

Les frigos du futur seront  
peut-être magnétique!

# Etude et modélisation de la réfrigération magnétique

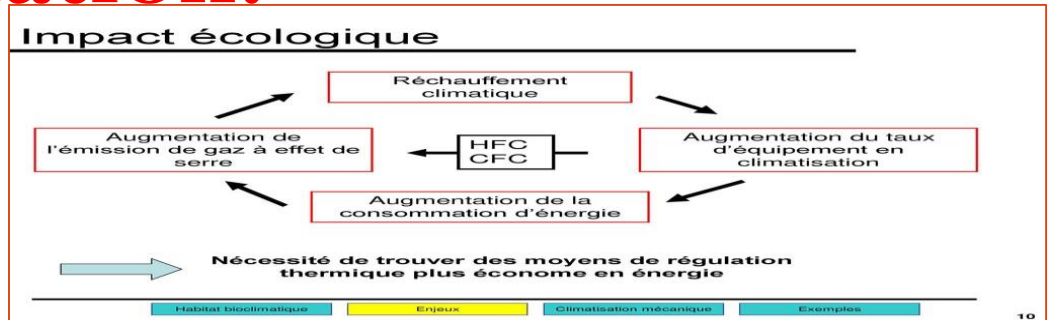


# présentation:

Imaginons que nos radiateurs ,réfrigérateurs et climatiseurs soient silencieux ,qu'ils consomment peu d'énergie et soient non polluant car dépourvus de cfc ces gaz a effet de serre destructeurs de la couche d'ozone

Ca sera sans doute possible grâce a la **REFRIGERATION MAGNETIQUE**

« C'est une alternative valide et efficace » rappelons par exemple que la climatisation automobile accroît d'environ 30% la consommation de carburant



**La réfrigération magnétique** est une solution alternative a la technologie de refroidissement classique qui utilise le cfc et le hfc ,permettant de réaliser des système plus efficaces et moins polluants

# sommaire

- Problématique: réalisation d'un cycle frigorifique avec un liquide magnétocalorique et détermination des paramètres associés.
- 1. Introduction
  - A) introduction générale
  - B) Cycle AMR de la réfrigération magnétique
  - C) les matériaux magnétocaloriques
- 2. synthèse et caractérisation des matériaux pérovskites manganites ( $\text{La}_{0.7-x}\text{Nd}_x\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ ) et les composites ( $\text{La}_{0.7-x}\text{Nd}_x\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{CuO}$ )
  - A) synthèse des échantillons
  - B) caractérisation magnétique des échantillons
    - B.1) température de transition
    - B.2) nature de la transition magnétique
  - C) les propriétés magnétocaloriques:
    - C.1) la variation de l'entropie maximale
    - C.2) le pouvoir de refroidissement RCP
  - conclusion:
- 3. modélisation thermique d'un cycle frigorifique
  - a) Equation caractéristique et hypothèses
  - b) Modèle numérique (python)
  - c) Résultats

# 1. Introduction

## A) Introduction générale

### Réfrigération magnétique

Elle s'appuie sur  
les matériaux à

**Effet magnétocalorique (EMC):**  
c'est la variation de température ou  
d'entropie d'un matériaux  
magnétique soumis a un champ  
magnétique variable (fort) (maximale  
autour de la température de curie)

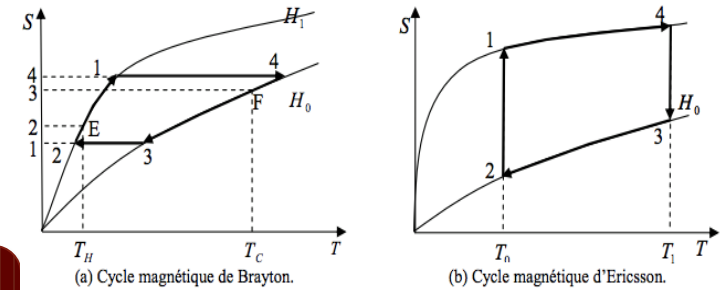
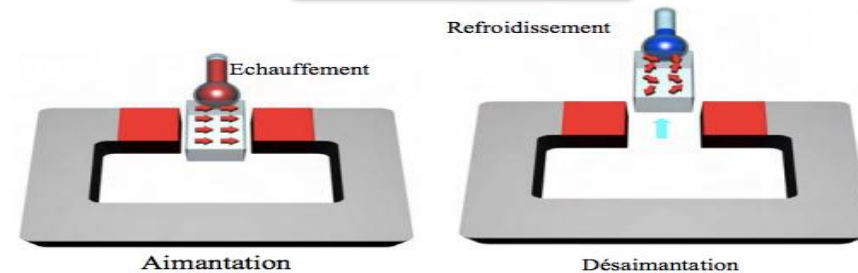


Figure 1.7 : Les cycles de la réfrigération magnétique.

