

# Etude numérique de la congélation assistée par micro-ondes

Mathieu SADOT  
Olivier ROUAUD  
Sebastien CURET  
Michel HAVET

# Etude numérique de la congélation assistée par micro-ondes

## Sommaire :

- ❖ Introduction
- ❖ Modèle
- ❖ Résultats numériques
- ❖ Partie expérimentale
- ❖ Conclusion

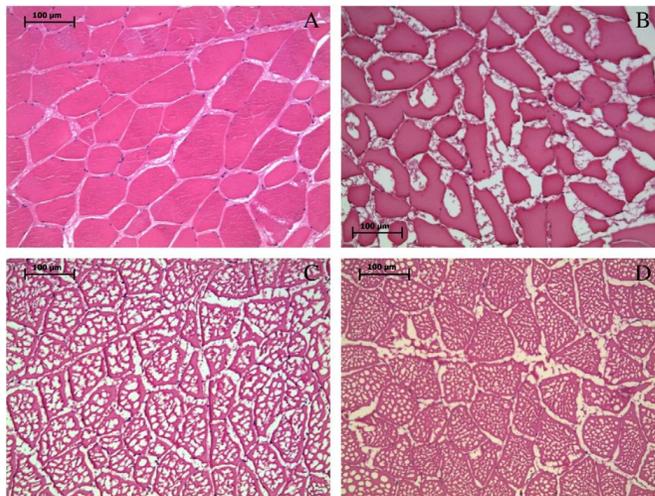


# Introduction

## CONTEXTE

La qualité de congélation est meilleure pour de petits cristaux de glaces obtenus par des procédés de congélation rapide, donc coûteux.

Des études récentes<sup>1,2</sup> montrent que le procédé de congélation peut fournir une qualité de produit supérieure avec l'assistance de pulses d'ondes électromagnétiques.



Microstructure de viande de porc pour un produit <sup>1</sup>:

- A)** frais ;
  - B)** congelé par jet d'air ( $2 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $-40^{\circ}\text{C}$ );
  - C)** congelé avec azote liquide ;
  - D)** congelé avec azote liquide et assistance de pulse d'ondes radios.
- Anese et al. (2012).

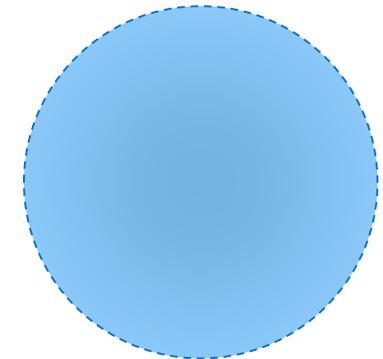
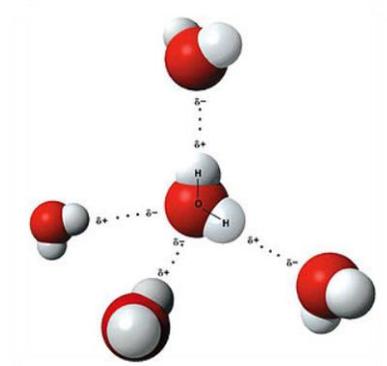
<sup>1</sup> ANESE, M., MANZOCCO, L., PANOZZO, A., BERALDO, P., FOSCHIA, M., NICOLI, M.C., 2012. EFFECT OF RADIOFREQUENCY ASSISTED FREEZING ON MEAT MICROSTRUCTURE AND QUALITY. FOOD RES. INT. 46, 50–54.

<sup>2</sup> XANTHAKIS, E., LE-BAIL, A., RAMASWAMY, H., 2014. DEVELOPMENT OF AN INNOVATIVE MICROWAVE ASSISTED FOOD FREEZING PROCESS. INNOV. FOOD SCI. EMERG. TECHNOL. 26, 176–181

## CONTEXTE

Deux hypothèses sont envisagées:

- Rupture des liaisons H due à la rotation des molécules d'eau induite par les micro-ondes <sup>3</sup>.
- Fusion partielle des cristaux due aux oscillations de température puis cristallisation secondaire <sup>2</sup>.



