

# ENERGIAL

---

## Efficacité énergétique des procédés multi-énergie de l'agroalimentaire

PE 1.2-3

L. Boillereaux, O. Rouaud, M. Havet,

C. Josset, B. Auvity, C. Castelain

T. Perrotin

# Objectifs

---

**Dans le but d'étudier des voies d'amélioration de l'efficacité énergétique des procédés de l'agroalimentaire, 4 OBJECTIFS**

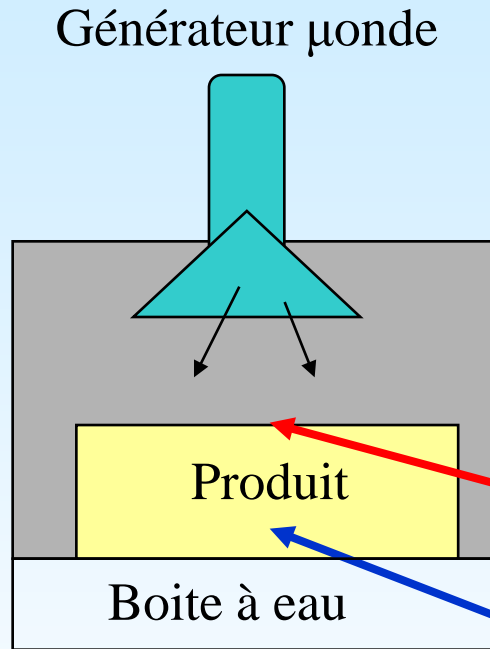
- Déterminer des outils et méthodes permettant d'évaluer l'efficacité énergétique en agroalimentaire → notion d'énergie minimale requise
- Tester l'approche sur un procédé pilote de laboratoire : décongélation micro-onde contrôlée
- Déterminer les sous-secteurs susceptibles d'être le fruit d'améliorations sensibles
- Mettre en place un projet de plus grande envergure sur un des sous-secteurs déterminé → Programme ALIA

# I - Les outils d'évaluation

---

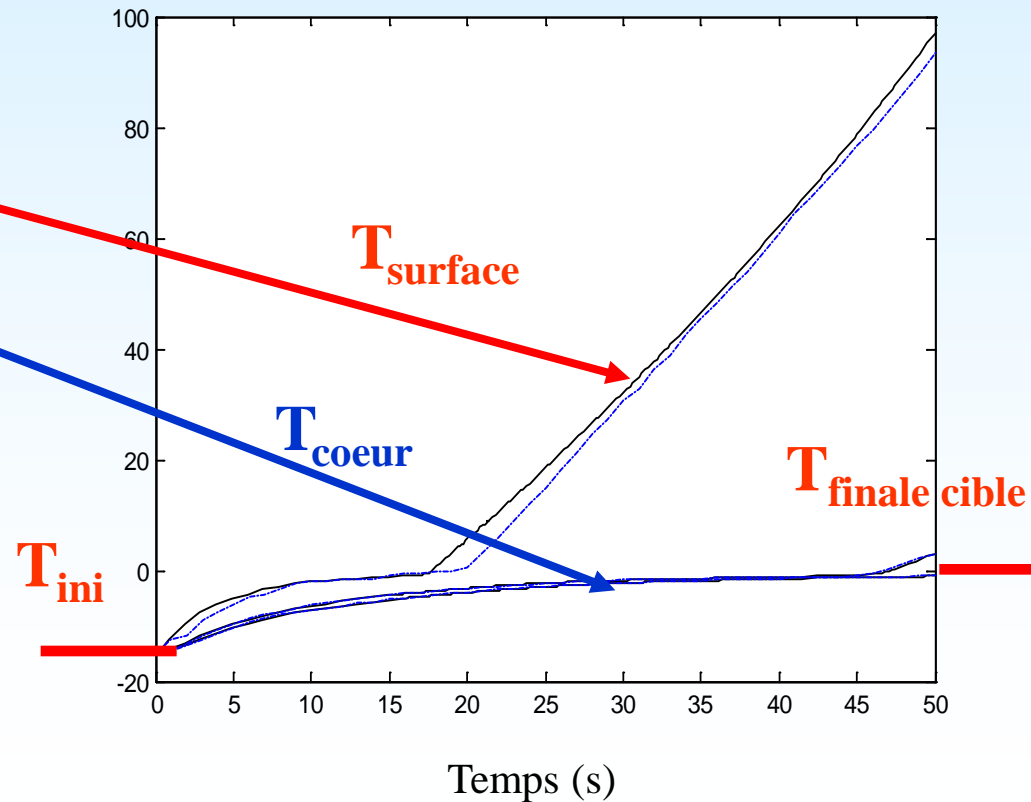
- L'évaluation peut être considérée sur un procédé complet, de la matière première entrant dans la chaîne de fabrication au produit fini.
  - → récupération d'énergie, zones « chaudes » et zones « froides »
  - → optimisation globale des procédés (conduite optimale de l'ensemble)
- Nous avons fait le choix d'être à l'échelle du procédé
  - → Référentiel choisi : l'**énergie minimale requise** par chaque opération (propre à chaque produit)
  - → les bilans exergétiques peuvent être considérés.