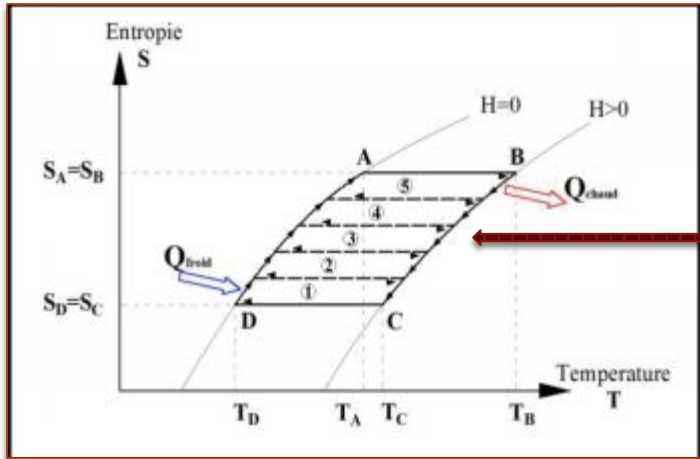
D'où la possibilité  
de faire un cycle  
thermomagnétique  
équivalent au cycle  
thermodynamique



Qui peuvent s'échauffer ou  
se refroidir

# B) Cycle AMR de la réfrigération magnétique

- Il se compose de 4 étapes :



Ce cycle permet d'exploiter au mieux l'effet magnétocalorique afin d'obtenir des écarts de température élevée entre la source chaude et la source froide

Chaque tranche de **régénérateur** produit son propre cycle de réfrigération de brayton magnétique et transporte la charge thermique d'une tranche à l'autre dans le sens de l'écoulement du fluide (f→c) il s'agit donc d'infinité de cycle

- Deux adiabatique( aimantation et désaimantation)
- Deux iso champs( refroidissement et un réchauffement: écoulement du fluide caloporteur assurant les échanges de chaleur entre la zone froide et chaude )
- Remarque:**
- le matériaux magnétique y est a la fois le siège de l'effet magnétocalorique et le **régénérateur thermique**



# C) Les matériaux magnétocaloriques

Exemple

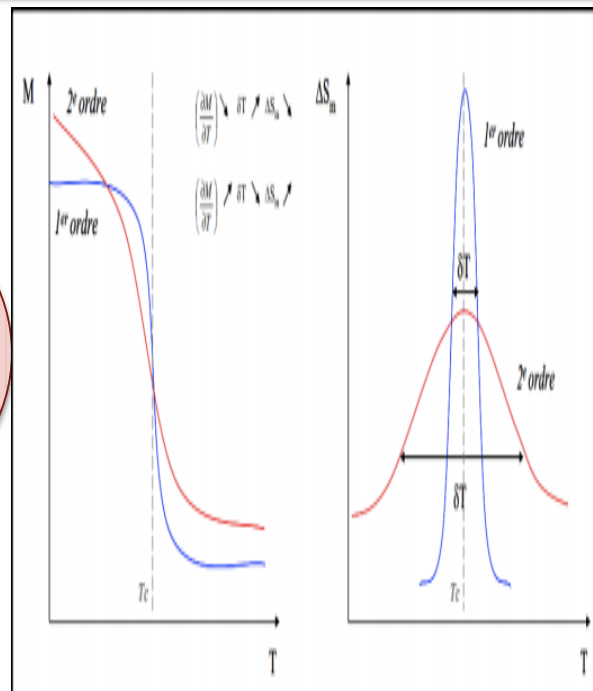
- L'effet magnétocalorique apparaît dans tous les matériaux magnétiques, sa valeur est maximale à la température de Curie, température à laquelle un matériau change d'ordre magnétique (transition ferromagnétique  $\rightarrow$  paramagnétique)

Le gadolinium (Gd) est le matériau de référence dans la plupart des prototypes de réfrigération magnétique à température ambiante

Il peut générer un effet magnétocalorique élevé ( $3\text{ K/T}$ ) avec une variation d'entropie de  $5\text{ J/kg}$  à un champ magnétique de 2 tesla

## Matériaux magnétocaloriques

**Transition du 1<sup>er</sup> ordre:**  
(M et T augmentent) la variation d'entropie est très grande, mais la gamme d'utilisation d'un tel matériau est très limitée en température



**Transition du 2<sup>e</sup> ordre :**  
La variation de l'entropie magnétique maximale demeure élevée sur une plus large gamme de température

## 2. synthèse et caractérisation des matériaux pérovskites manganites (La<sub>0.7-x</sub>Nd<sub>x</sub>)Sr<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub> et les composites (La<sub>0.7-x</sub>Nd<sub>x</sub>)Sr<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub>/CuO

### A) synthèse des échantillon

Les matériaux à bases de pérovskite manganite(LNSMO)et composite de pérovskites-oxyde(LNSMO/5CuO) ont été synthétisés par la réaction à l'état solide

Pour Les échantillons purs de pérovskites manganite (LNSMO)

Mélangées et broyées avec (1h)

Des proportions stoechiométrique des précurseurs La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,SrO, Mn<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, CuO