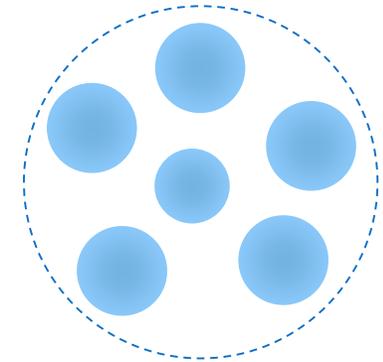
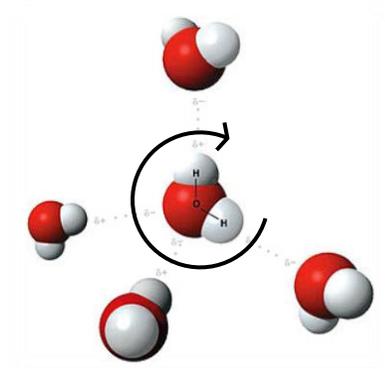
<sup>2</sup> XANTHAKIS, E., LE-BAIL, A., RAMASWAMY, H., 2014. DEVELOPMENT OF AN INNOVATIVE MICROWAVE ASSISTED FOOD FREEZING PROCESS. INNOV. FOOD SCI. EMERG. TECHNOL. 26, 176–181.

<sup>3</sup> HANYU, Y., ICHIKAWA, M., MATSUMOTO, G., 1992. AN IMPROVED CRYOFIXATION METHOD - CRYOQUENCHING OF SMALL TISSUE BLOCKS DURING MICROWAVE IRRADIATION. J. MICROSC. 165, 255–271.

## CONTEXTE

Deux hypothèses sont envisagées:

- Rupture des liaisons H due à la rotation des molécules d'eau induite par les micro-ondes <sup>3</sup>.
- Fusion partielle des cristaux due aux oscillations de température puis cristallisation secondaire <sup>2</sup>.



<sup>2</sup> XANTHAKIS, E., LE-BAIL, A., RAMASWAMY, H., 2014. DEVELOPMENT OF AN INNOVATIVE MICROWAVE ASSISTED FOOD FREEZING PROCESS. INNOV. FOOD SCI. EMERG. TECHNOL. 26, 176–181.

<sup>3</sup> HANYU, Y., ICHIKAWA, M., MATSUMOTO, G., 1992. AN IMPROVED CRYOFIXATION METHOD - CRYOQUENCHING OF SMALL TISSUE BLOCKS DURING MICROWAVE IRRADIATION. J. MICROSC. 165, 255–271.

## CONTEXTE

Pour comprendre et modéliser le phénomène le projet Européen **FREEZEWAVE** a été créé.

4 partenaires

### Objectif:

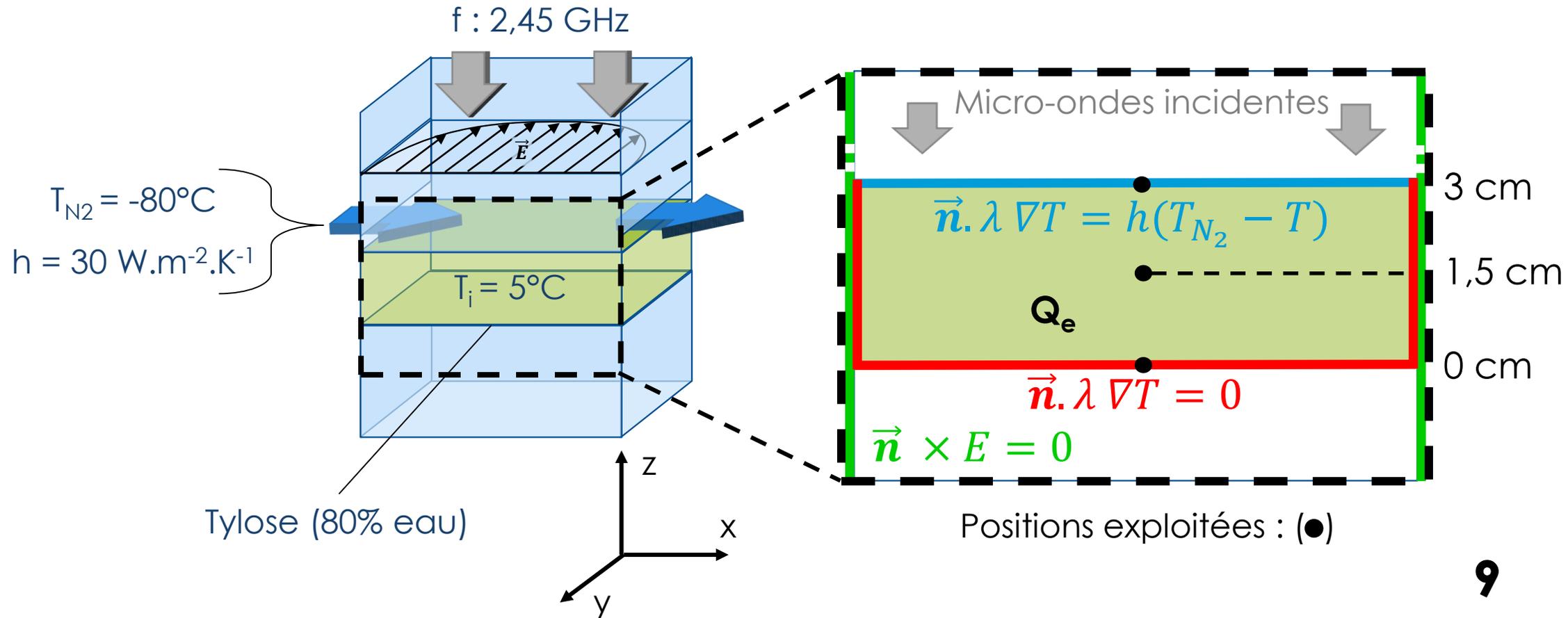
Dimensionner un prototype à échelle industrielle.