# II – Décongélation micro-onde contrôlée



Procédé classique:

Évolution non contrôlée:  $P_{\mu\text{onde}} = \text{constante}$



- Emballage thermique: cuisson possible du produit
- Température de surface élevée: contrainte  $\mu$ biologique
- Produit tout juste décongelé

# Objectifs / paramètres de contrôle

---



**Contrôler l'emballage thermique**  
**Assurer la décongélation**  
**Garantir un critère de qualité  $\mu$ biologique**

- ✓ Action sur la puissance micro-onde : chauffage
- ✓ Action sur un jet d'air froid : refroidissement



**Pour cela, il faut :**

- ✓ un modèle précis et simple
- ✓ Une loi de commande multivariable

# Commande non linéaire linéarisante

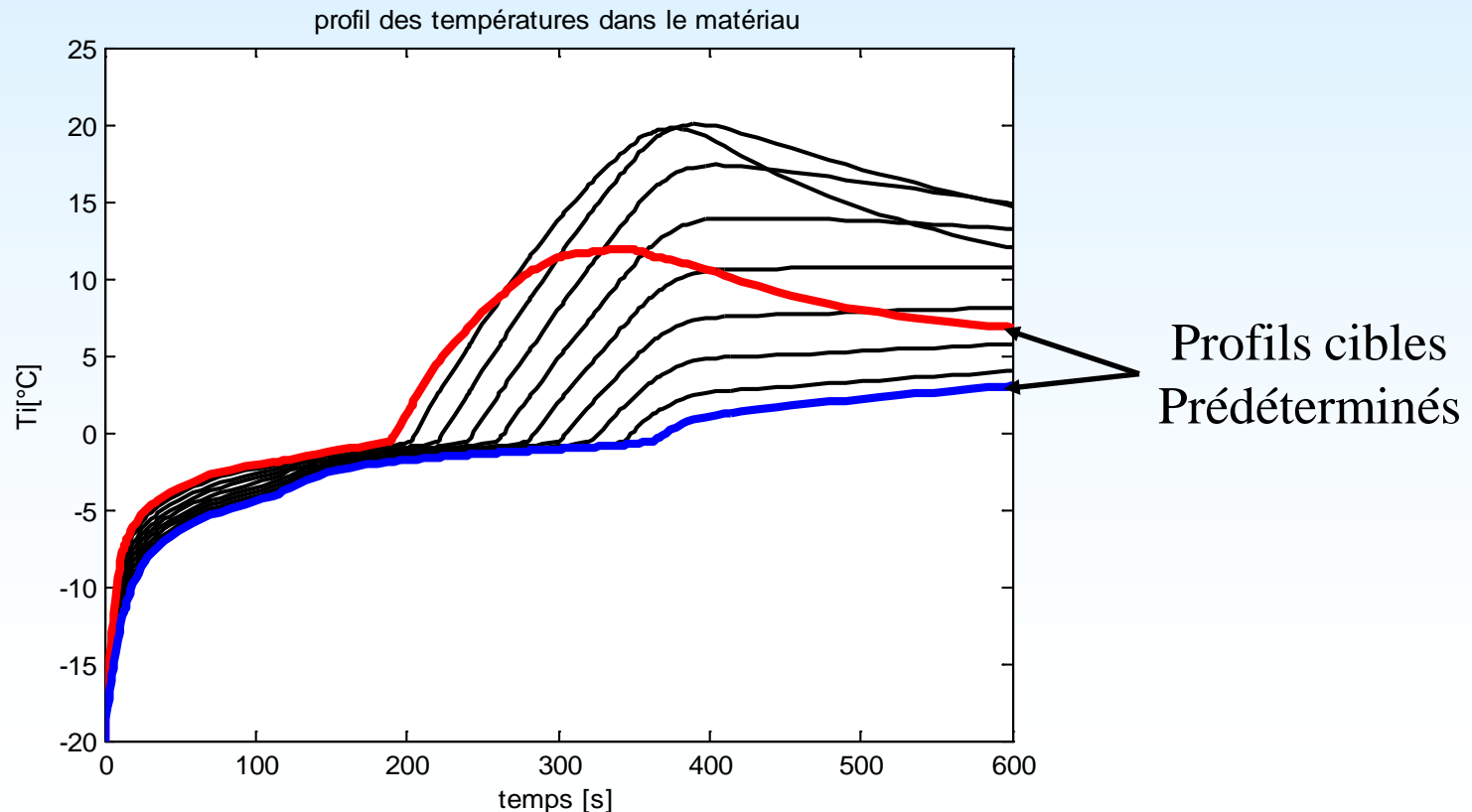
2 paramètres d'action ( $h$  &  $P_{\mu_{onde}}$ )  $\Rightarrow$  2 variables contrôlées