**En 1 temps:**  
Traitées a T=1173k pendant 8h

**En 2 temps:**  
Traitées a T=1473 pendant 12h (avec broyage intermédiaire d'une heure )

mélange

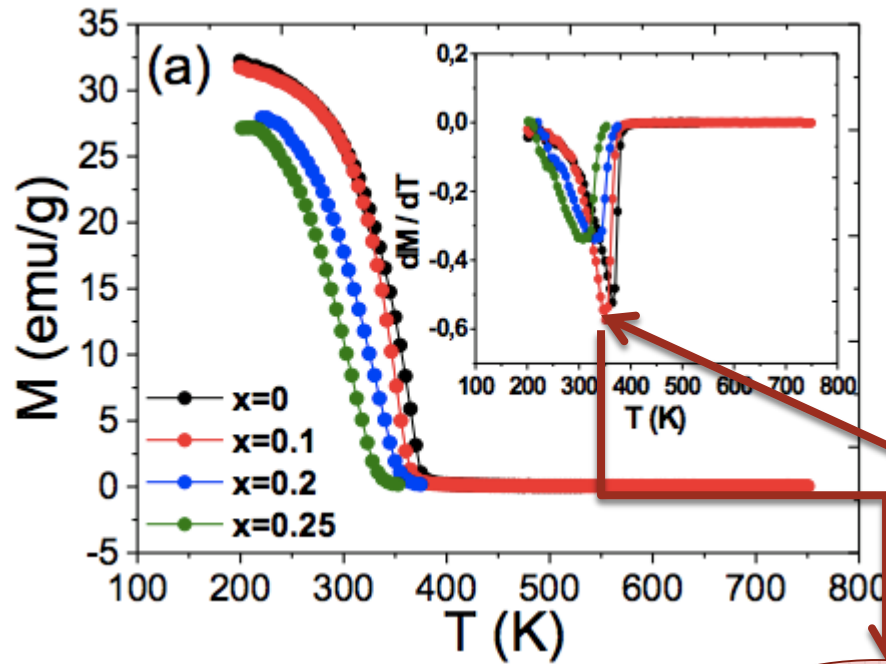
Avec les échantillon composite pérovskite oxyde( puis broyée(30min)et traitée(1473k)(2h))

résultat!  
:

Les échantillon obtenues sont sous forme de **poudre**

## B) Caractérisation magnétique des échantillon

### B.1) température de transition



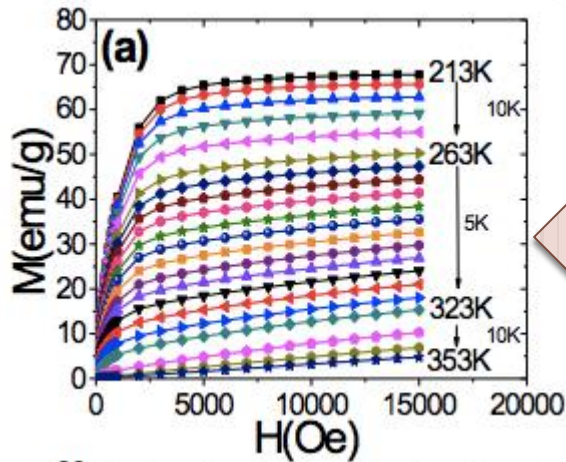
Cette figure montrent que tous les échantillon présente une transition paramagnétique  $\rightarrow$  ferromagnétique a la température de curie. (sous un champ magétique 500 oe)

La température de transition  $T_c$

365K

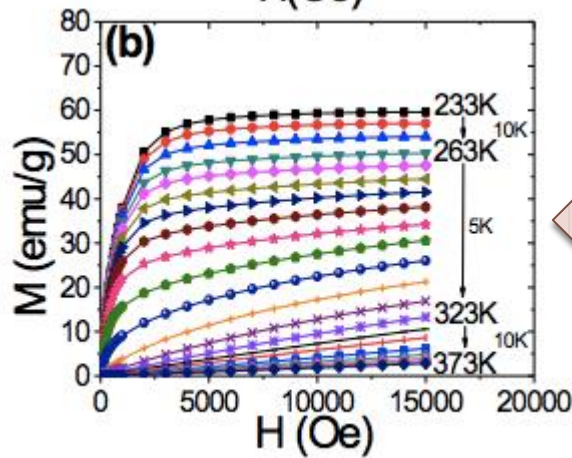


## B.2) nature de la transition magnétique



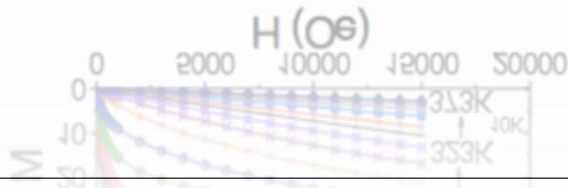
Au dessous de  $T_c$

Comportement  
ferromagnétique

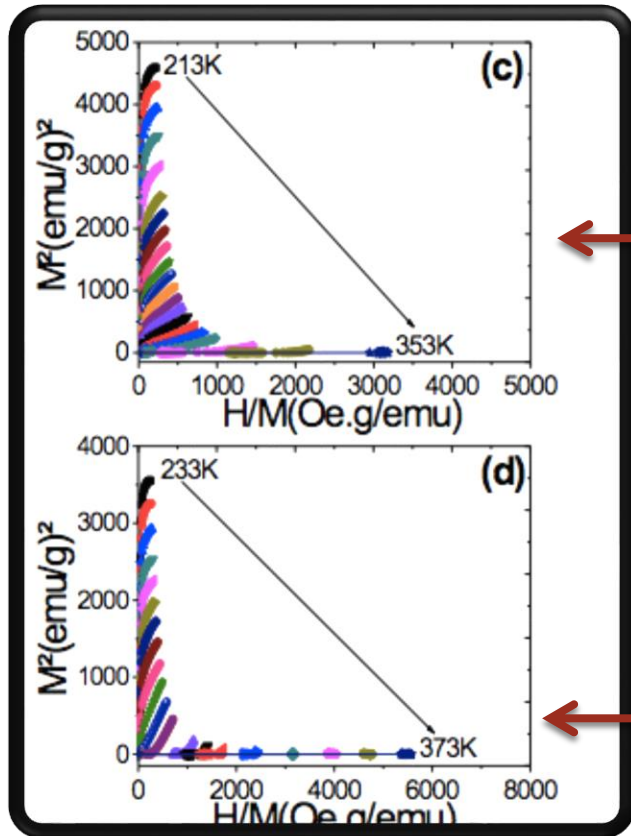


Au dessus de  $T_c$

Comportement  
paramagnétique (en  
raison de l'agitation  
thermique qui  
perturbe  
l'arrangement des  
moment magnétique )