**Modèle**

## Géométrie et conditions aux limites:



## Hypothèses du modèle :

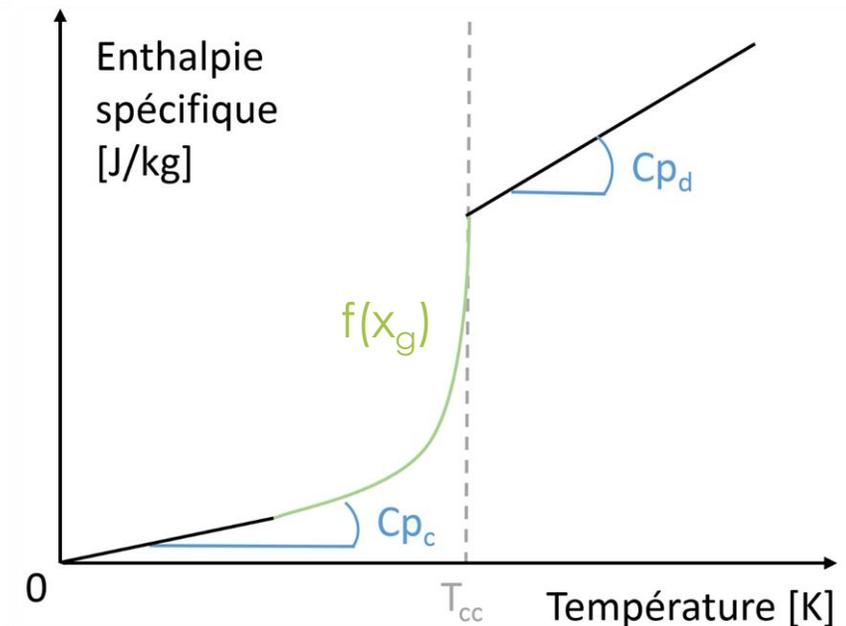
- Pas de variation de volume
- Pas de transfert de matière
- L'eau contenue dans le produit congèle sous forme de cristaux de glace sphériques de même rayon et uniformément répartis
- Propriétés thermophysiques et diélectriques constantes dans les phases congelée et décongelée
- Propriétés thermophysiques et diélectriques dépendantes de la fraction d'eau libre congelée lors du changement de phase

## Equation de la chaleur :

$$\frac{\partial H}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \rho - \nabla \cdot \lambda \nabla T = Q_e$$

$$Q_e = \frac{1}{2} \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' |E|^2$$

$$H = f(x_g)$$



Avec  $\omega$  la pulsation,  $\epsilon_0$  la permittivité du vide,  $\epsilon_r''$  le facteur de perte diélectrique relatif,  $E$  le champ électrique local,  $x_g$  la fraction massique de glace et  $T_{cc}$  la température de congélation commençante.