emballement thermique + contrainte  $\mu$ biologique

$\Rightarrow$  Température de surface imposée  $T_{surface}$

Décongélation en temps imposé  $T_d$

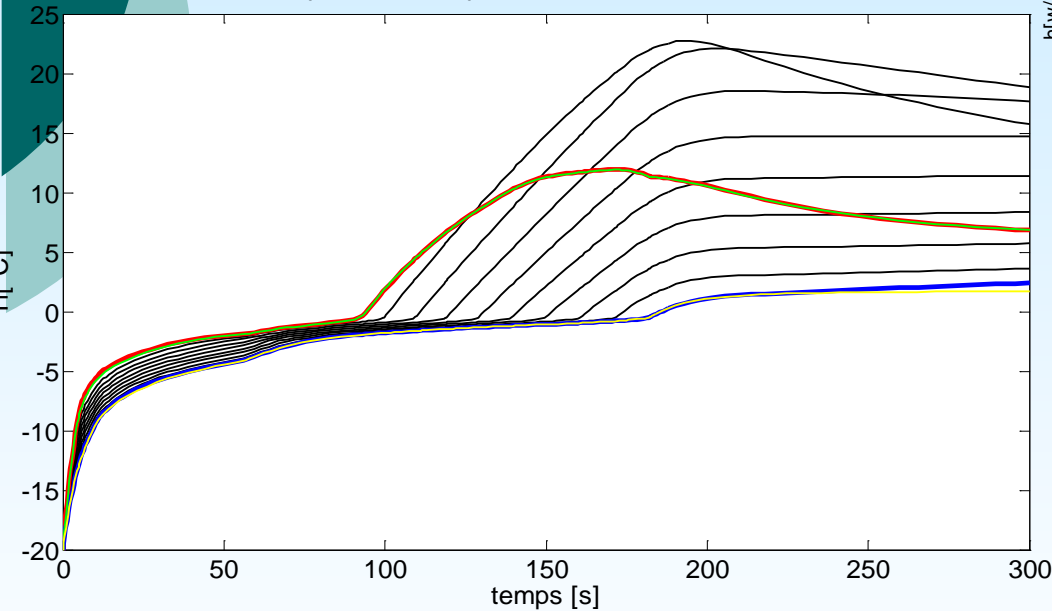
$\Rightarrow$  Température de la partie la +froide imposée  $T_{coeur}$