# Trace d'arrot (courbe $M^2=f(H/M)$ )



Selon le critère Banerjee la  
pente (+) signe de  
transition second ordre et  
pente(-) signe de transition  
premier ordre

Pente (+)  $\rightarrow$  transition  
magnétique du **second ordre**

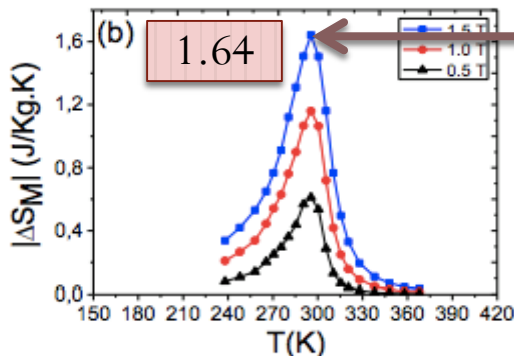
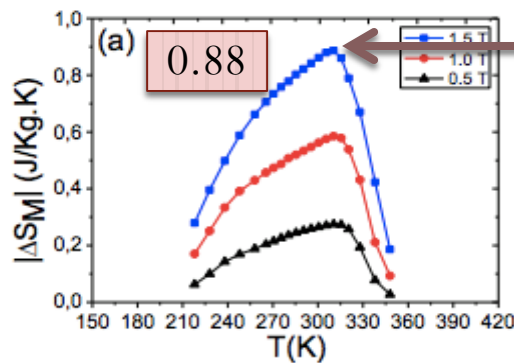
# C) Les propriétés magnétocaloriques

## C.1) la variation de l'entropie maximale

Déterminé a partir

Relation de maxwell :

$$\Delta S_M(T, H) = \int_0^H \left( \frac{\partial M}{\partial T} \right)_H dH$$



LNSMO (poudre)

Cet écart du au fait que la transition de phase magnétique de est moins large en comparaison avec celle

LNSMO/5CuO(poudre)

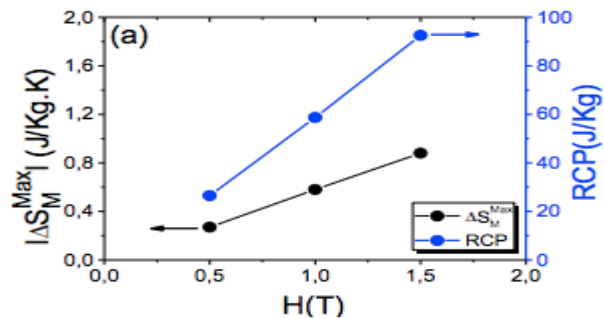
# C.2)le pouvoir de refroidissement relatif RCP

Amplitude de l' EMC

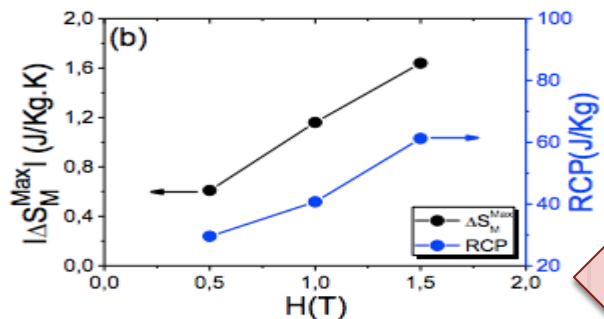
La gamme de travail du  
matériaux  
magnétocalorique

La largeur a mi  
hauteur de la  
courbe de  
variation de  
l'entropie  
magnétique

$$RCP = |\Delta S_M^{max}| \times \delta T_{FWHM}$$



LNSMO(poudre)



LNSMO/5CuO(poudre)

Cette différence est attribué a  
nouveau a l'élargissement de la  
transition de phase magnétique  
de LMNSO

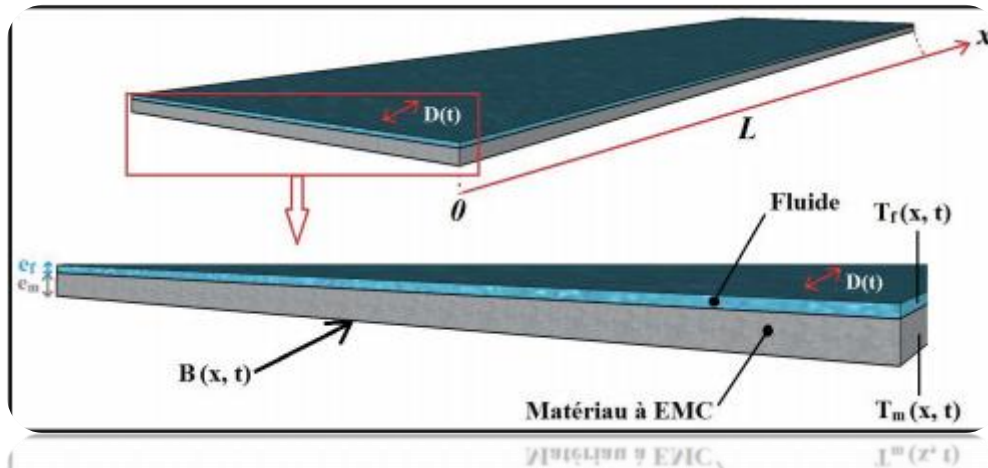
# Conclusion:

On conclut que l'oxyde de cuivre en faible concentration a un effet important sur l'amélioration des **propriété magnétocalorique** a travers sa distribution dans les joints et la surface de grains



# 3)Modélisation thermique d'un cycle frigorifique (cycle AMR)

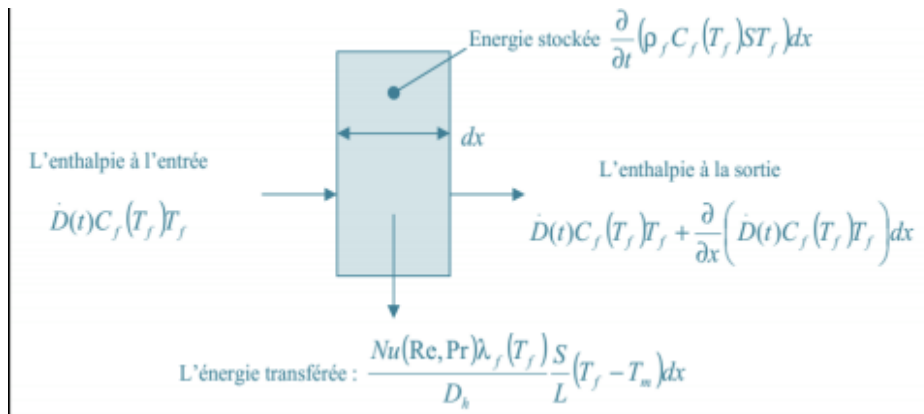
## A) équation caractéristique et hypothèse:



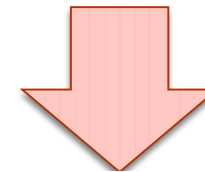
Concept du modèle thermique

TF: température  
du fluide  
Tc: température  
de matériaux  
B(x,t):champ  
magnétique

## Elément de référence du fluide:



$$\begin{aligned} D(t)C_f(T_f)T_f &= \frac{\partial}{\partial t}(\rho_f C_f(T_f)ST_f)dx + D(t)C_f(T_f)T_f \\ &+ \frac{\partial}{\partial x}(D(t)C_f(T_f)T_f)dx + \frac{Nu(Re, Pr)\lambda(T_f)S}{D_h}L(T_f - T_m)dx \end{aligned}$$



$$p_f S \frac{\partial}{\partial t}(C_f(T_f)T_f) + D(t)C_f(T_f) \frac{\partial T_f}{\partial x} = \frac{Nu(Re, Pr)\lambda(T_f)S}{D_h}L(T_m - T_f)$$

La dérivée par rapport au temps du terme  $\frac{\partial}{\partial t}(C_f(T_f)T_f)$  Donne:

$$\frac{\partial}{\partial t}(C_f(T_f)T_f) = T_f \frac{\partial C_f(T_f)}{\partial t} + C_f(T_f) \frac{\partial T_f}{\partial t}$$

Par approximation: Le terme  $T_f \frac{\partial C_f(T_f)}{\partial t} \lll C_f(T_f)$ , alors  $T_f \frac{\partial C_f(T_f)}{\partial t} \rightarrow 0$ .

L'équation devient :

$$p_f S C_f(T_f) \frac{\partial T_f}{\partial t} + D(t) C_f(T_f) \frac{\partial T_f}{\partial x} = \frac{Nu(Re, Pr) \lambda(T_f) S}{D_h} \frac{1}{L} (T_m - T_f)$$

$$p = \frac{m}{V}$$

En posant :

$$h = \frac{Nu(Re, Pr) \lambda(T_f)}{D_h}$$

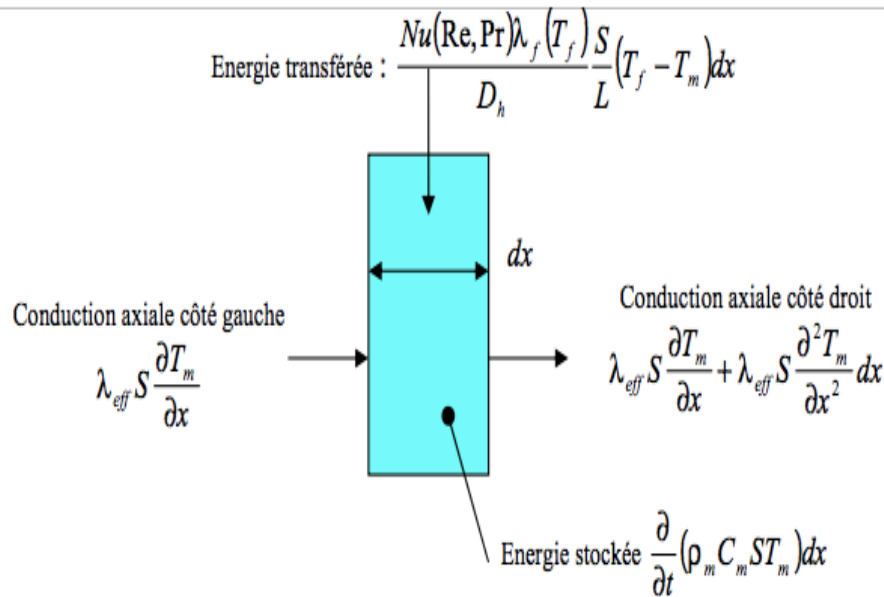
$$d(t) = \frac{D(t) \cdot V}{m_f \cdot S}$$

