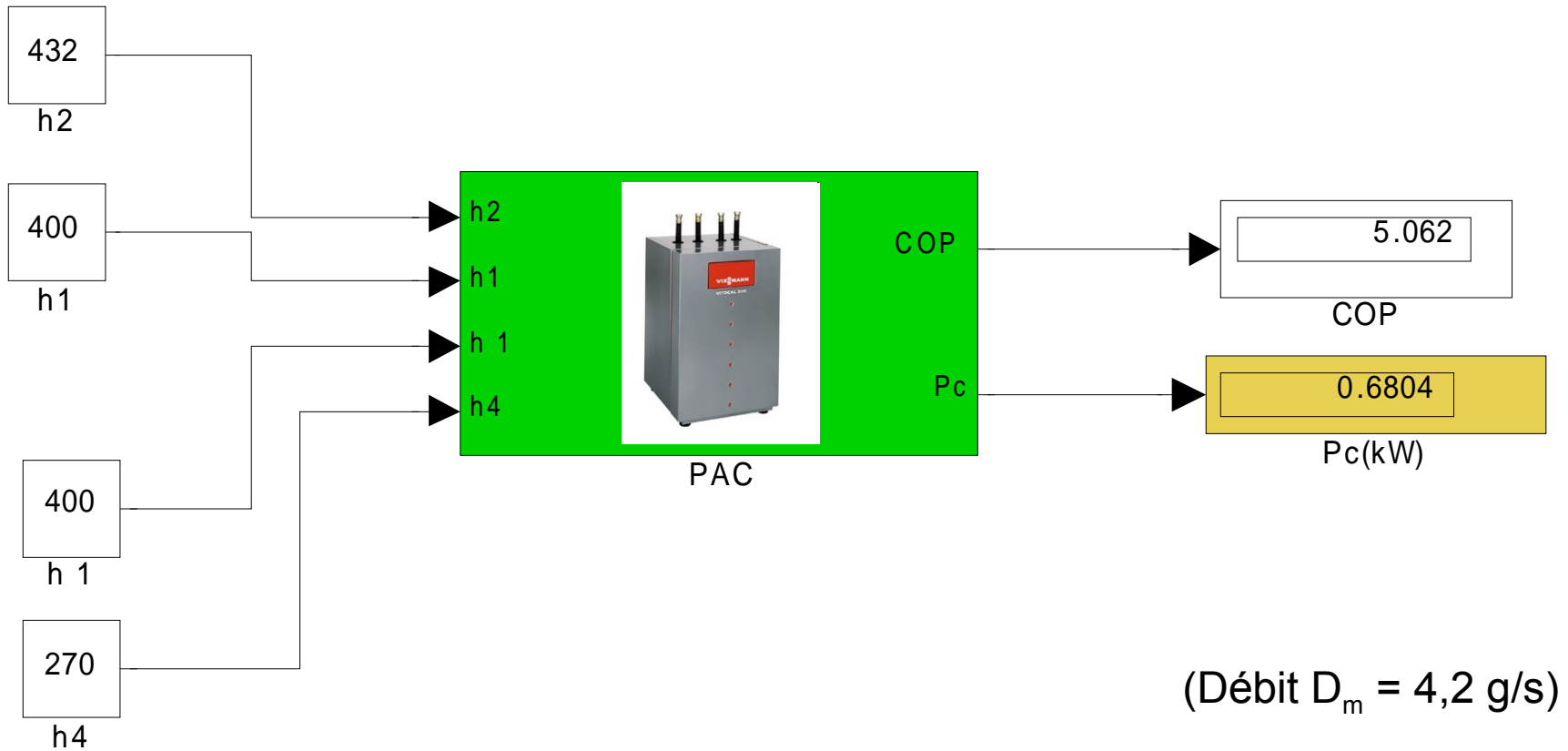
$$P_{\text{local}} = -P_{23} = D_m \cdot (h_2 - h_1) + D_m \cdot (h_1 - h_4)$$

compresseur

Source froide  
(air, eau, sol)

# Modélisation de la PAC sous Matlab-Simulink

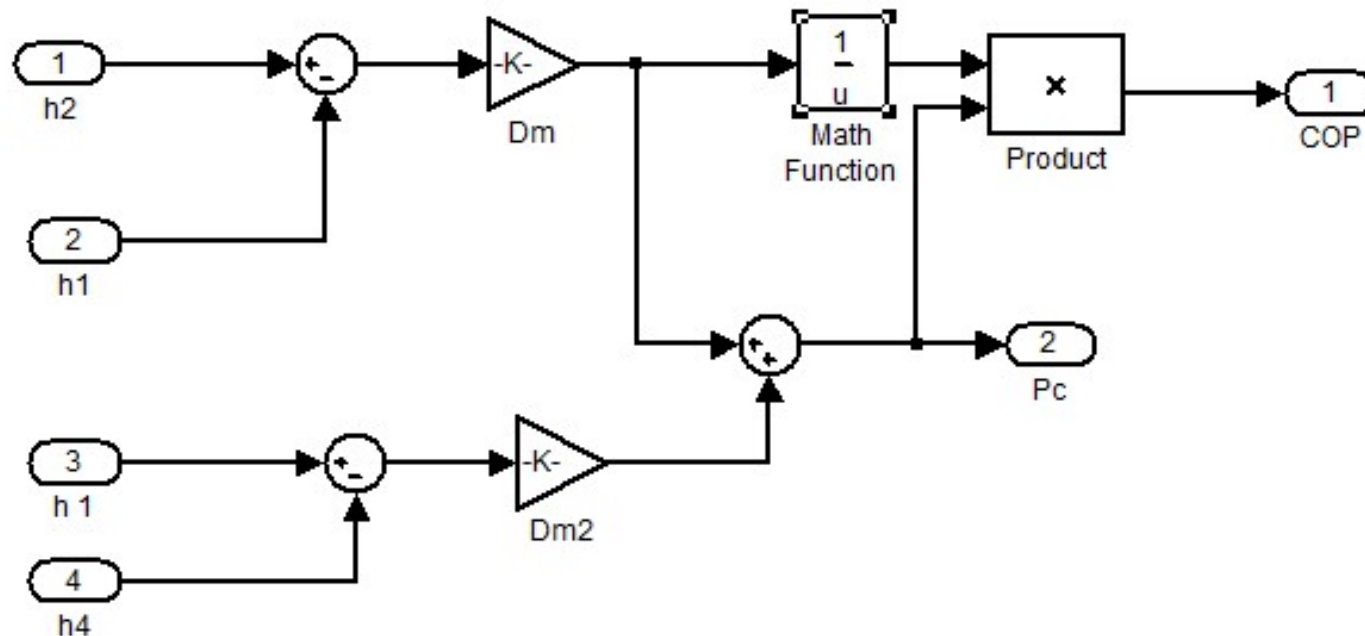
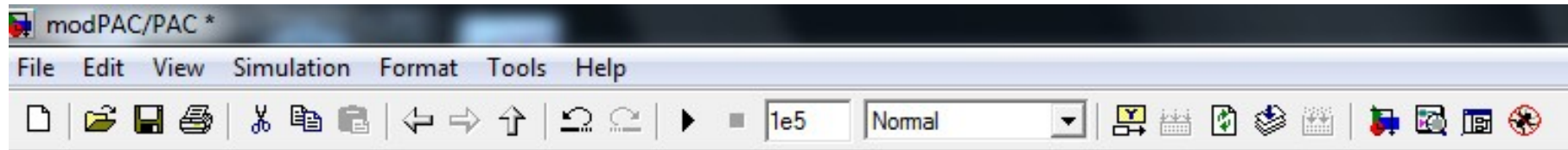
## Paramètres influents



# Modélisation de la PAC sous Matlab-Simulink

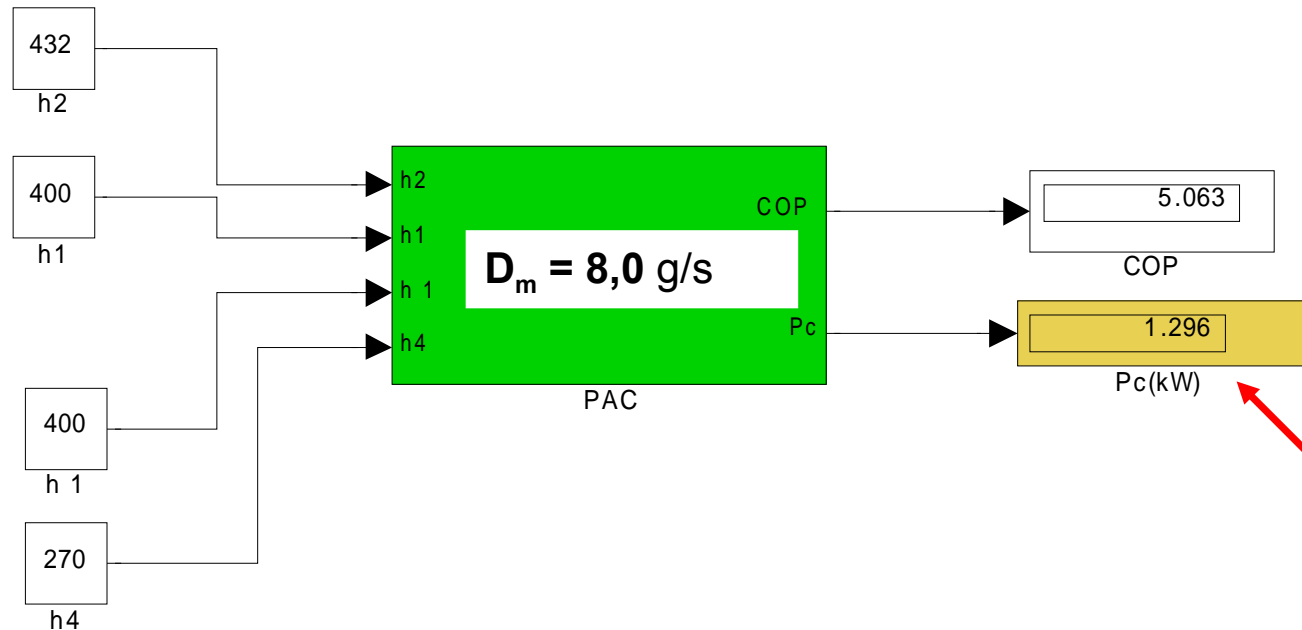
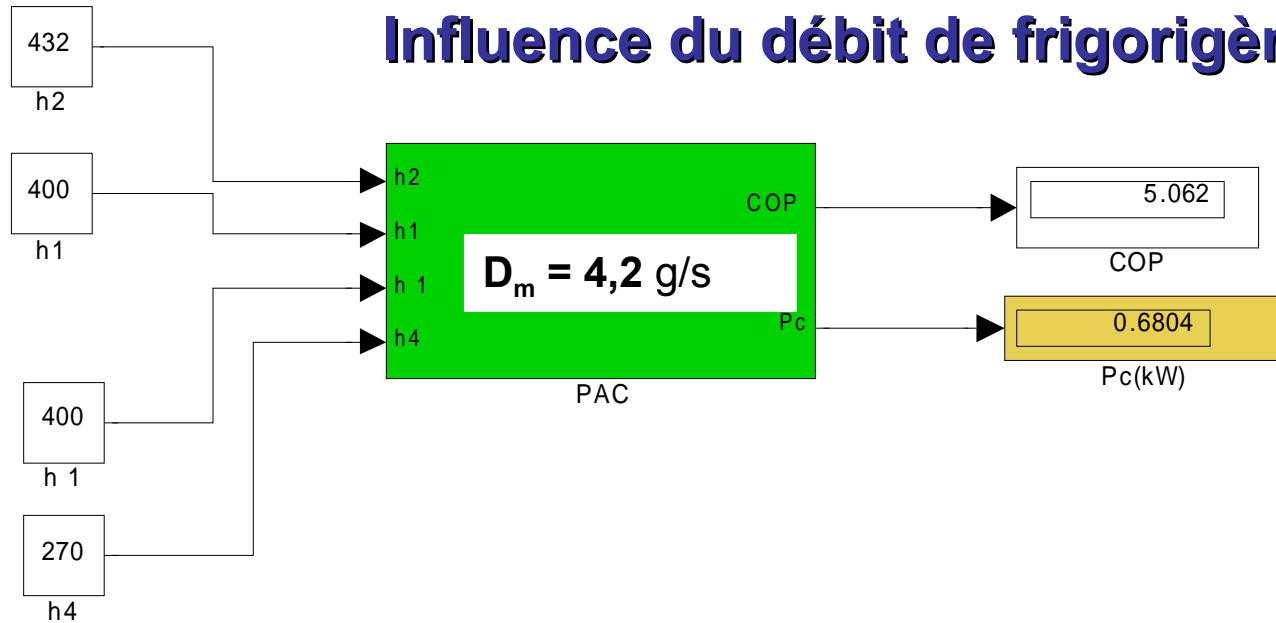
## Sous-système PAC

$$P_{\text{local}} = -P_{23} = D_m \cdot (h_2 - h_1) + D_m \cdot (h_1 - h_4)$$



# Modélisation de la PAC sous Matlab-Simulink

## Influence du débit de frigorigère




# La pompe à chaleur (PAC)

## Prise en compte des irréversibilités : diminution de l'efficacité

### Les sources d'irréversibilités :

- transfert de chaleur
- viscosité, frottement
- diffusion (mélange)
- réactions chimiques