Ex:  $T_{ini} = -20^{\circ}\text{C}$   $T_{ae} = -5^{\circ}\text{C}$   $t_D = 300\text{s}$

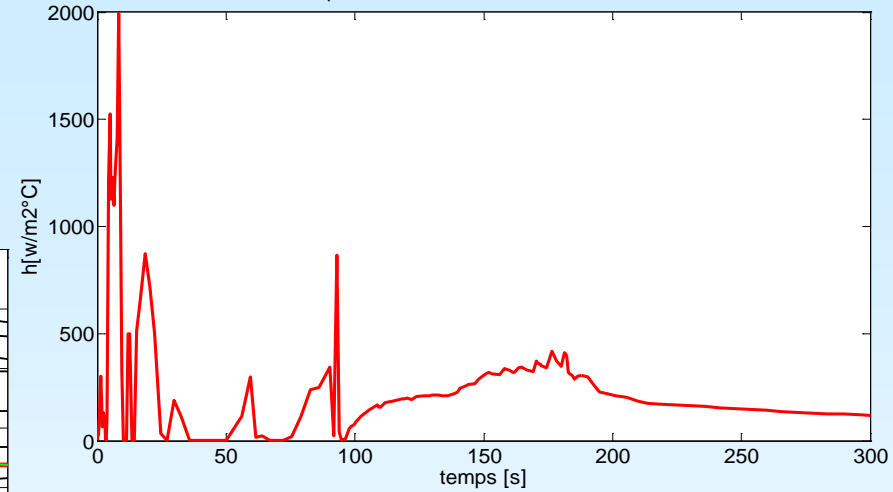
$h(t)_{max}$  très élevé  $\Rightarrow$  Non réaliste  
 $h(t)_{max}$  fixé  $250[\text{w}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{k}^{-1}]$