Au final l'équation est:

:

$$m_f C_f(T_f) \left( \frac{\partial T_f}{\partial t} + d(t) \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) = h S (T_m - T_f)$$

## Elément de référence du matériaux magnétocalorique



La bilan d'énergie effectué:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m C_m S T_m) dx + \lambda_{eff} S \frac{\partial T_m}{\partial x} + \lambda_{eff} S \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} dx = \lambda_{eff} S \frac{\partial T_m}{\partial x} + \frac{Nu(Re, Pr)\lambda_f(T_f)}{D_h} \frac{S}{L} (T_f - T_m) dx$$

Après simplification

$$m_m C_m \frac{\partial T_m}{\partial t} + \lambda_{eff} \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} = hS(T_f - T_m)$$

avec :  $\lambda_{eff}$  est la conductivité effective.

## Système d'équation finale:

Hypothèse: négliger la conduction axiale dans le matériaux vu son faible conductivité thermique et sa forme de plaque (très mince)

$$\begin{cases} m_f C_f(T_f) \left( \frac{\partial T_f}{\partial t} + d(t) \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) = hS(T_m - T_f) \\ m_m C_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = hS(T_f - T_m) \end{cases}$$

## 2)Modèle numérique (python)

- Les coordonnées de chaque nœud du matériaux magnétocalorique et du fluide :

$$\begin{array}{cc|cc}
 t_{f_i} = i \frac{\tau}{Nt} & i = 1 \dots Nt & t_{m_i} = i \frac{\tau}{Nt} & i = 1 \dots Nt \\
 x_{f_j} = j \frac{L}{Nx} & j = 1 \dots Nx & x_{m_j} = j \frac{L}{Nx} & j = 1 \dots Nx
 \end{array}$$

Et on a les système d'équations suivantes :

- Ainsi l'équation caractéristique devient:

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} = \frac{T_{f(i+1,j)} - T_{f(i,j)}}{\Delta t}$$

$$\frac{\partial T_f}{\partial x} = \frac{T_{f(i,j)} - T_{f(i,j-1)}}{\Delta x}$$

$$\frac{\partial T_m}{\partial t} = \frac{T_{m(i+1,j)} - T_{m(i,j)}}{\Delta t}$$

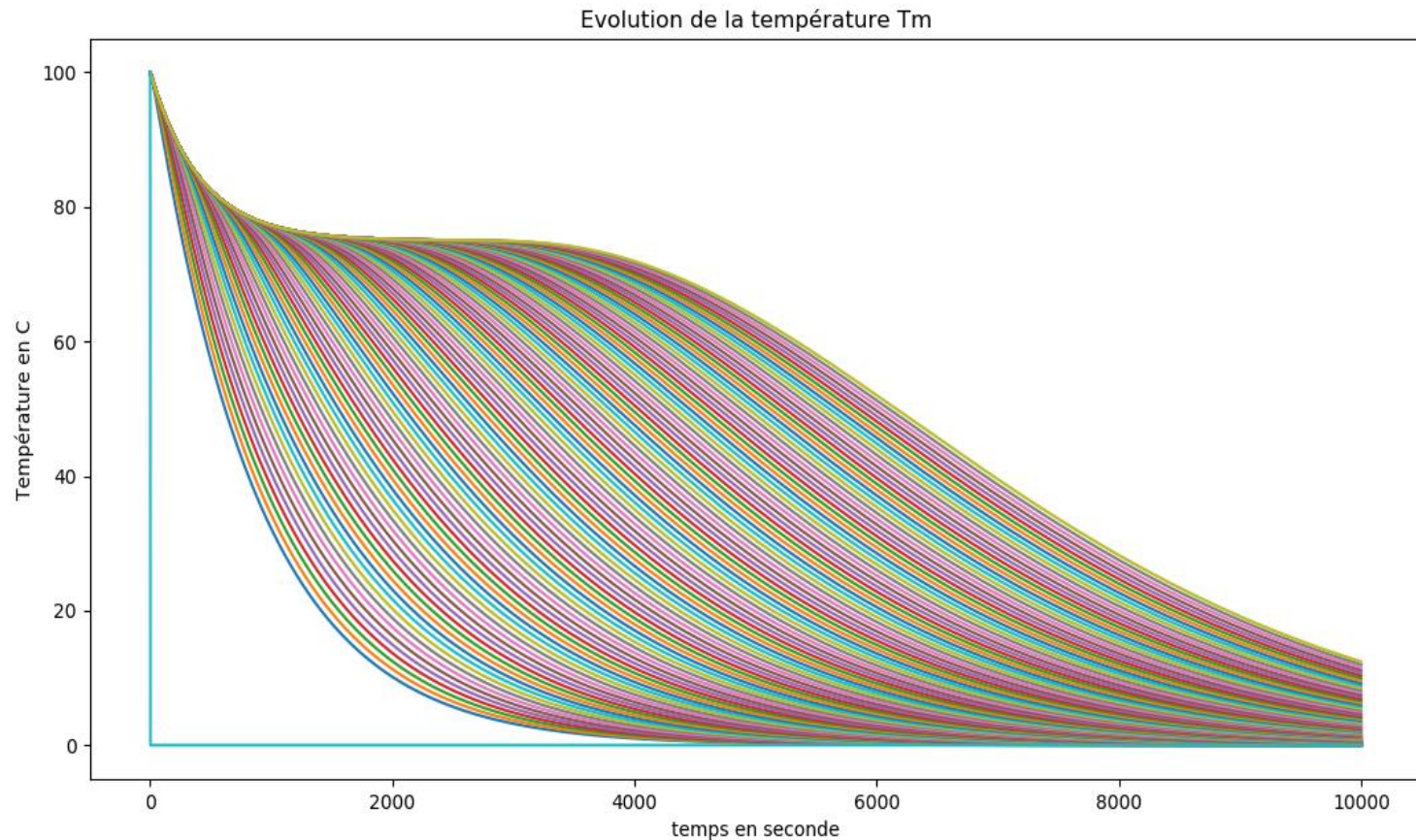
$$\begin{cases}
 m_f C_f (T_{f(i,j)}) \left( \frac{T_{f(i+1,j)} - T_{f(i,j)}}{\Delta t} + d(t) \frac{T_{f(i,j)} - T_{f(i,j-1)}}{\Delta x} \right) = hS (T_{m(i,j)} - T_{f(i,j)}) \\
 m_m C_m \left( \frac{T_{m(i+1,j)} - T_{m(i,j)}}{\Delta t} \right) = hS (T_{f(i,j)} - T_{m(i,j)})
 \end{cases}$$