$$\Delta S = s_2 - s_1 = \frac{q_r}{T_o} + s_c$$


$s_c > 0$  pour une transf. irréversible

**Influence des irréversibilités sur la PAC :**  $COP = e = \frac{-q_c}{w_i}$

$$\Delta S = 0 = \frac{q_c}{T_c} + \frac{q_F}{T_F} + s_c$$

$$\Delta u = 0 = q_c + q_F + w_i$$


$$COP = e = \frac{1}{1 - \frac{T_F}{T_C} - T_F \frac{s_c}{q_c}}$$

Bilans sur un cycle

# La pompe à chaleur (PAC)

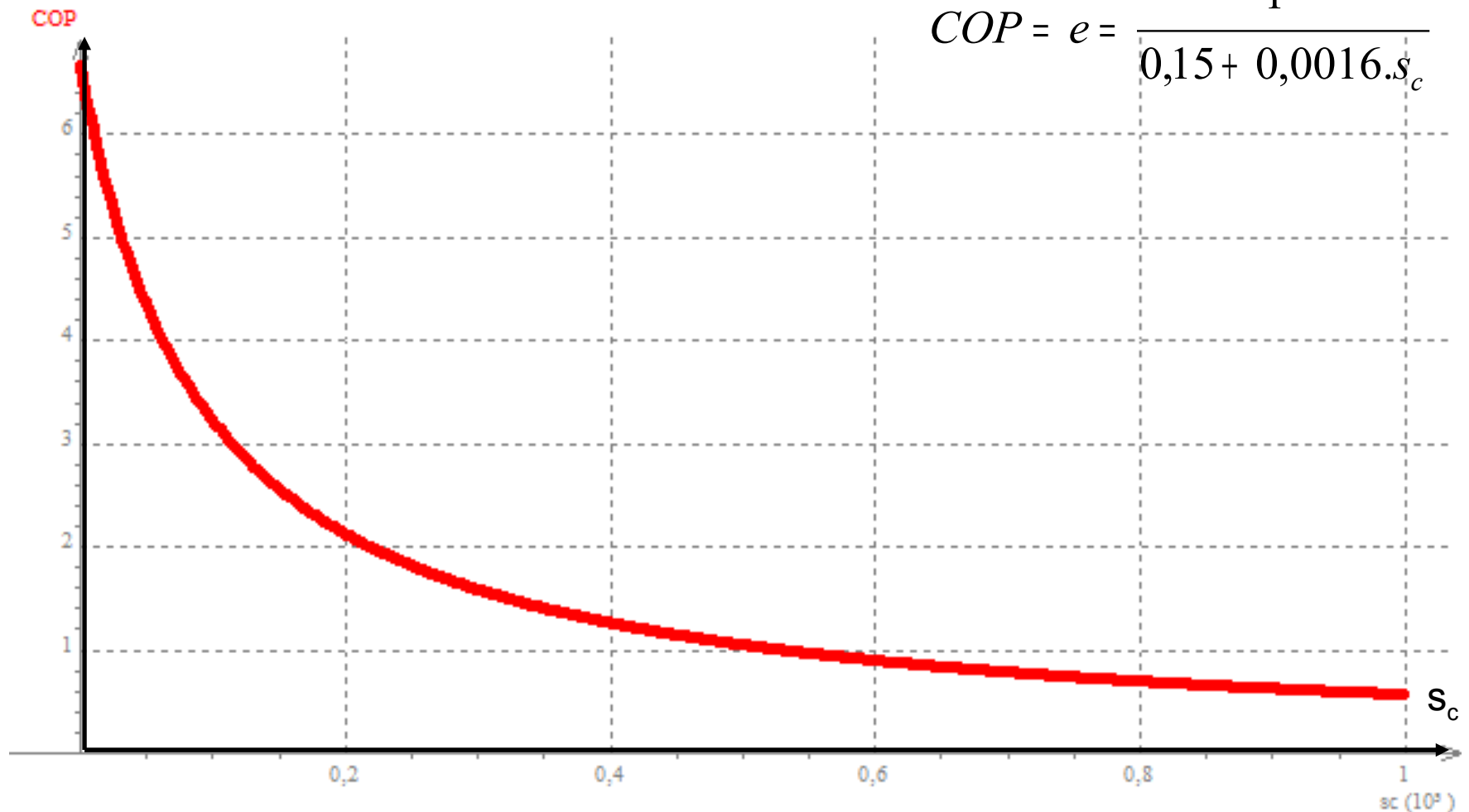
## Prise en compte des irréversibilités : diminution de l'efficacité

$$COP = e = \frac{1}{1 - \frac{T_F}{T_C} - T_F \frac{s_c}{q_c}}$$

Valeurs précédentes :

$$\begin{cases} T_F = 0^\circ\text{C} = 273\text{K} ; T_C = 50^\circ\text{C} = 373\text{K} ; \\ q_c = -162 \text{ kJ.kg}^{-1} \end{cases}$$

$$COP = e = \frac{1}{0,15 + 0,0016.s_c}$$





# La pompe à chaleur (PAC)

## Machine « idéale » : Machine de CARNOT

Pour une machine pour laquelle toutes les sources d'irrégularités (frottements, viscosité, forts gradients...) peuvent être négligées :  $s_c = 0 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ .

$$\Rightarrow COP = (COP)_{\max} = \frac{1}{1 - \frac{T_F}{T_C}} = \frac{T_c}{T_c - T_F} \quad (e_{\max} = 6,4)$$

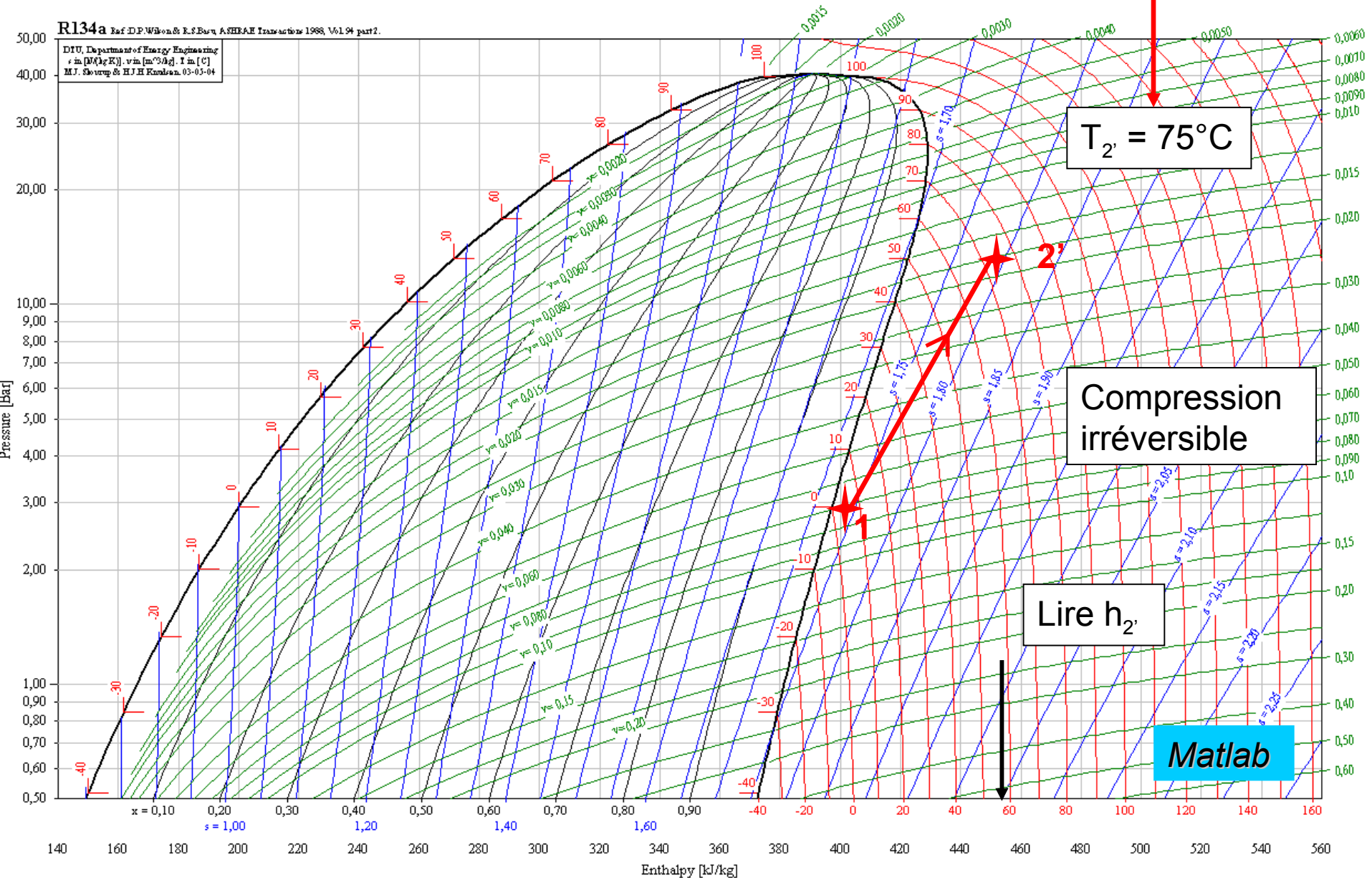
-L'efficacité maximale ne dépend que de la température des sources (théorème de Carnot).

-Les performances sont d'autant plus faibles que l'écart de température entre la SC et la SF est important.(COP PAC sur air < COP PAC géothermique)

└─→ **À montrer expérimentalement en TP de physique**

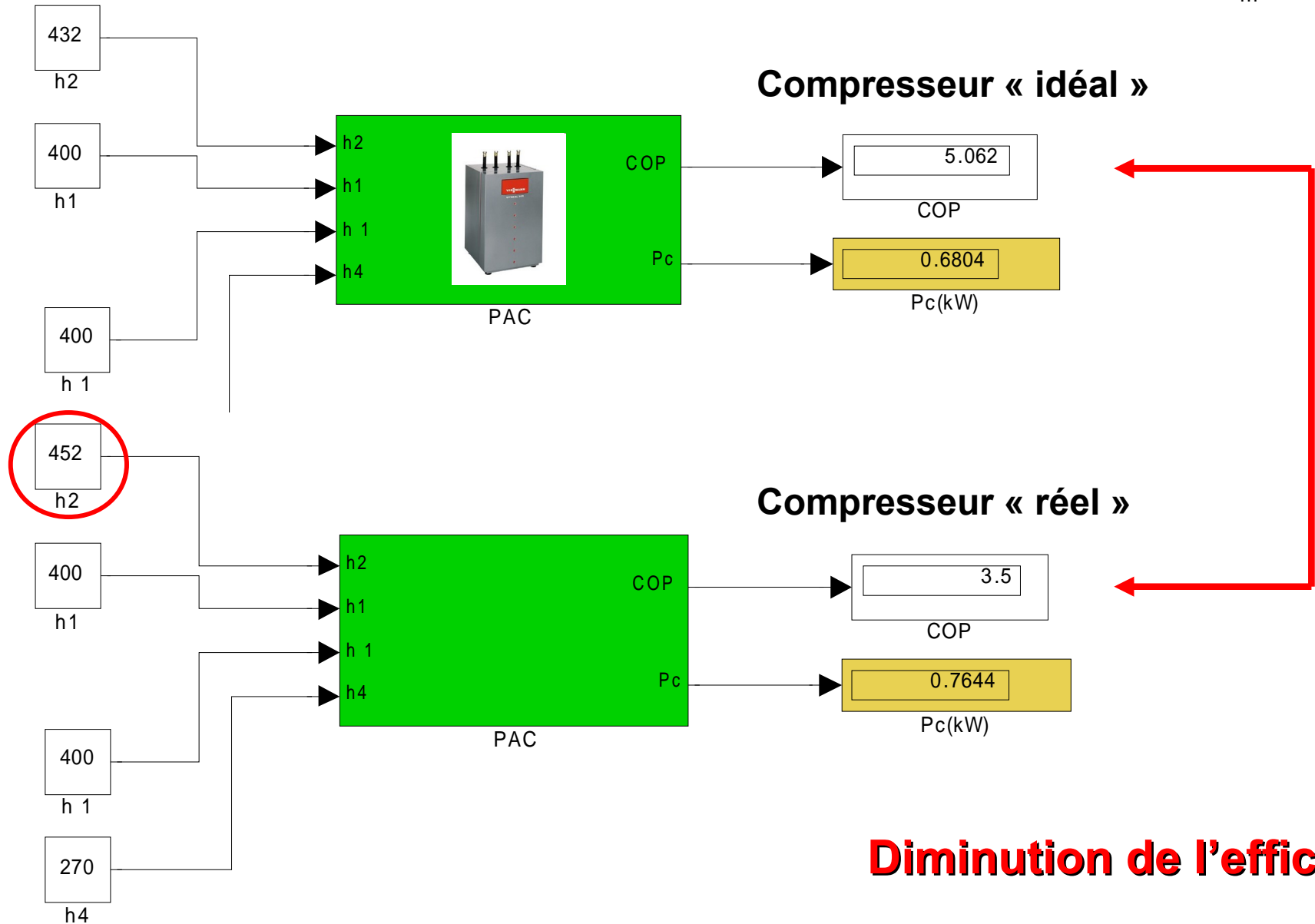
# Modélisation de la PAC sous Matlab-Simulink

## Influence des irréversibilités (compresseur)



# Modélisation de la PAC sous Matlab-Simulink

Influence des irréversibilités (compresseur) (Débit  $D_m = 4,2 \text{ g/s}$ )



# La pompe à chaleur (PAC)

## Influence des pertes de charge

Fluide visqueux → pertes d'énergie appelées **pertes de charge**.

Dépendent :

- de la forme, dimensions, rugosité de la canalisation
- de la vitesse d'écoulement
- de la viscosité du fluide.

### Exemple d'un calcul de perte de charge:

Tuyau en cuivre de diamètre  $D = 12 \text{ mm}$

Rugosité absolue :  $\varepsilon = 0,05 \text{ mm}$  (cuivre entartré)

Masse volumique de l'eau :  $\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$

Vitesse de l'eau :  $v = 0,41 \text{ m.s}^{-1}$

Viscosité de l'eau :  $\eta = 0,5.10^{-3} \text{ Pl}$  (à  $50^\circ\text{C}$ )



# La pompe à chaleur (PAC)

## Influence des pertes de charge

- On calcule le **nombre de Reynolds** de l'écoulement:  $R_e = \frac{\rho .v.D}{\eta} \cong 10^4$   $R_e > 3000$  : **régime turbulent**

- On calcule la **rugosité relative** :  $\frac{\varepsilon}{D} = 4,1.10^{-3}$

- On utilise l'**abaque de Colebrook** pour déterminer le coefficient de perte de charge  $\lambda$  .