profil des températures dans le matériau

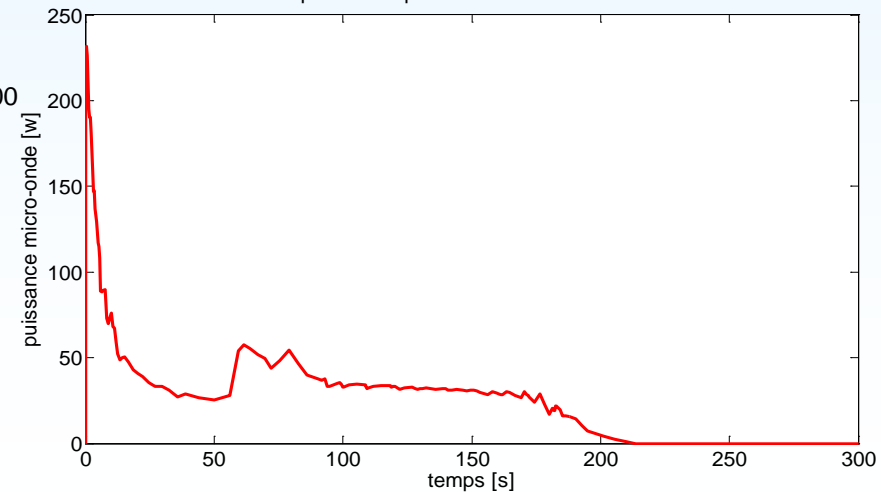


Pic de puissance  $P_{\mu\text{onde}}$  initial

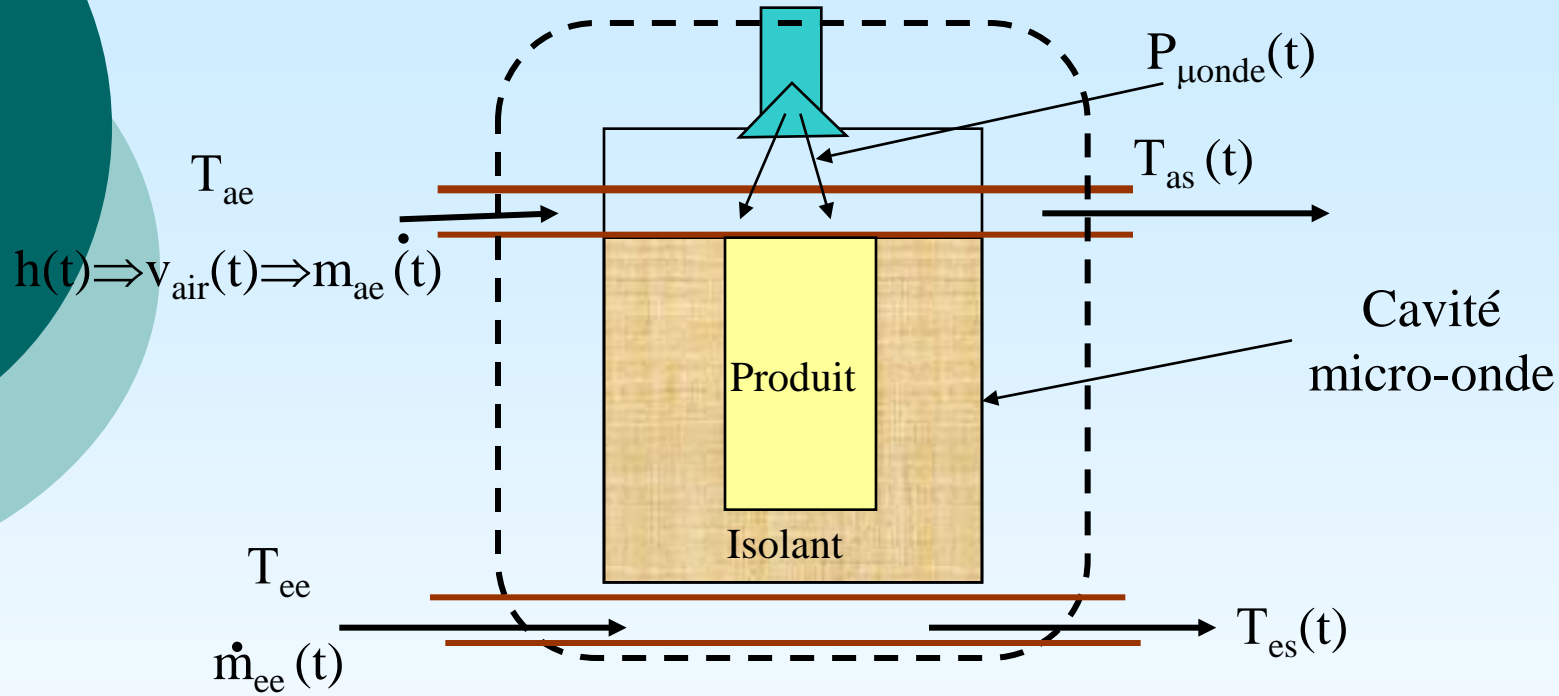
profil du coefficient de convection



profil de la puissance du micro-onde



# Bilan énergétique du procédé



$$\frac{dU_{\text{produit}}(t)}{dt} + \dot{m}_{\text{air}}(t)Cp_{\text{air}}(T_{as}(t) - T_{ae}) + \dot{m}_{\text{eau}}Cp_{\text{eau}}(T_{es}(t) - T_{ee}) = P_{\mu\text{onde}}(t)$$



# Bilan énergétique du procédé

$$\Delta U_{\text{produit}} + \int_0^{t_D} \dot{m}_{\text{air}}(t) C_{p_{\text{air}}} (T_{\text{as}}(t) - T_{\text{ae}}) dt + \int_0^{t_D} \dot{m}_{\text{eau}} C_{p_{\text{eau}}} (T_{\text{es}}(t) - T_{\text{ee}}) dt = \int_0^{t_D} P_{\mu\text{onde}}(t) dt$$