## Fraction de glace et Rayon des cristaux :

$$x_g = \frac{m_g}{m_t} = \frac{4 \cdot \pi}{3} r(T)^3 N \frac{\rho_g}{V_t \cdot \rho_t}$$

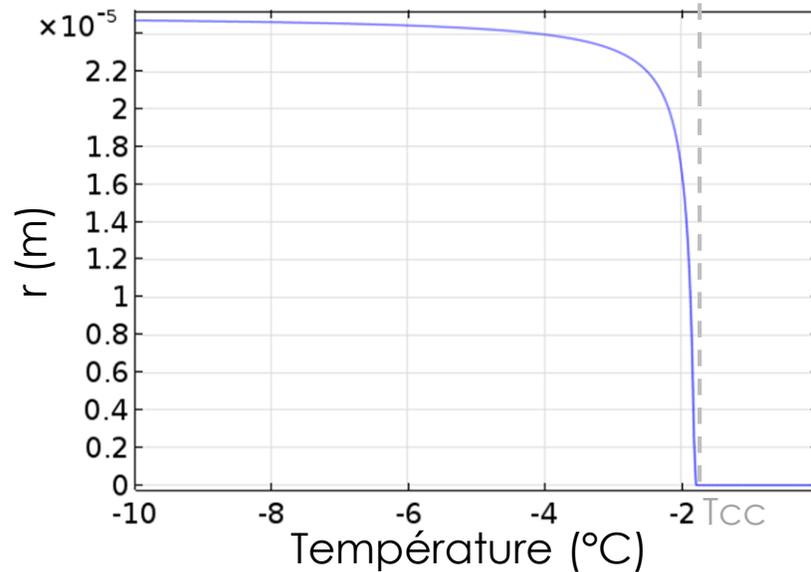
Avec  $m_g$  et  $m_t$  les masses de glace et d'échantillon,  $N$  le nombre de cristaux de glace,  $\rho_g$  et  $\rho_t$  les masses volumiques de glace et d'échantillon et  $V_t$  le volume de l'échantillon.

Avec

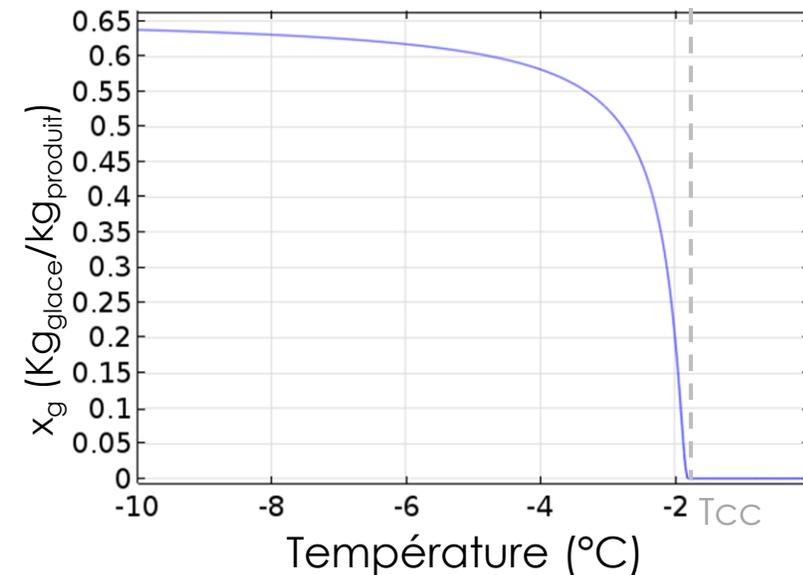
$$r(T) = \left( 1 + \frac{a}{T - T_{cc} - a} \right) \cdot r_{fin}$$

Avec  $a$  une constante spécifique au système.