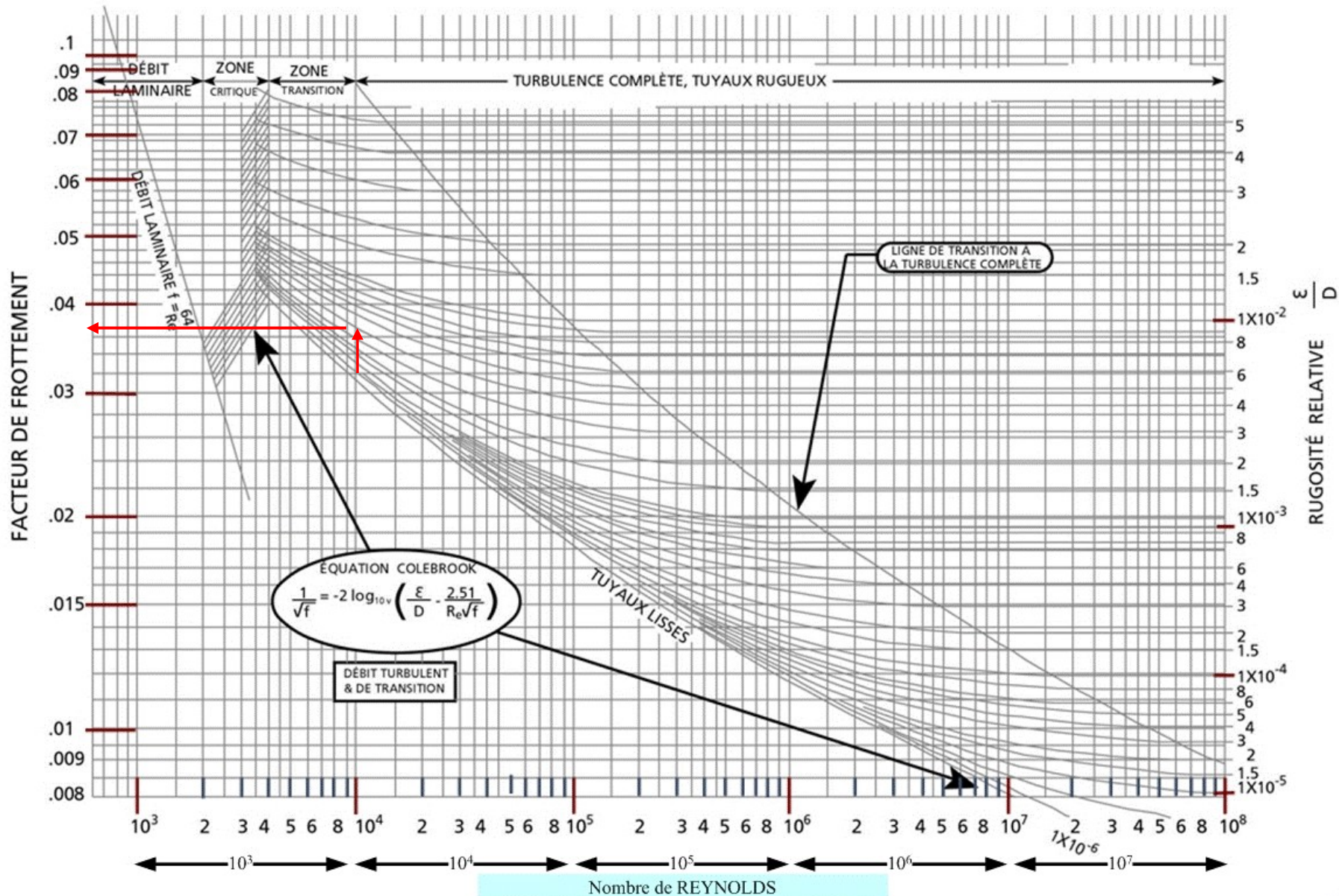
$$\longrightarrow \lambda = 0,036$$

- On applique la relation donnant la **perte de charge par mètre** :

$$\Delta p = \lambda . \frac{\rho .v^2}{2.D} \qquad \Delta p = 252 Pa.m^{-1} = 2,52 mbar.m^{-1}$$

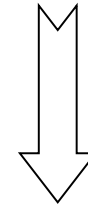
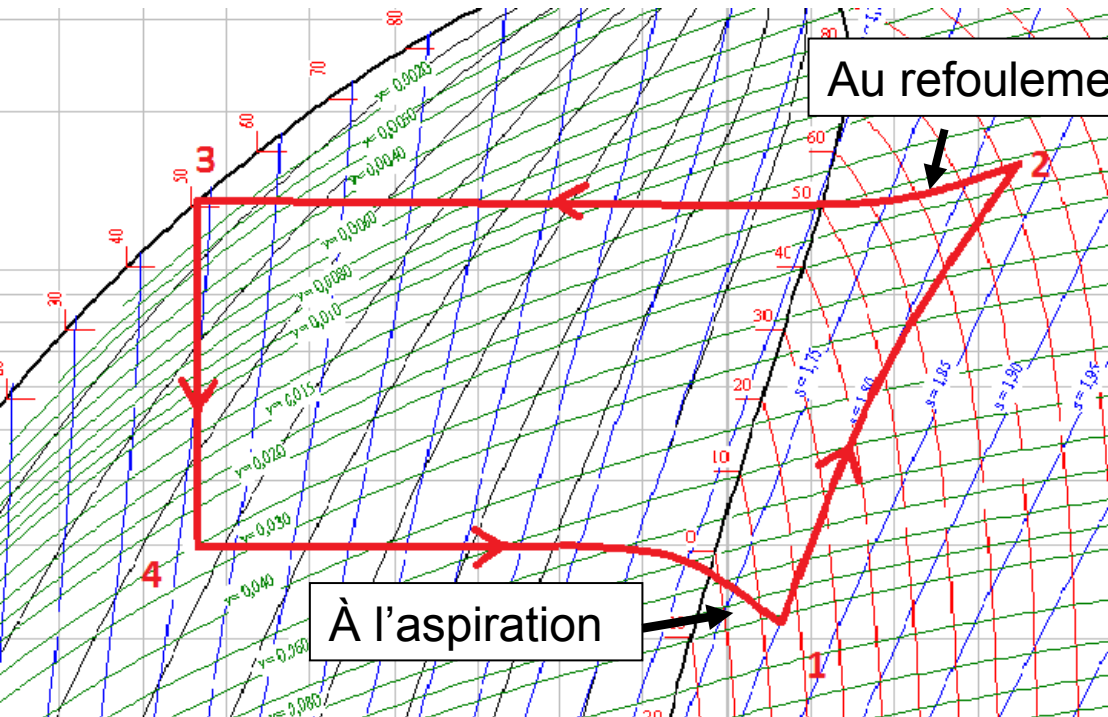
(pertes de charge régulières)

# Abaque de Colebrook

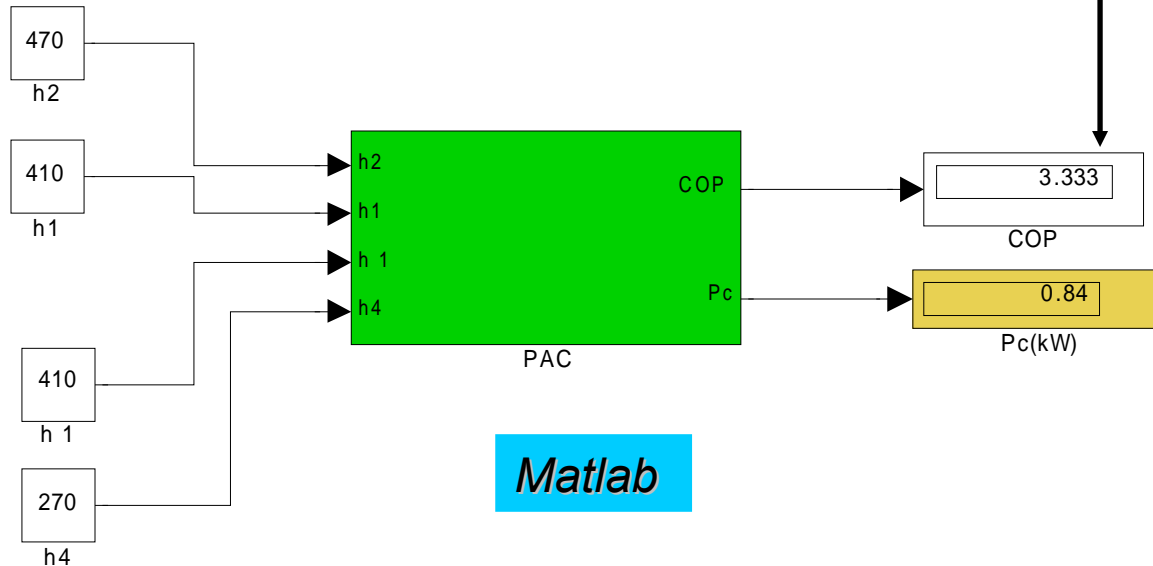




# Influence des pertes de charge sur la PAC



**COP diminué**

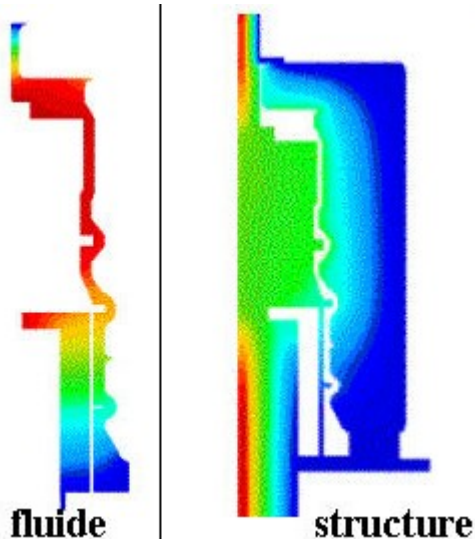


= 5 sans perte de charge

# Transferts thermiques

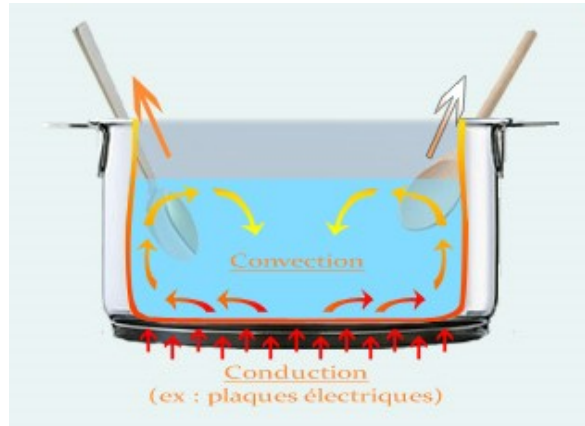
3 modes de transferts thermiques :

## CONDUCTION



animation conduction

## CONVECTION



animation convection

## RAYONNEMENTS

Un corps chauffé émet de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique.

$$P_{ray} = S \cdot \sigma \cdot T^4$$

$$(\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4})$$

Le rayonnement thermique se déplace vers les courtes longueurs d'ondes quand la température du corps augmente

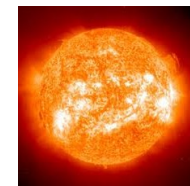
$$\lambda_{max} \cdot T = 0,002898 m \cdot K$$

300K



9,6  $\mu$  (IR)

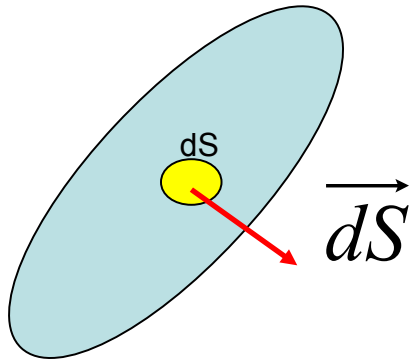
6000K



0,48  $\mu$



# Flux thermique (en W)

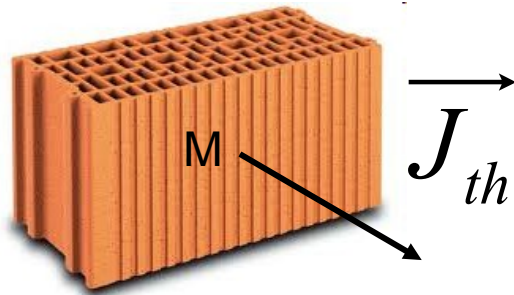


$$\underset{\substack{\uparrow \\ \text{(J)}}}{\delta Q_r} = \overset{\substack{\downarrow \\ \text{Flux thermique}}}{\Phi} .dt = P_{th} .dt$$

Densité de flux thermique ( $\text{W.m}^{-2}$ )

$$\Phi(t) = J_{th} . S \quad (\text{si } J \text{ est uniforme})$$

# Conduction thermique : loi de Fourier



**Loi de Fourier** : (loi locale en un point M du matériau)

$$\vec{J}_{th}(M, t) = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{W.m}^{-2}}}{-\lambda} \cdot \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \vec{e}_x$$

Transfert naturel du chaud vers le froid

$\lambda$  : Conductivité thermique du matériau en  $\text{W.K}^{-1}.\text{m}^{-1} > 0$

Matériaux	$\lambda$ [W/mK]	Remarques
Cuivre	380	Très bon conducteur
Aluminium	230	
Acier	50	
Terre comprimée	1.05	
Terre cuite	1.15	
Béton	1.75	
Béton caverneux	1,40	
Plâtre	0.35	
Bois naturel	0.15 à 0.23	
Panneau de contreplaqué	0.12	
Panneau de particule	0,14	
Polystyrène expansé	0.04	Isolant thermique
Laine de Verre	0.04	Idem
Laine de roche	0,038 à 0,047	
Liège comprimé	0,10	
Verre	1.10	

La conductivité thermique d'un matériau **solide** est fonction de :

1. sa densité : plus un matériau est léger plus il est isolant
2. sa température : plus un matériau est « chaud » plus il est conducteur