Effet utile

régulation

Sécurité monde

Effet payé

3814,3 [j]

259,1[j]

6875,6[j]

10949[j]

$$\Delta U_{\text{produit}} = U_{\text{fin}} - U_{\text{ini}} = \int_{m_{\text{produit}}} \int_{T_{\text{ini}}}^{T_{\text{fin}}} C_{p_{\text{produit}}} dT_{\text{produit}} \Rightarrow \mathcal{E}_{\mu\text{onde}} = \frac{\Delta U_{\text{produit}}}{\int_0^{t_D} P_{\mu\text{onde}} dt}$$

Évolution de  $\mathcal{E}_{\mu\text{onde}}$  (%)

En fonction de :  $t_D$  et  $T_{\text{ae}}$   
 $\Rightarrow$  efficacité constante  
 $\Rightarrow$  (conforme expérience)

tD s \ Tae c	-5	-10	-20	-30
100	37.3	37.3	37.2	37.2
200	37.2	37.2	37.2	37.2
300	37.2	37.2	37.2	37.2
400	37.2	37.2	37.2	37.2
500	37.2	37.2	37.2	37.2
600	37.2	37.2	37.2	37.2

# Bilan énergétique du procédé

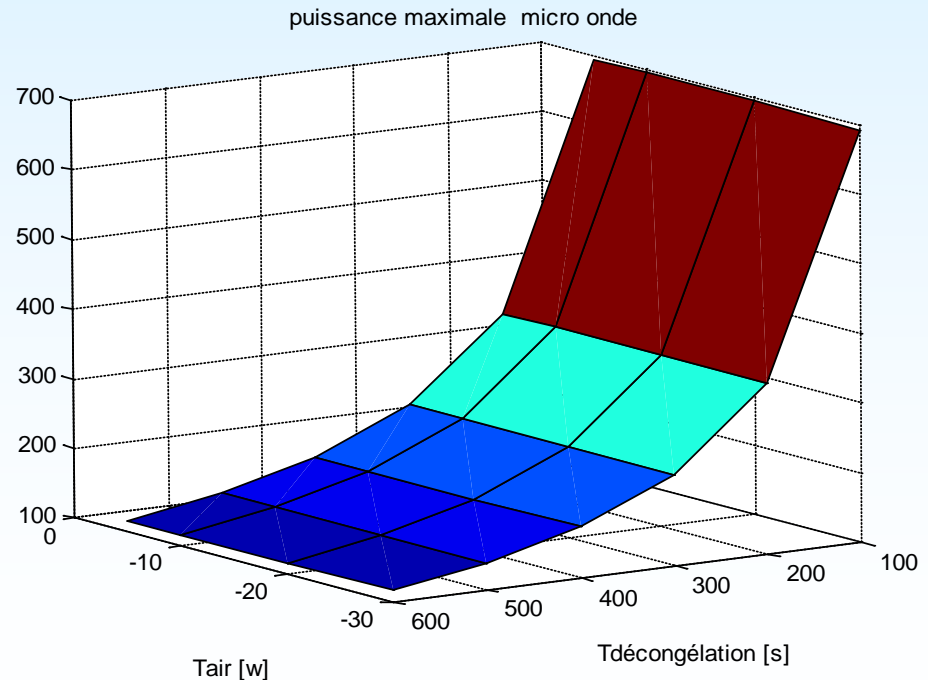
$$\left(\Delta U_{\text{produit}}\right)_{\text{cible}} = \int_{m_{\text{produit}}} \int_{T_{\text{ini}}}^{0^{\circ}\text{C}} C_{p_{\text{produit}}} dT_{\text{produit}} \Rightarrow \varepsilon_{\text{procédé}} = \frac{\left(\Delta U_{\text{produit}}\right)_{\text{cible}}}{\int_0^{t_D} P_{\mu\text{onde}} dt}$$