- L'équation au final devient :

$$\begin{cases}
 T_{f(i+1,j)} = \left( 1 - \left( \frac{hS}{m_f C_f} \Delta t + d(t) \frac{\Delta t}{\Delta x} \right) \right) T_{f(i,j)} + d(t) \frac{\Delta t}{\Delta x} T_{f(i,j-1)} + \frac{hS}{m_f C_f} \Delta t T_{m(i,j)} \\
 T_{m(i+1,j)} = \left( 1 - \frac{hS}{m_m C_m} \Delta t \right) T_{m(i,j)} + \frac{hS}{m_m C_m} \Delta t T_{f(i,j)}
 \end{cases}$$

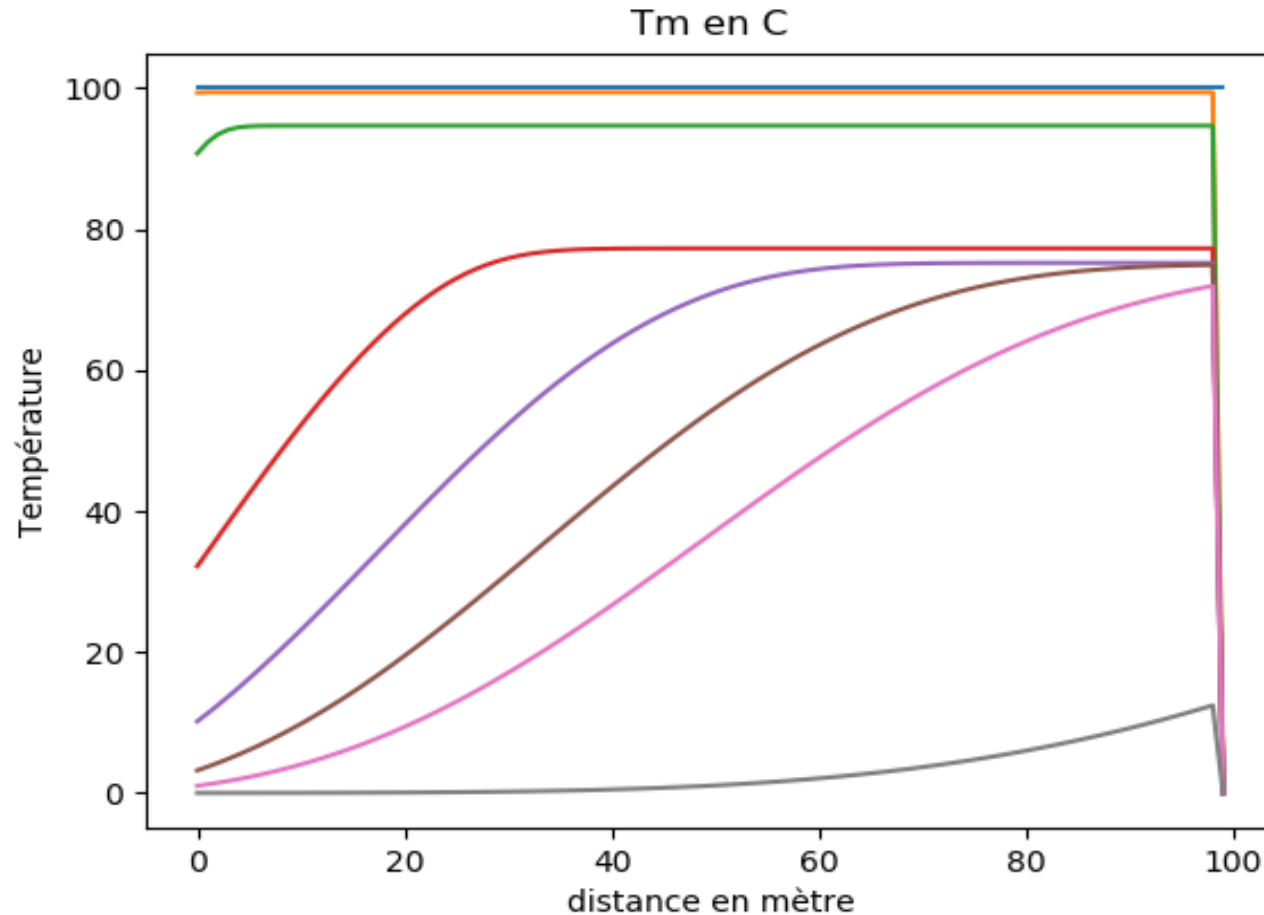
### 3) Résultat :