Air :  $0,026 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$

**La conductivité thermique des gaz, au voisinage de la pression atmosphérique, croît avec la température.**

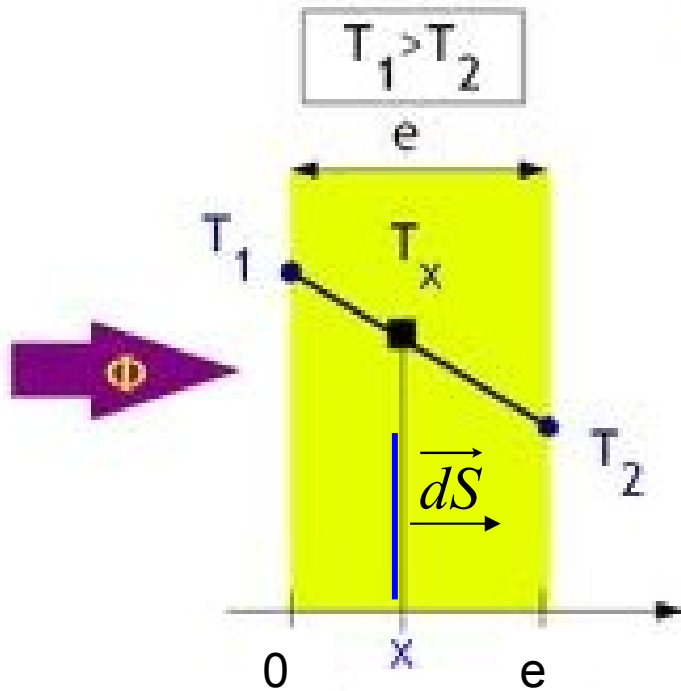
Eau :  $0,6 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$

**À l'exception de l'eau, de quelques solutions aqueuses, de quelques molécules à plusieurs fonctions amine ou hydroxy, les conductivités thermiques de la plupart des liquides décroissent avec la température.**

# Conduction thermique

## Profil de température pour un mur entre 2 thermostats

Mur en béton, régime stationnaire, milieu passif



$$T(x) = \frac{T_2 - T_1}{e} \cdot x + T_1$$

Profil **linéaire** de température dans le mur

Densité de flux thermique

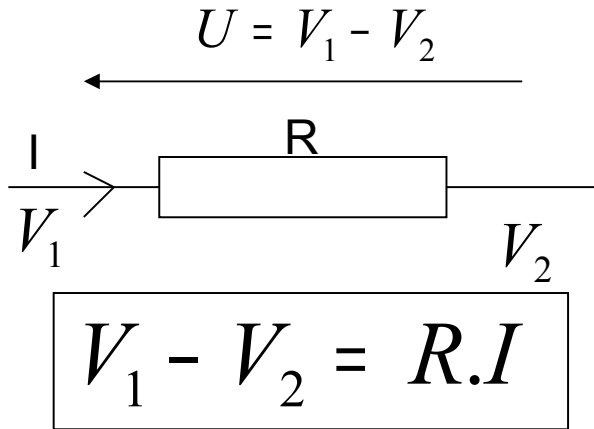
$$\vec{J}_{th} = -\lambda \cdot \overrightarrow{grad}T(x) = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \vec{e}_x = \lambda \frac{T_1 - T_2}{e} \vec{e}_x$$

Puissance (ou flux)  
thermique traversant une  
section  $S$  du mur :

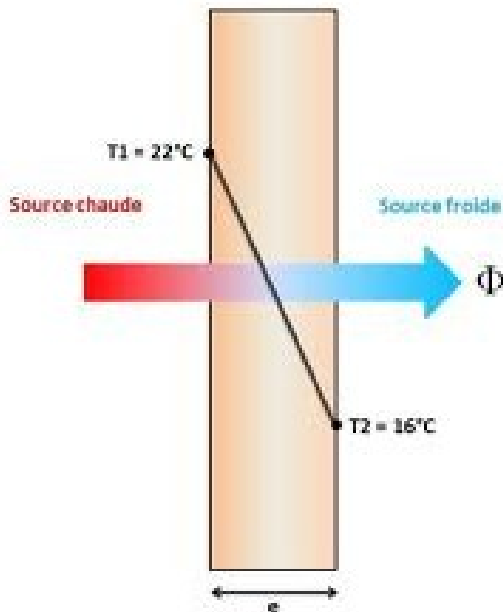
$$\Phi = \frac{\lambda \cdot S}{e} (T_1 - T_2) \iff T_1 - T_2 = \frac{e}{\lambda \cdot S} \cdot \Phi$$

# Modélisation électrocinétique des échanges thermiques en régime stationnaire

## Electrocinétique

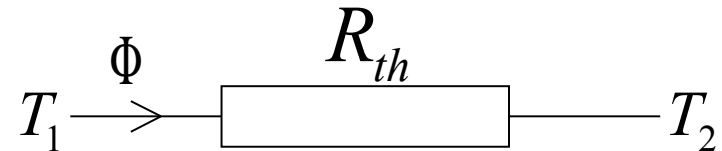
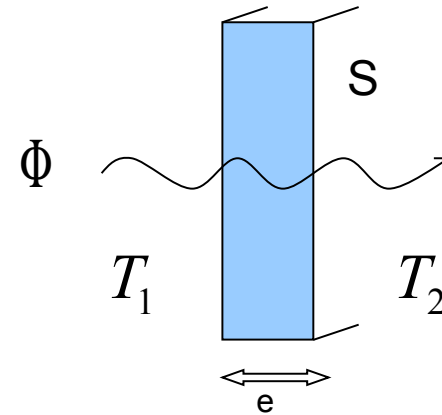


Cas d'un mur



## Thermique

Flux thermique ou  
puissance  
thermique en W



$$T_1 - T_2 = R_{th} \cdot \Phi$$



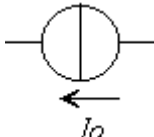
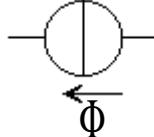
$$R_{th} = \frac{e}{\lambda \cdot S}$$

Résistance thermique en  $\text{K.W}^{-1}$

# Modélisation électrocinétique des échanges thermiques en régime stationnaire

## Les analogies

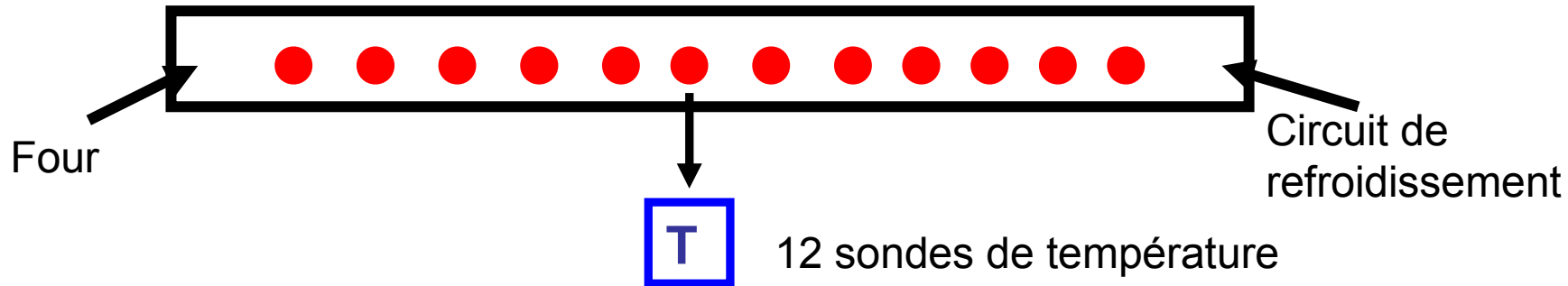
$$T_1 - T_2 = R_{th} \cdot \Phi$$

Électricité	Thermique
Potentiel électrique V 	Température T 
Intensité I 	Flux thermique 
Résistance électrique R	Résistance thermique $R_{th}$
Lois des nœuds et des mailles Associations série ou parallèle	Lois des nœuds et des mailles Associations série ou parallèle

Plus  $R_{th}$  est grande, plus l'isolation est importante

# Manipulations en Sciences-Physiques (1ère – Terminale)

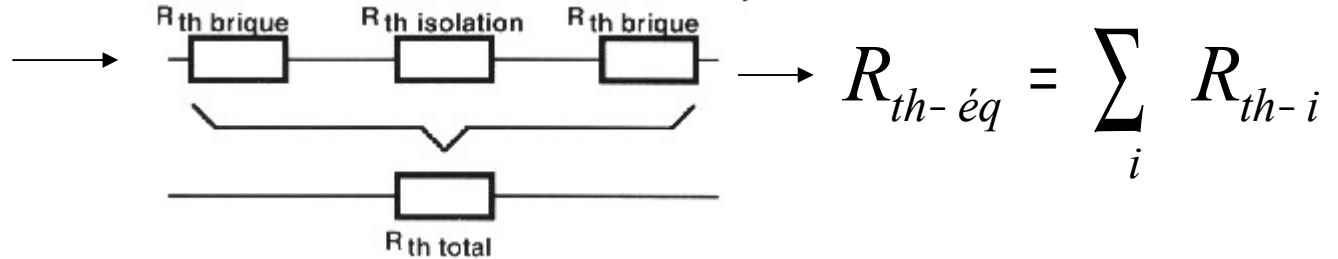
## Appareil de conduction thermique (Turgot)



- Barre cylindrique d'Aluminium ( $\lambda = 200 \text{ W.K}^{-1}\text{m}^{-1}$ ), de diamètre  $d = 35 \text{ mm}$ ,  $L = 22 \text{ cm}$ .
- Calorifugée latéralement.
- Relever, en régime permanent, les températures des 12 capteurs.
- Montrer (modélisation) que le profil est linéaire; interpréter la pente de la courbe.
- Calculer la résistance thermique et la conductance thermique.
- En déduire le flux thermique de conduction  $\Phi$  dans la barre.

# Association de résistances thermiques en série : exemple du double-vitrage

sont parcourues par le même flux



## Simple vitrage



$e = 6 \text{ mm}$

$\lambda_{\text{verre}} = 1,2 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$

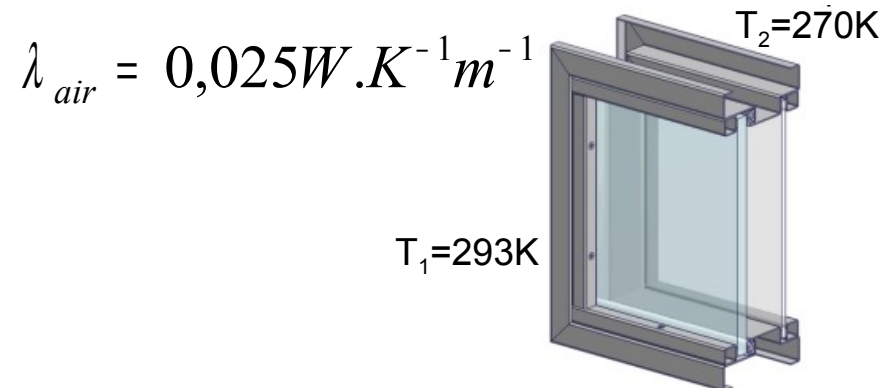
$S = 1 \text{ m}^2$

$T_2 = 270 \text{ K}$

$T_1 = 293 \text{ K}$

Calculer  $R_{th1}$  et le flux  $\Phi_1$

## Double vitrage verre-air-verre



$\lambda_{\text{air}} = 0,025 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$

$T_1 = 293 \text{ K}$

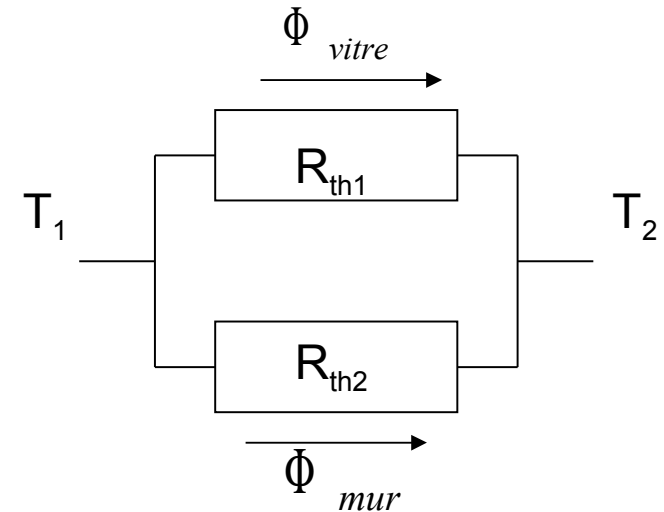
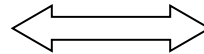
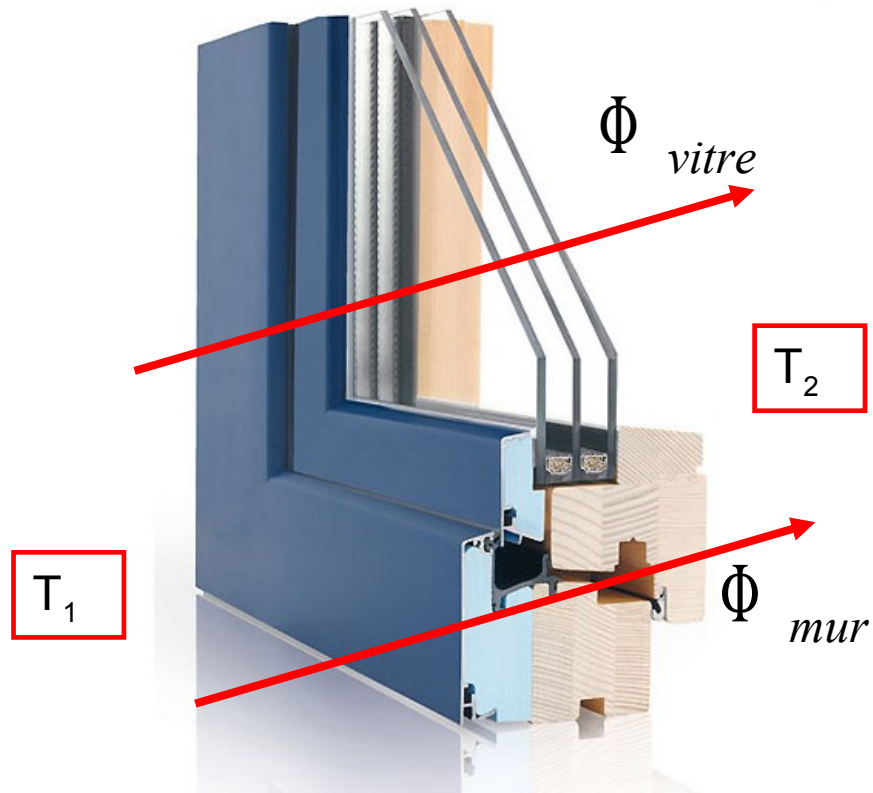
$T_2 = 270 \text{ K}$