Prise en compte de la surchauffe non utile  $\Rightarrow$  énergétiquement pénalisante

Évolution de  $\varepsilon_{\text{procédé}}$  (%)

tD s \ Tae c	-5	-10	-20	-30
100	<b>27.8</b>	<b>27.7</b>	<b>27.8</b>	<b>27.6</b>
200	<b>27.8</b>	<b>27.9</b>	<b>28.0</b>	<b>27.8</b>
300	<b>28.1</b>	<b>28.1</b>	<b>28.2</b>	<b>28.2</b>
400	<b>28.3</b>	<b>28.3</b>	<b>28.2</b>	<b>28.3</b>
500	<b>28.4</b>	<b>28.5</b>	<b>28.5</b>	<b>28.5</b>
600	<b>28.6</b>	<b>28.6</b>	<b>28.6</b>	<b>28.7</b>

Évolution de  $(P_{\mu\text{onde}})_{\text{max}}$



# Bilan énergétique du procédé

énergie dissipée par le flux d'air  $\Rightarrow$  Perte de charge singulière équivalente

$$\Delta P_{air} = \zeta \frac{\rho_{air} v_{air}^2}{2} \Rightarrow E_{air} = \int_0^{t_D} \dot{m}_{air} \zeta \frac{v_{air}^2}{2} dt$$

$$\mathcal{E}_{régulation} = \frac{\int_0^{t_D} \dot{m}_{air}(t) C p_{air} (T_{as}(t) - T_{ae}) dt}{\int_0^{t_D} \dot{m}_{air} \zeta \frac{v_{air}^2}{2} dt}$$

tD s \ Tae c	-5	-10	-20	-30
100	<b>1025.0</b>	<b>975.8</b>	<b>650.4</b>	<b>417.7</b>
200	<b>1806.5</b>	<b>1027.4</b>	<b>407.9</b>	<b>179.7</b>
300	<b>1515.0</b>	<b>730.3</b>	<b>187.7</b>	<b>71.3</b>
400	<b>1298.6</b>	<b>449.4</b>	<b>100.1</b>	<b>34.1</b>
500	<b>858.5</b>	<b>275.3</b>	<b>59.0</b>	<b>19.3</b>
600	<b>684.2</b>	<b>213.1</b>	<b>36.2</b>	<b>12.8</b>

tD s \ Tae c	-5	-10	-20	-30
100	<b>0.2</b>	<b>0.2</b>	<b>0.3</b>	<b>0.5</b>
200	<b>0.1</b>	<b>0.2</b>	<b>0.6</b>	<b>1.4</b>
300	<b>0.2</b>	<b>0.4</b>	<b>1.4</b>	<b>3.6</b>
400	<b>0.2</b>	<b>0.6</b>	<b>2.6</b>	<b>7.7</b>
500	<b>0.3</b>	<b>1.0</b>	<b>4.5</b>	<b>13.6</b>
600	<b>0.4</b>	<b>1.3</b>	<b>7.4</b>	<b>20.9</b>

- h(t) élevé  $\Rightarrow$  régulation pénalisante
- prise en compte de la dissipation visqueuse de l'air dans le bilan thermique du procédé