Évolution de la température  $T_m$  en fonction du temps

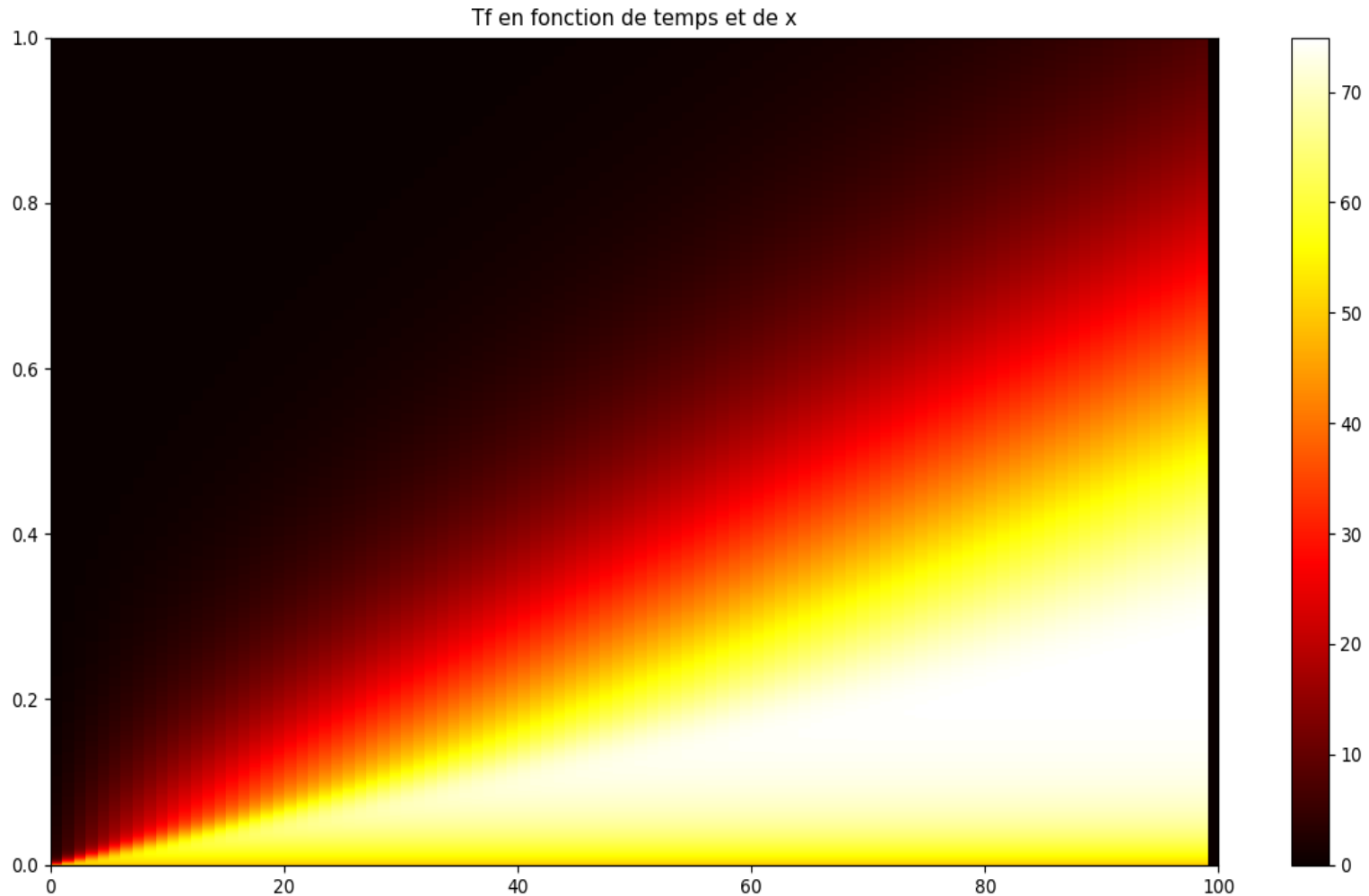




# Évolution de la température $T_m$ en fonction de la distance



# Évolution de la température $T_f$ en fonction du temps et de la distance



# Conclusion:

La modélisation thermique nous a permis d'avoir une idée sur la variation de la température en fonction de l'épaisseur de fluide (gap entre matériaux )