$e_{v1} = 3 \text{ mm}$  ;  $e_{\text{air}} = 3 \text{ mm}$  ;  $e_{v2} = 3 \text{ mm}$

Calculer  $R_{th2}$  et le flux  $\Phi_2$

# Association de résistances thermiques en parallèle

sont soumises à la même différence de température



$$T_1 - T_2 = R_{th-eq} \cdot \Phi$$

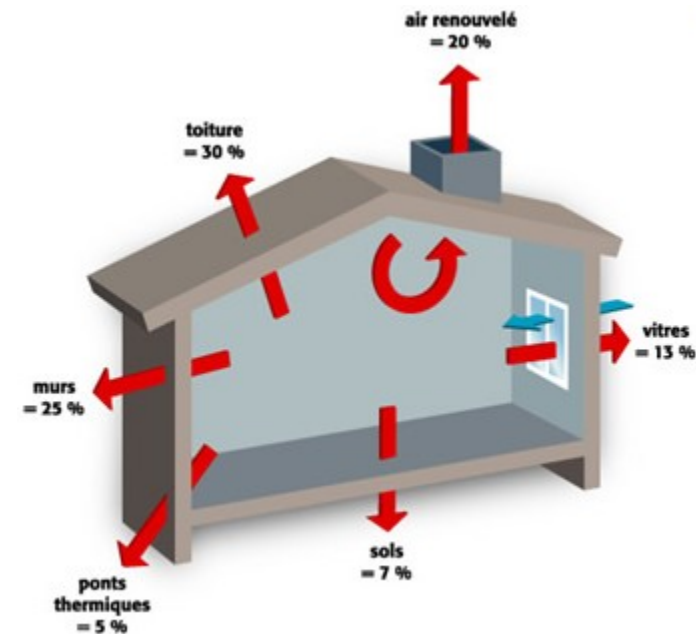
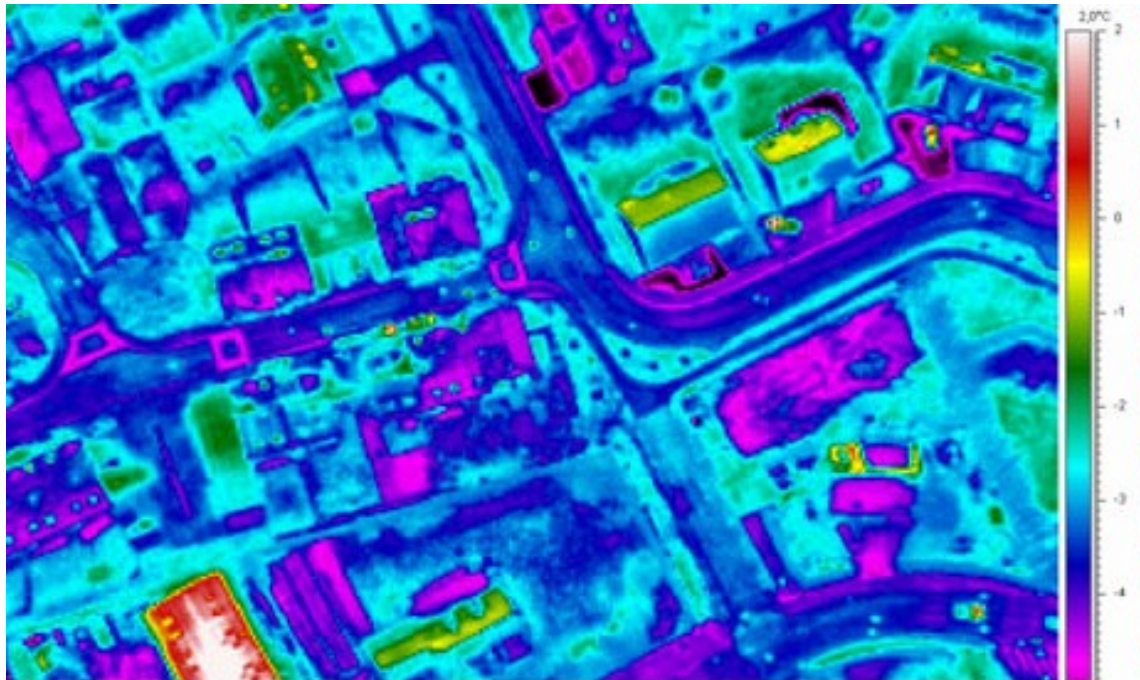
$$\frac{1}{R_{th-eq}} = \frac{1}{R_{th1}} + \frac{1}{R_{th2}}$$



# Thermique de l'habitat : bilan thermique sur un local

Entreprise *Sergies* pour la maîtrise des dépenses énergétiques

Survol des habitations avec une caméra infrarouge afin d'identifier les déperditions d'énergie des bâtiments

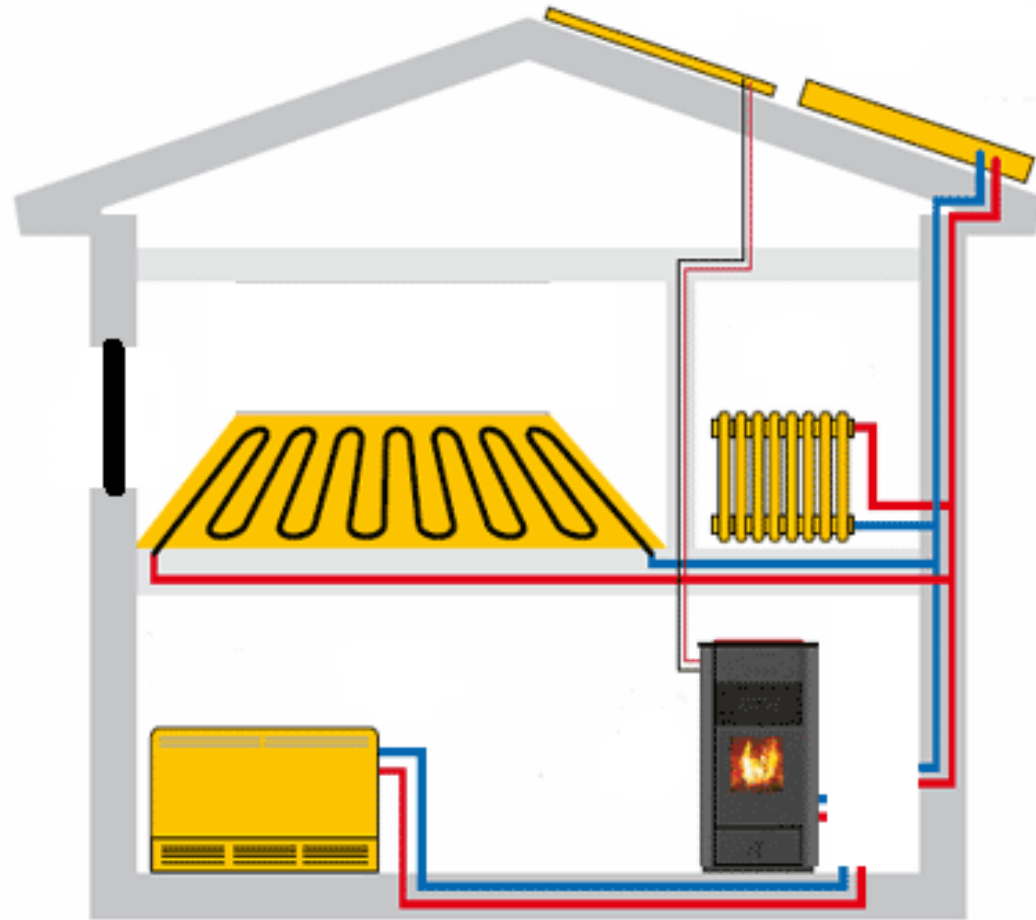


# Bilan thermique sur un système fermé

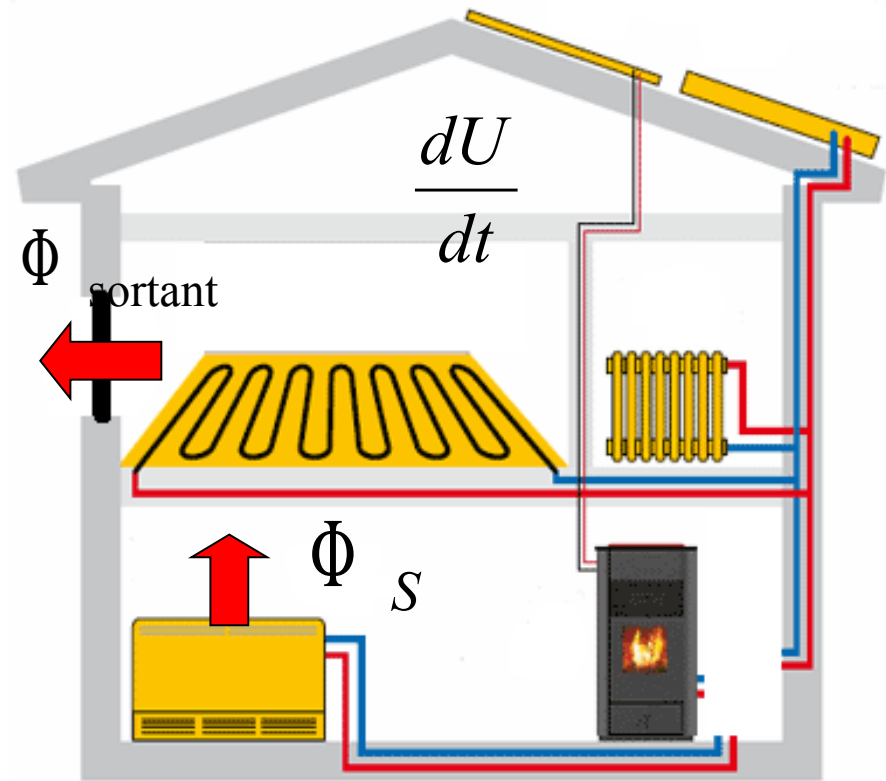
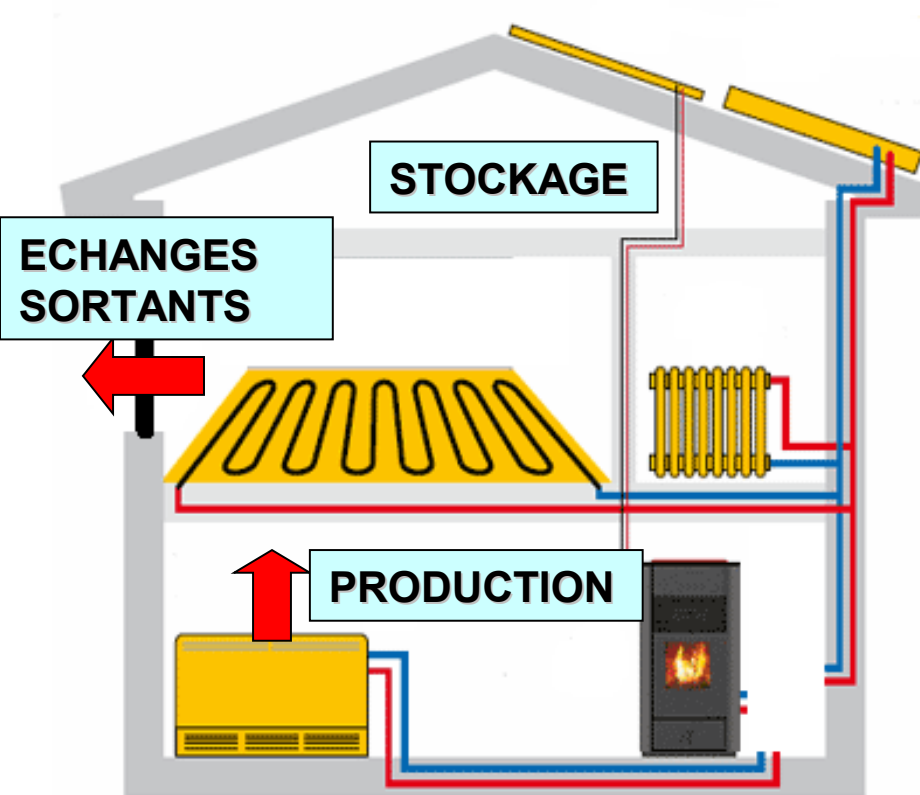
## Premier principe de la thermodynamique appliqué à la thermique.

### Problématique :

- Maison « froide » (  $T_{\text{ext}} = 0^{\circ}\text{C}$  )
- À  $t = 0$ , on allume le chauffage
- Système = air + murs de capacité thermique totale  $C$
- On suppose  $T(t)$  uniforme
- La puissance de chauffe est constante.
- Quelle est l'évolution de  $T = f(t)$  ?