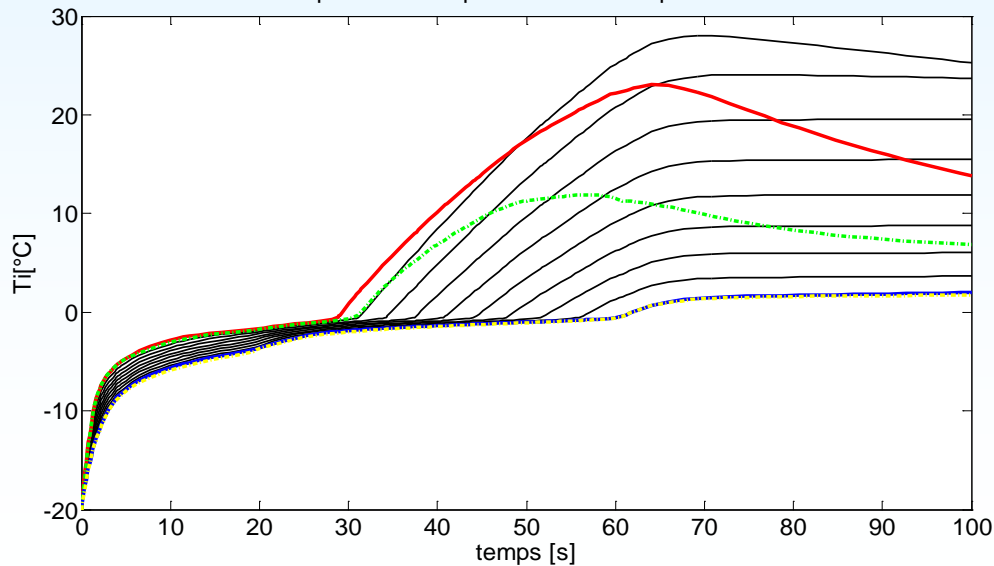
# Bilan énergétique du procédé

Efficacité énergétique modifiée %:

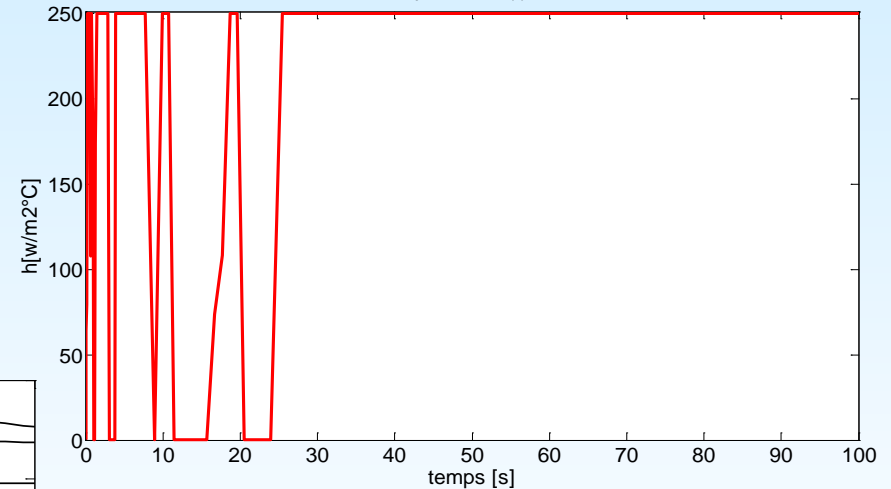
tD s \ Tae c	-5	-10	-20	-30
100	<b>25.4</b>	<b>25.5</b>	<b>26.3</b>	<b>26.6</b>
200	<b>23.9</b>	<b>25.5</b>	<b>27.0</b>	<b>27.4</b>
300	<b>24.7</b>	<b>26.3</b>	<b>27.7</b>	<b>28.0</b>
400	<b>25.3</b>	<b>27.2</b>	<b>28.0</b>	<b>28.2</b>
500	<b>26.3</b>	<b>27.8</b>	<b>28.4</b>	<b>28.4</b>
600	<b>26.9</b>	<b>28.1</b>	<b>28.5</b>	<b>28.7</b>

$$\mathcal{E}_{\text{procédé modif}} = \frac{(\Delta U_{\text{produit}})_{\text{cible}}}{\int_0^{t_D} P_{\mu\text{onde}} dt + \int_0^{t_D} \dot{m}_{\text{air}} \zeta \frac{v_{\text{air}}^2}{2} dt}$$

profil des températures dans le produit



profil du h(t)



⇒ contrainte non respectée!!

- Boulangerie
  - 300 000 tep /an pour la cuisson
  - Rendement : 20 à 25%
- Projet BRAISE (ANR ALIA 2008) : 3 partenaires ENERGIAL + 5 nouveaux
  - Accepté : 550 k€ / 4 ans