# Bilan thermique



$$\text{PRODUCTION} = \text{STOCKAGE} + \text{ECHANGES SORTANTS}$$

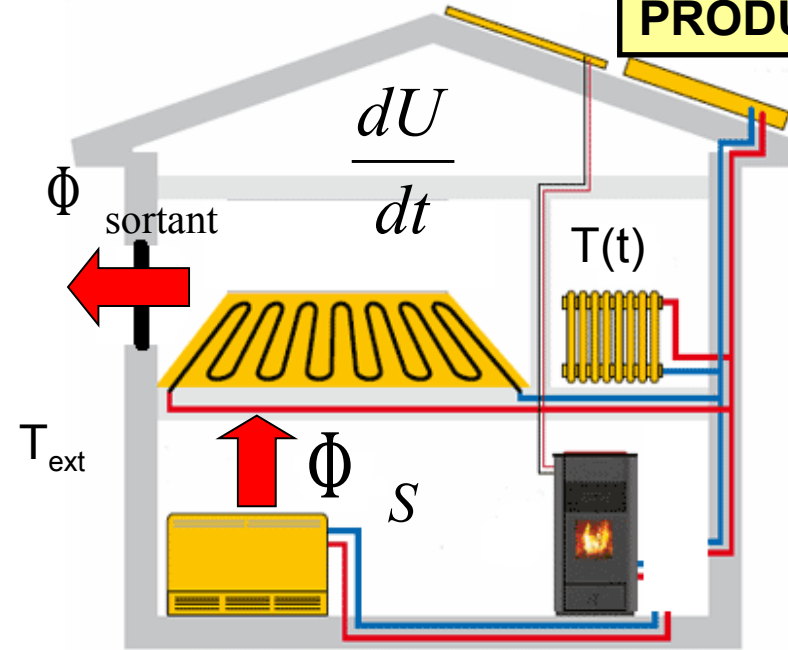
↑  
On allume  
le chauffage

↑  
Dans l'air et  
les murs

↑  
Pertes  
thermiques

# Bilan thermique en Watt

**PRODUCTION = STOCKAGE + ECHANGES SORTANTS**

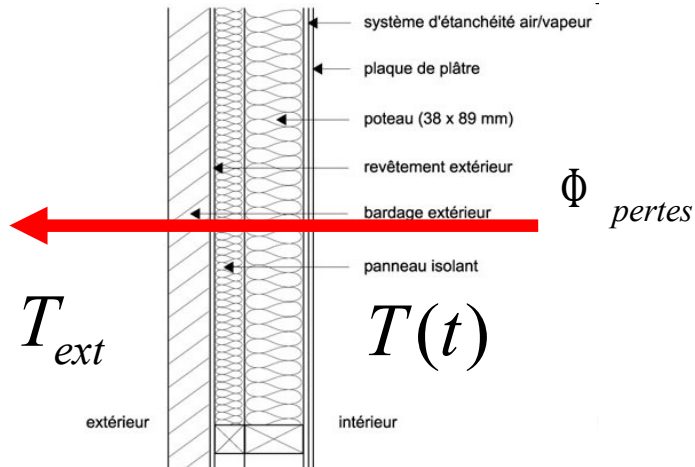


$$\Phi_{\text{sources}} = \frac{dU}{dt} + \Phi_{\text{pertes}}$$

$$\Phi_{\text{sources}} = C \cdot \frac{dT(t)}{dt} + \Phi_{\text{pertes}}$$

**En régime permanent : pas de stockage**

$$\Phi_{\text{sources}} = \Phi_{\text{pertes}}$$



$$\Phi_{\text{pertes}} = \frac{1}{R_{thT}} (T(t) - T_{\text{ext}})$$

# Schéma électrique équivalent à l'habitat

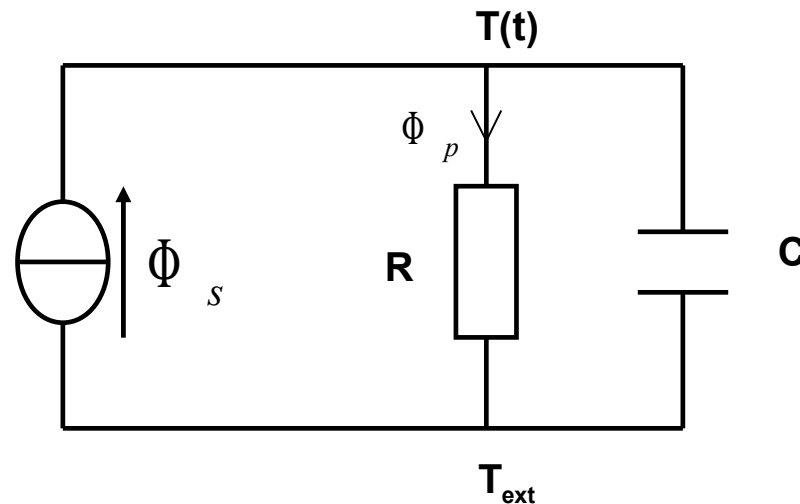
**PRODUCTION = STOCKAGE + ECHANGES SORTANTS**

$$\underbrace{\Phi_{sources}}_{\text{« générateur » de courant}} = \underbrace{C \cdot \frac{dT(t)}{dt}}_{\text{Idem « courant » dans un condensateur}} + \underbrace{\frac{1}{R_{th}} (T(t) - T_{ext})}_{\text{« courant » dans une résistance}}$$

« générateur »  
de courant

Idem « courant »  
dans un condensateur

« courant » dans une résistance



# Bilan thermique en régime permanent

$$\Phi_{sources} = \Phi_{pertes} \implies \Phi_s = \frac{1}{R_{th}} (T_{\infty} - T_{ext}) \implies T_{\infty} = T_{ext} + R_{th} \cdot \Phi_s$$

**Exemple de données sur un local à chauffer :**

On souhaite  $T_{\infty} = 20^{\circ}C$  en régime permanent



$$\Phi_s = 7kW$$



Critère de choix de la PAC

**Pompe à chaleur eau glycolée / eau**

Vitocal 200 de Viessman. D'une puissance de 6,1 à 9,7 kW.

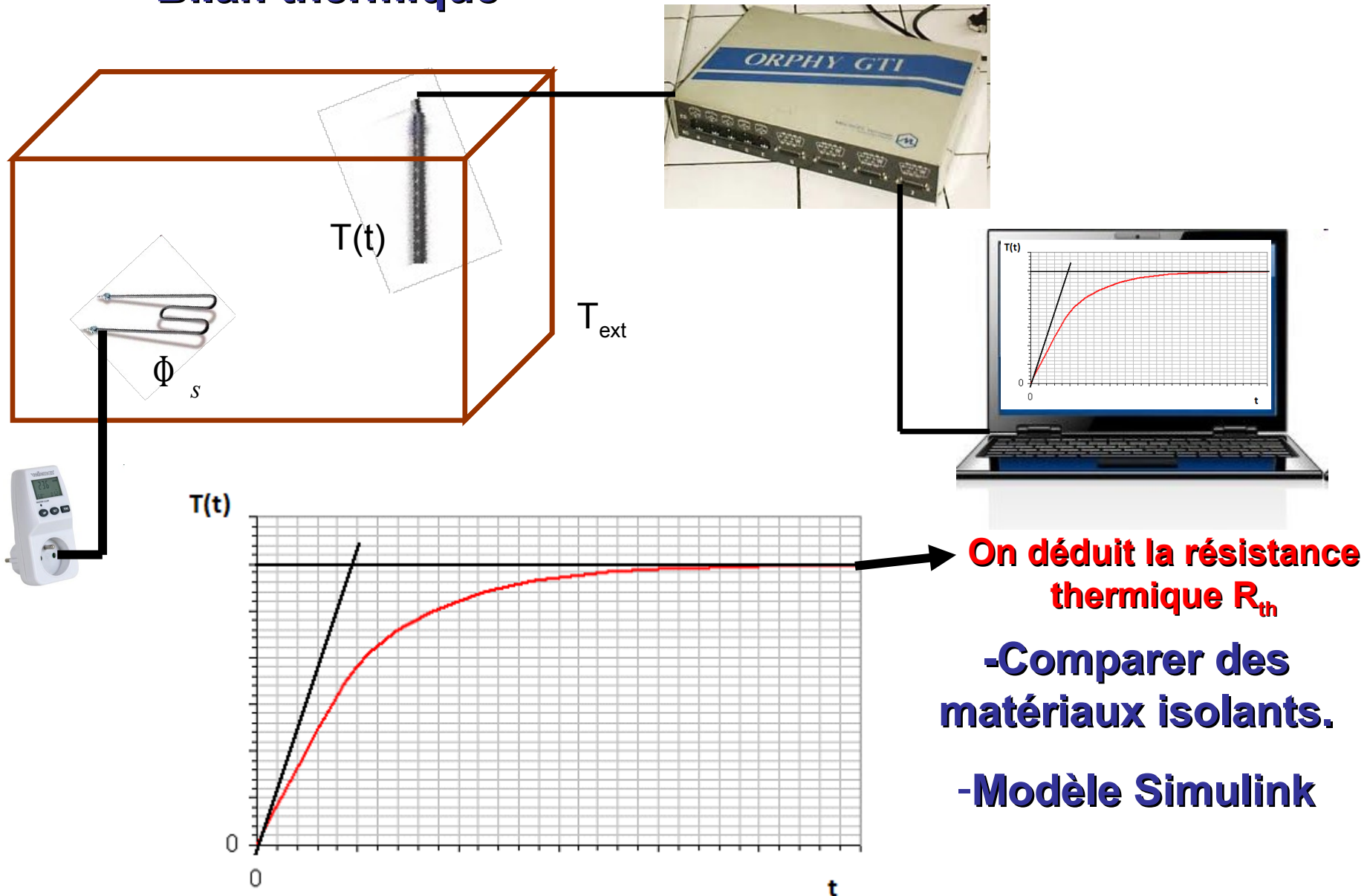
**Prévoir 40W/m<sup>2</sup> pour une maison isolée selon la réglementation RT2000/RT2005**

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{ext} = 0^{\circ}C \\ R_{th} = 2,85.10^{-3} K.W^{-1} \\ C = 6,27.10^6 J.K^{-1} \\ T(t = 0) = 0^{\circ}C \end{array} \right.$$



# Manipulations en Sciences-Physiques (1ère – Terminale)

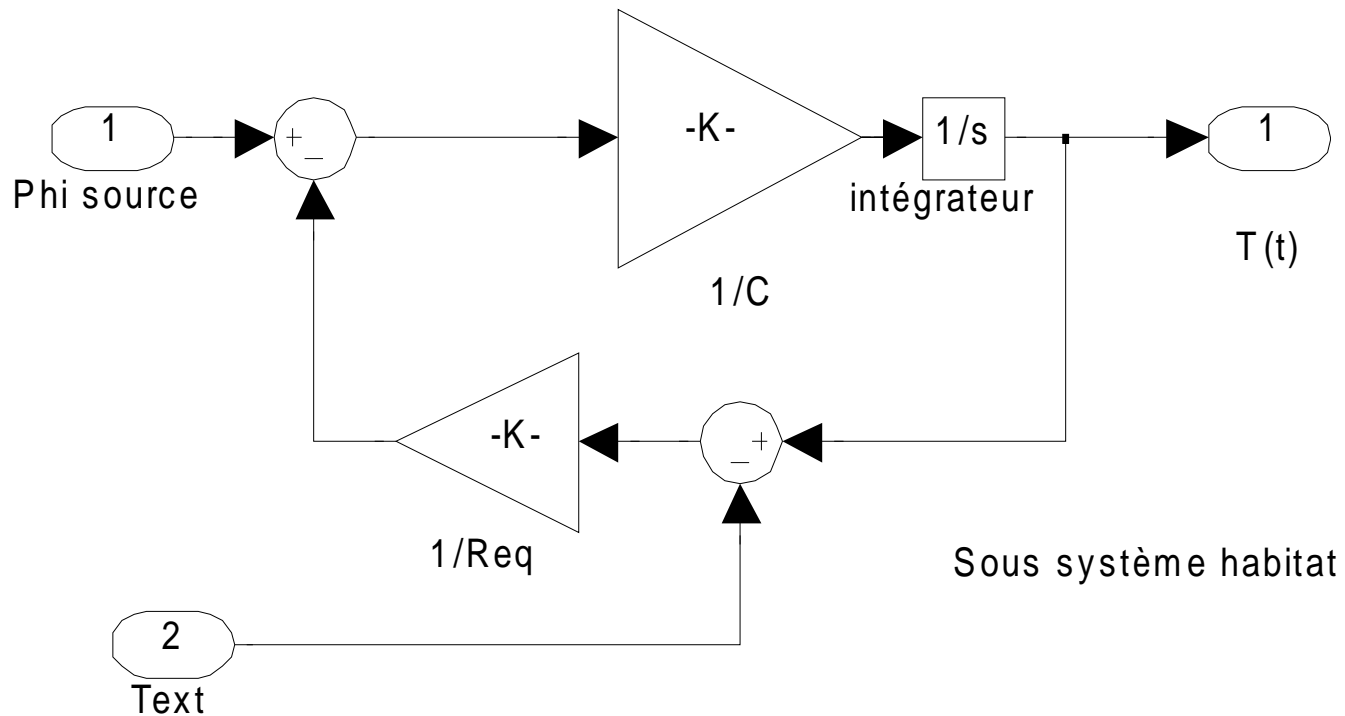
## Bilan thermique





# Modélisation de l'habitat sous Matlab

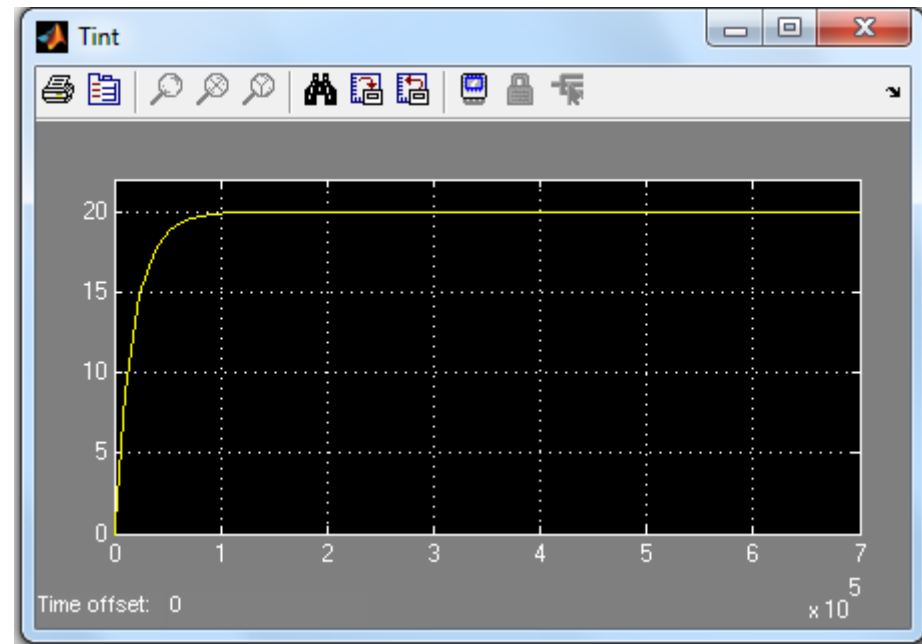
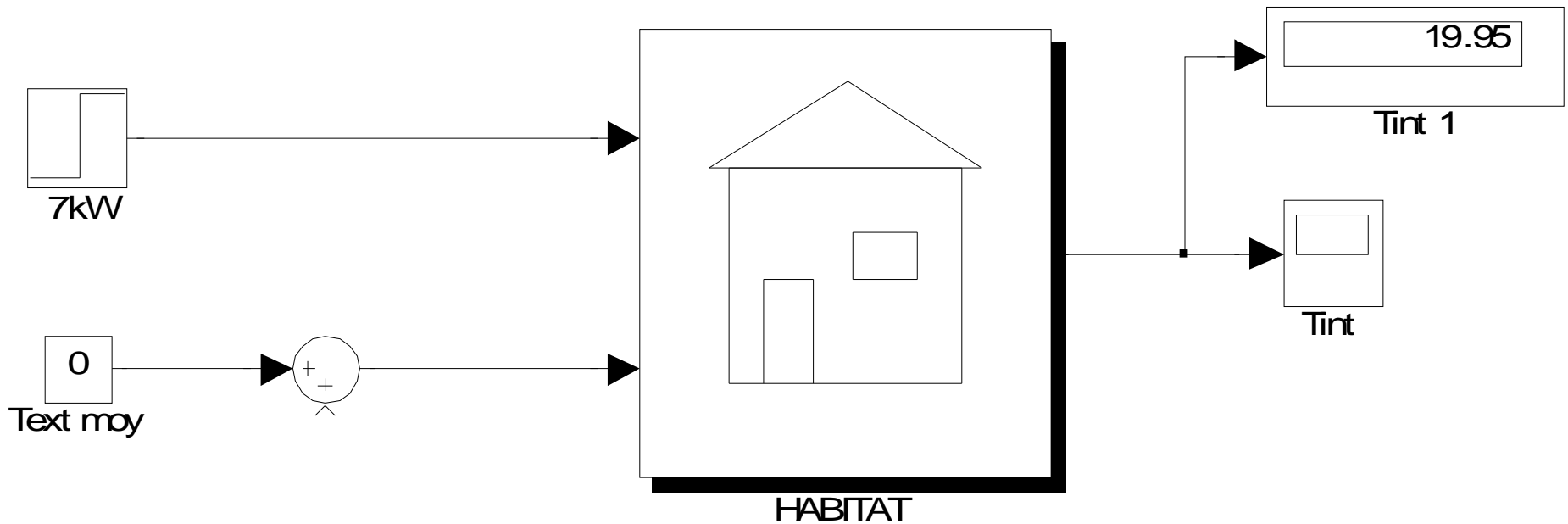
$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{1}{C} \left[ \Phi_s - \frac{1}{R_{th}} (T(t) - T_{ext}) \right]$$



**Matlab**

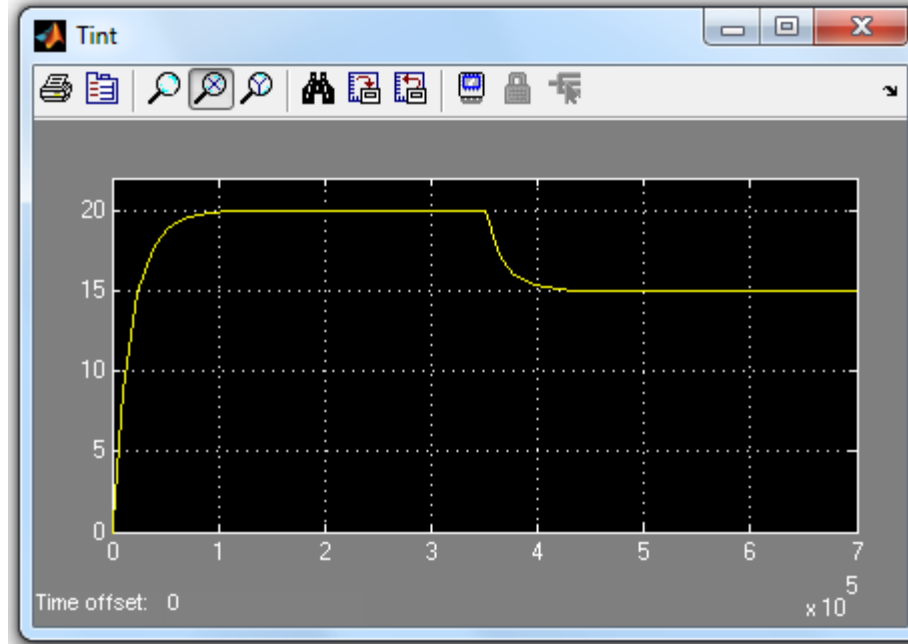


# Modélisation de l'habitat sous Matlab

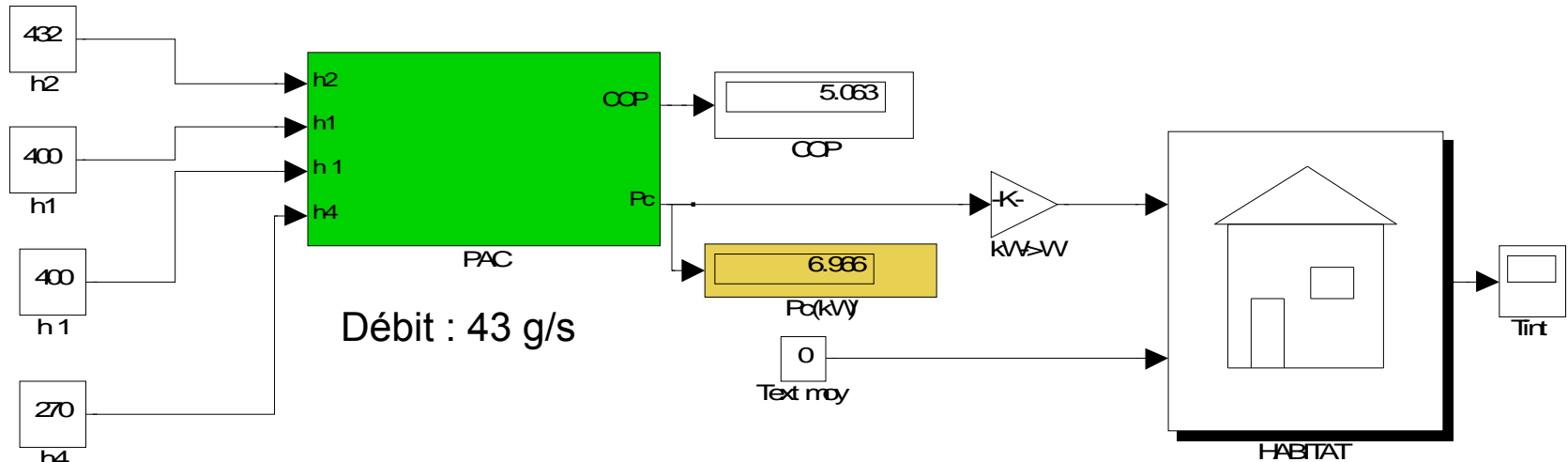


# Modélisation de l'habitat sous Matlab : influence des paramètres

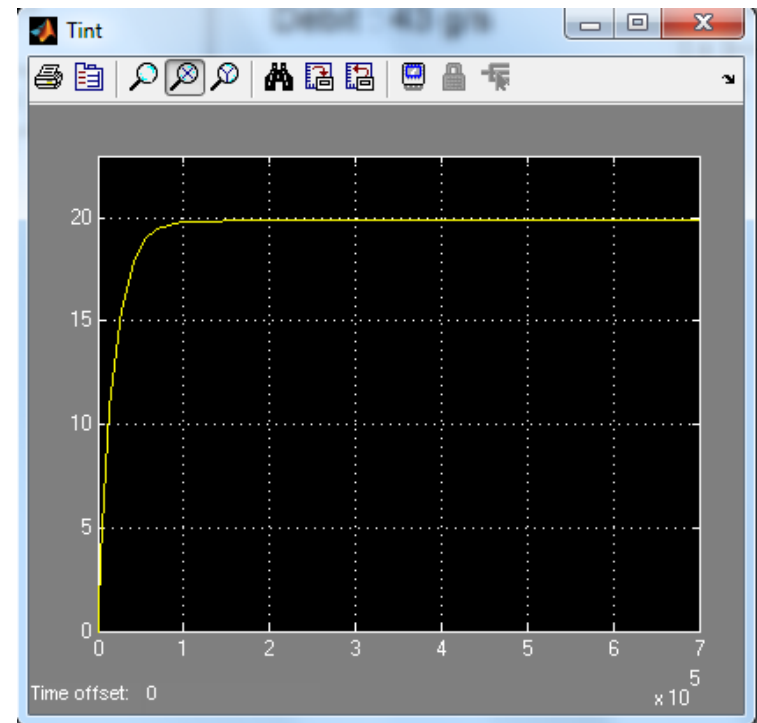
- Augmenter le flux source à 9 kW : conséquence sur l'évolution de température.
- Revenir à 7 kW, diminuer la résistance thermique d'un facteur 2 (mauvaise isolation). Conséquence sur la température finale ?
- Ajouter un échelon de perturbation (baisse brutale de température)  $T_e = -5^{\circ}\text{C}$  à  $t = 3,5 \cdot 10^5$  s. Nécessité d'une régulation thermique ...
- Ajouter une température extérieure variable ...



# Ensemble PAC + Habitat sous Matlab



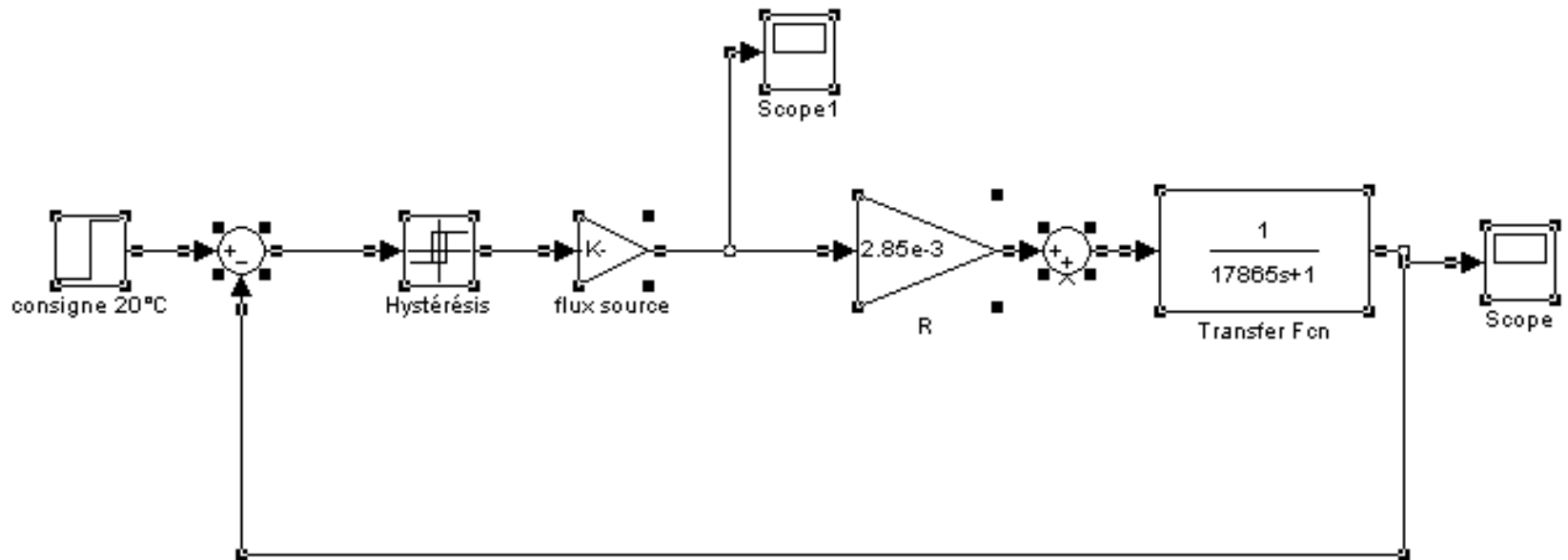
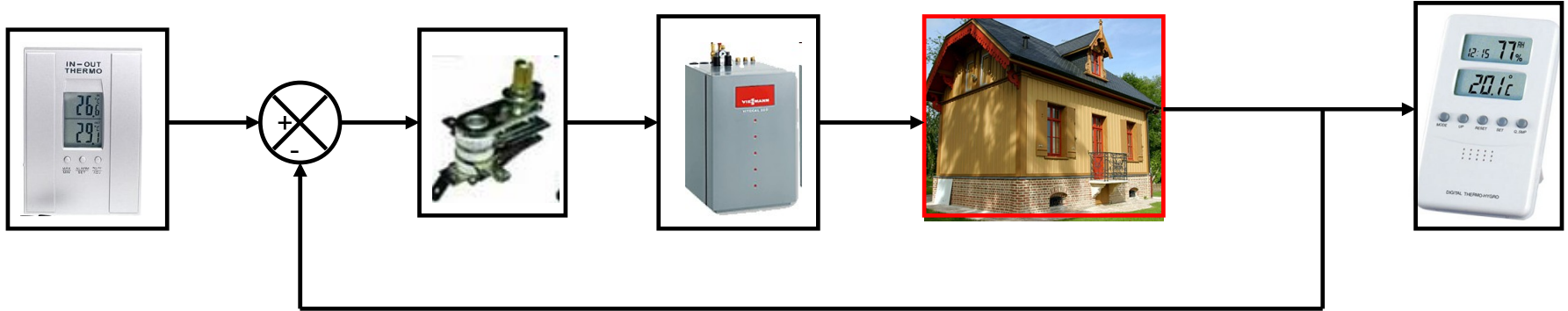
**Modification possible de tous les paramètres influents (PAC et habitat)**



# Régulation tout ou rien de la température (spécifique Techno)

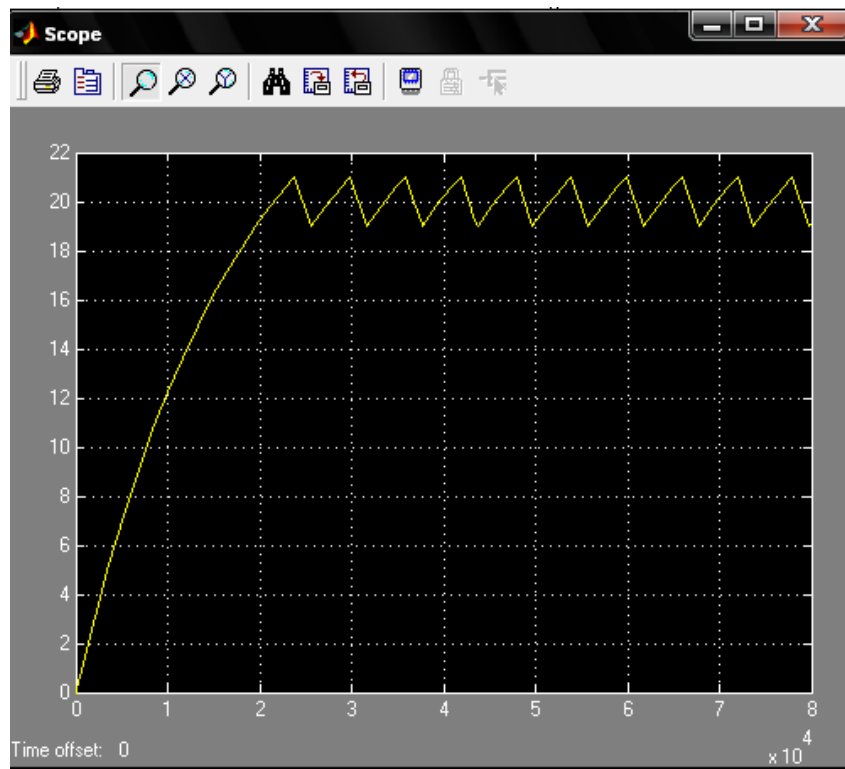
## Étude simulée sous Matlab

Très utilisée dans le domaine du génie climatique, dans le cas des faibles puissances

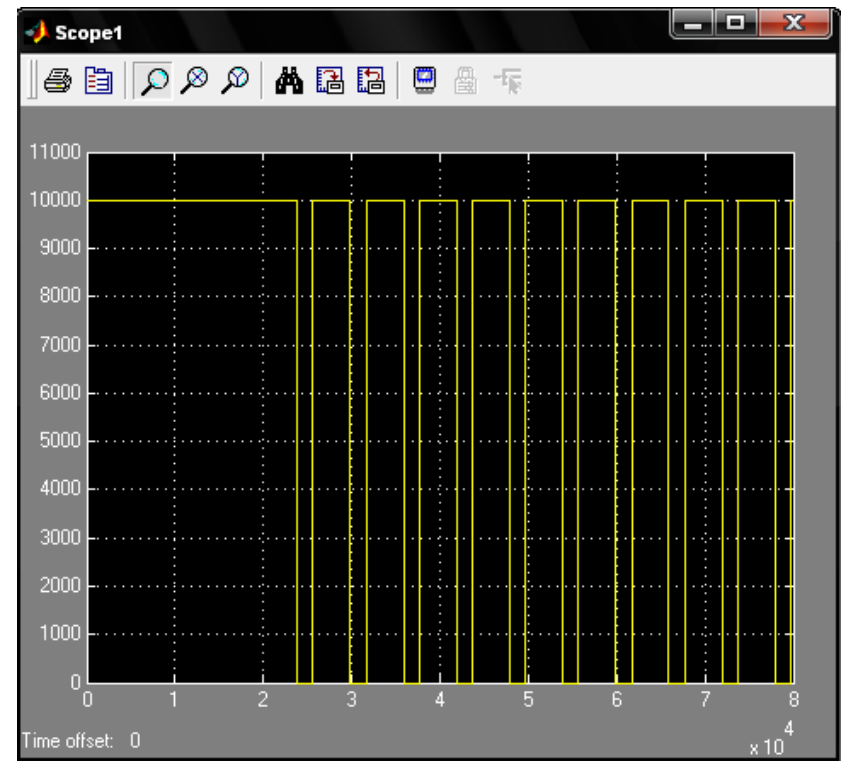


# Résultats de la simulation

$T(t)$

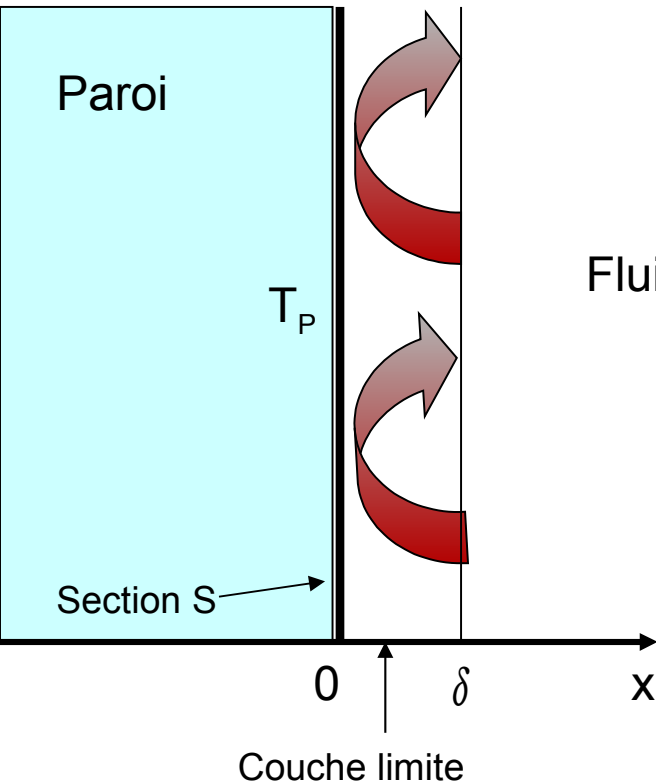


$\Phi_s$



# Conducto – convection à l'interface paroi - fluide

La mécanique des fluides nous indique qu'au voisinage de la paroi apparaît dans le fluide une zone due à la convection et appelée **couche limite**.



Flux conducto-convectif donné  
par la **loi de Newton** :

$$\Phi_{cc} = h.S.(T_P - T_\infty)$$

$h$  = coefficient de transfert conducto-convectif.

## Convection naturelle

Gaz :

$$5 < h < 10 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$$

Eau :

$$100 < h < 1000 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$$

## Convection forcée

Gaz :

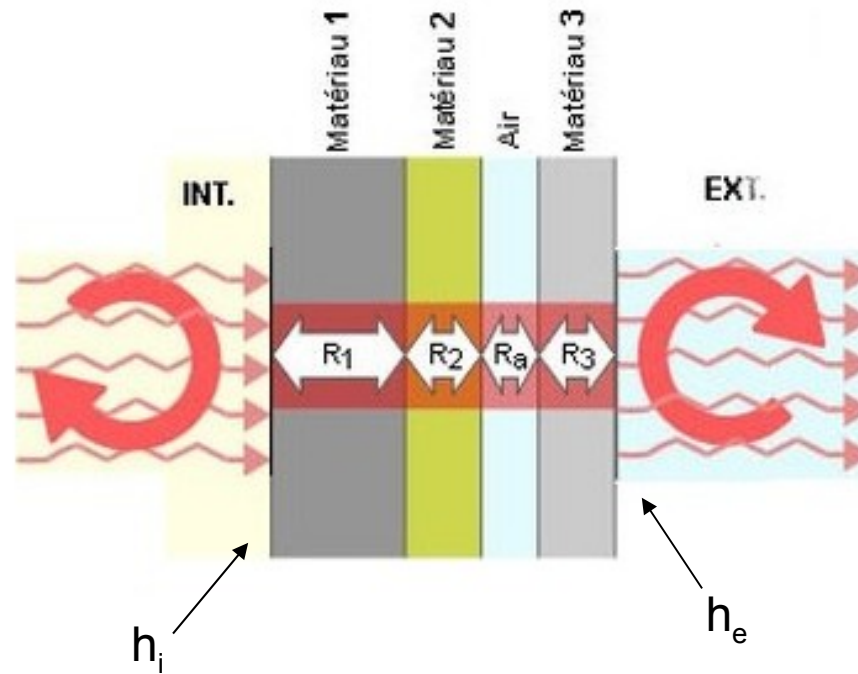
$$10 < h < 300 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$$

Eau :

$$300 < h < 12000 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$$

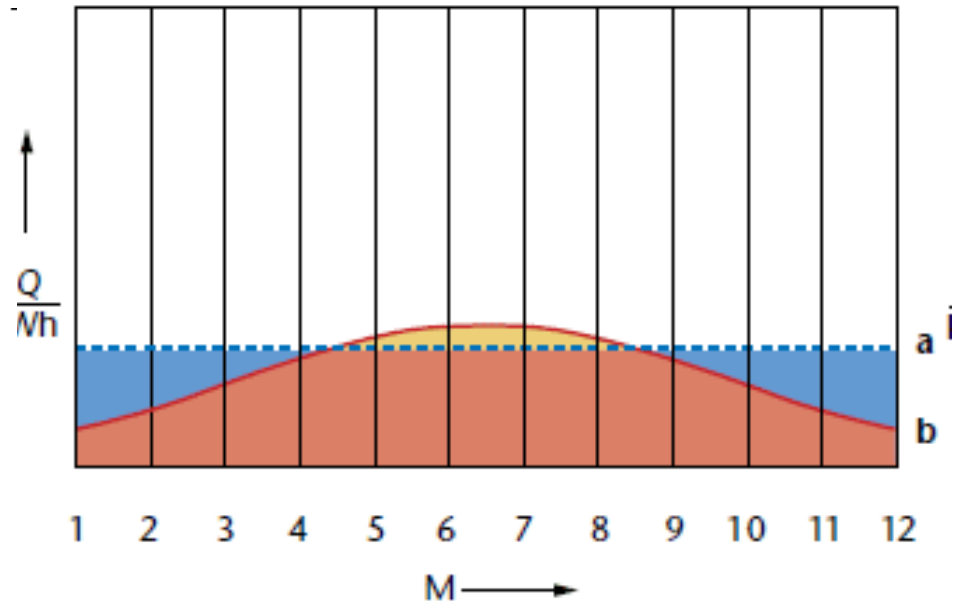
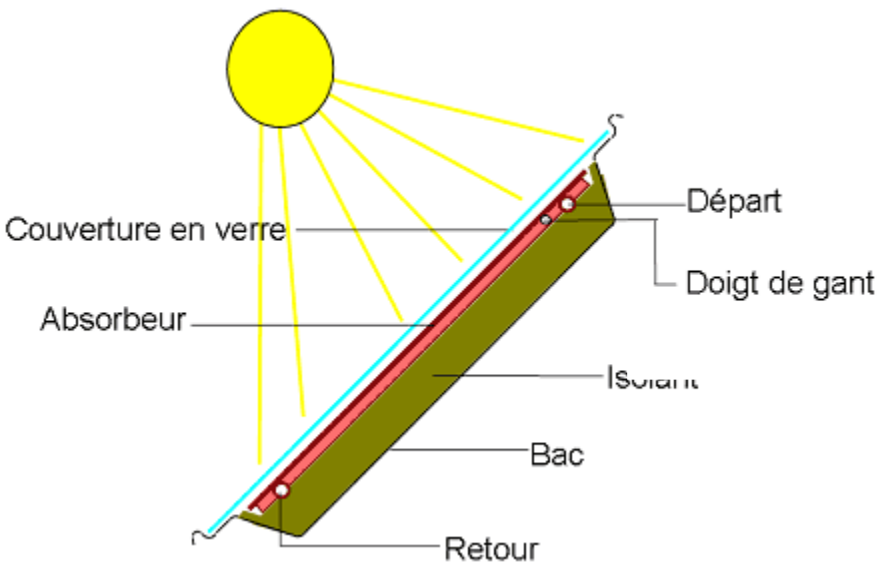
# Prise en compte des résistances conducto-convectives

$$\Phi_{cc} = h.S.(T_P - T_{\infty}) \rightarrow R_{cc} = \frac{1}{h.S}$$



$$R_{th} = \frac{1}{h_i.S} + \sum R_{cond.} + \frac{1}{h_e.S}$$

# Application au chauffe-eau solaire



*Légende :*

**a** Besoin en énergie

**b** Énergie fournie par l'installation solaire

**M** Mois

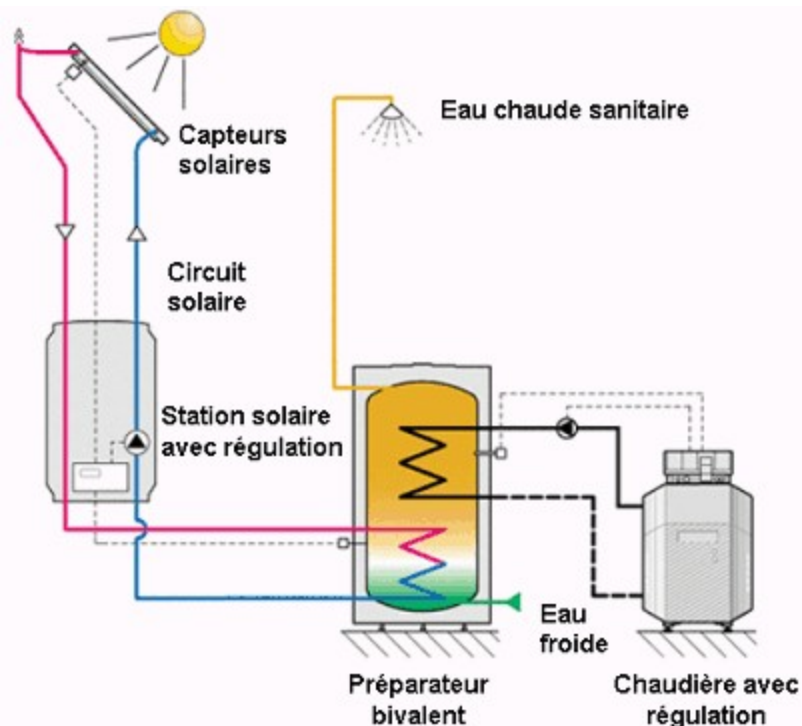
**Q** Chaleur

■ Excédent d'énergie solaire

(utilisable, par exemple, pour les piscines)

■ Énergie solaire utilisée (couverture solaire)

■ Besoins d'énergie non couverts (chauffage complémentaire)





## **Voir les fascicules complémentaires:**

- Manipulations possibles en Sciences-Physiques***
- Compléments en Technologie (techniques de régulation, choix des compresseurs, modèle Simulink de variation de vitesse du compresseur alimenté par un moteur à courant continu )***
- Travaux pratiques de simulation (Matlab-Simulink)***