## Rayon et fraction de glace en fonction de la température:

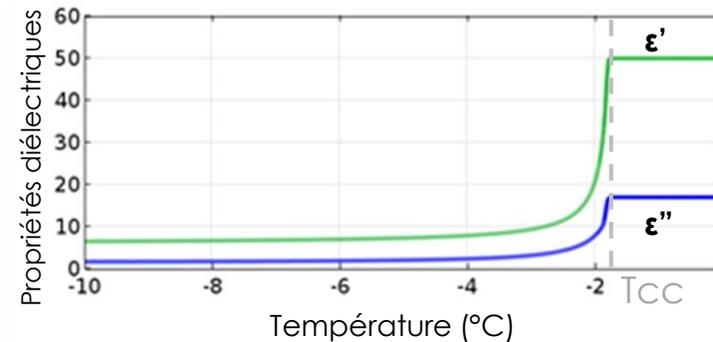


Rayon d'un cristal de glace

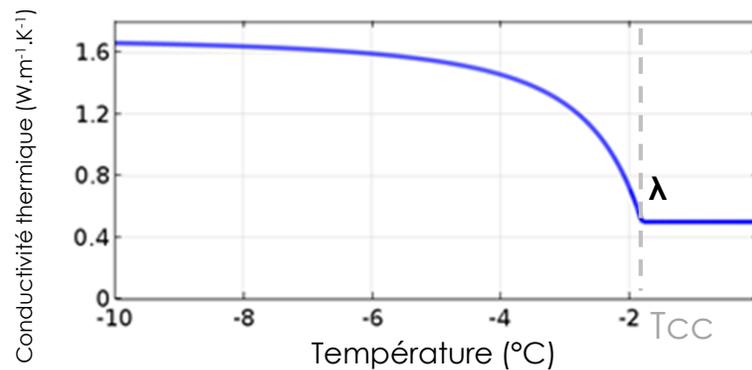


Fraction de glace

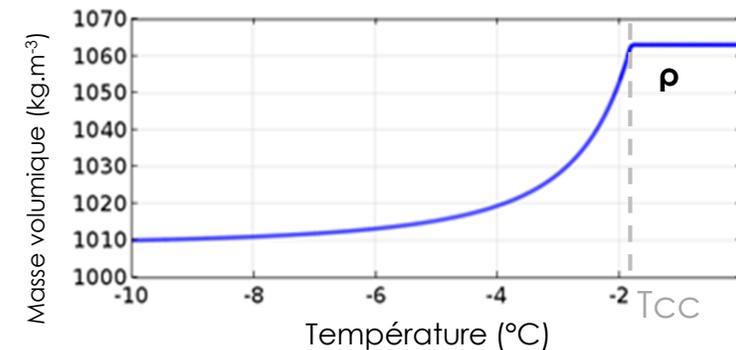
## Propriétés diélectriques et thermophysiques en fonction de la température:



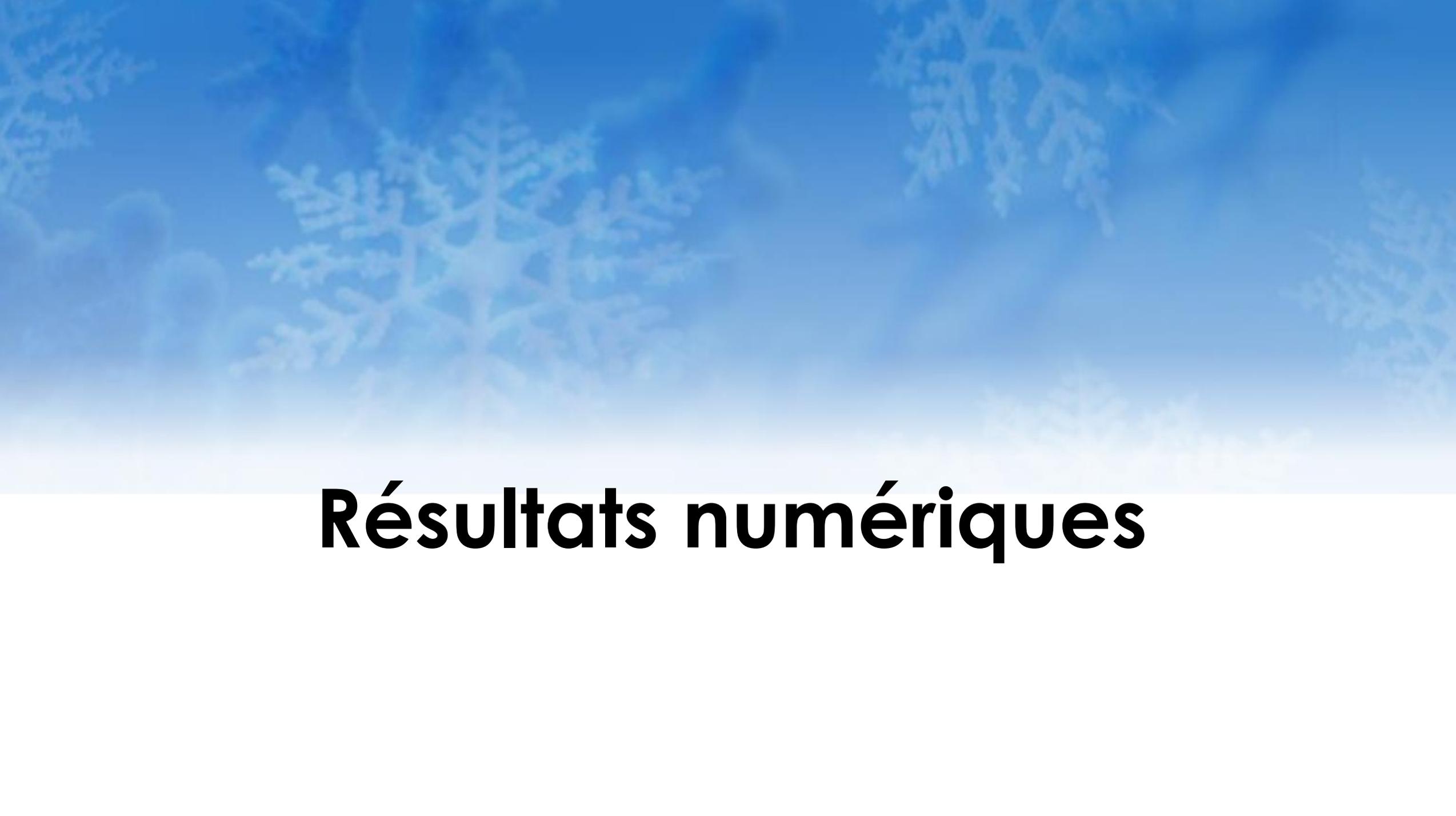
Propriétés diélectriques



Conductivité thermique

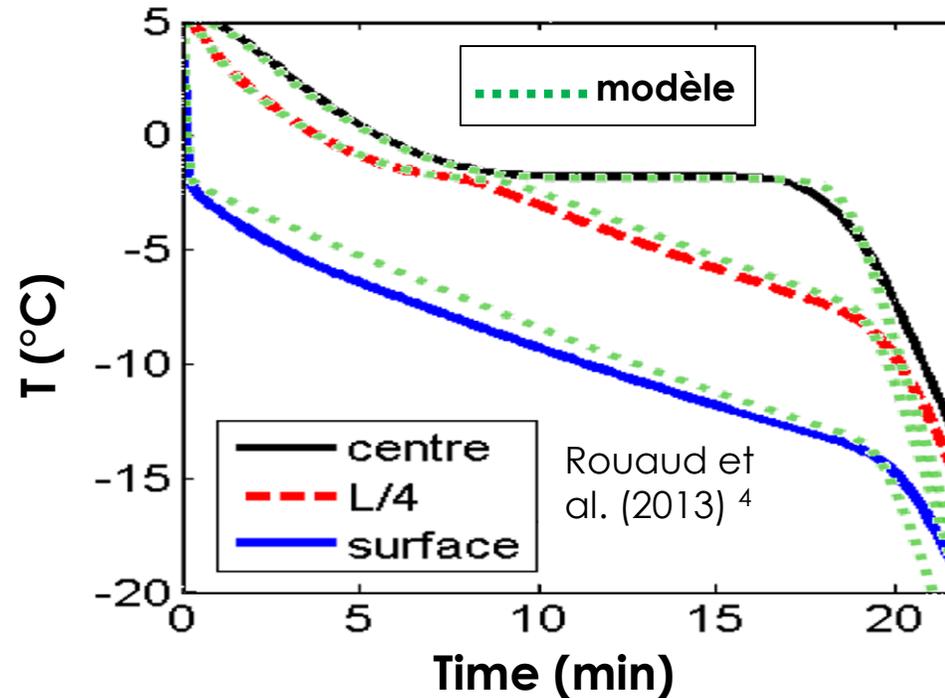


Masse volumique



# Résultats numériques

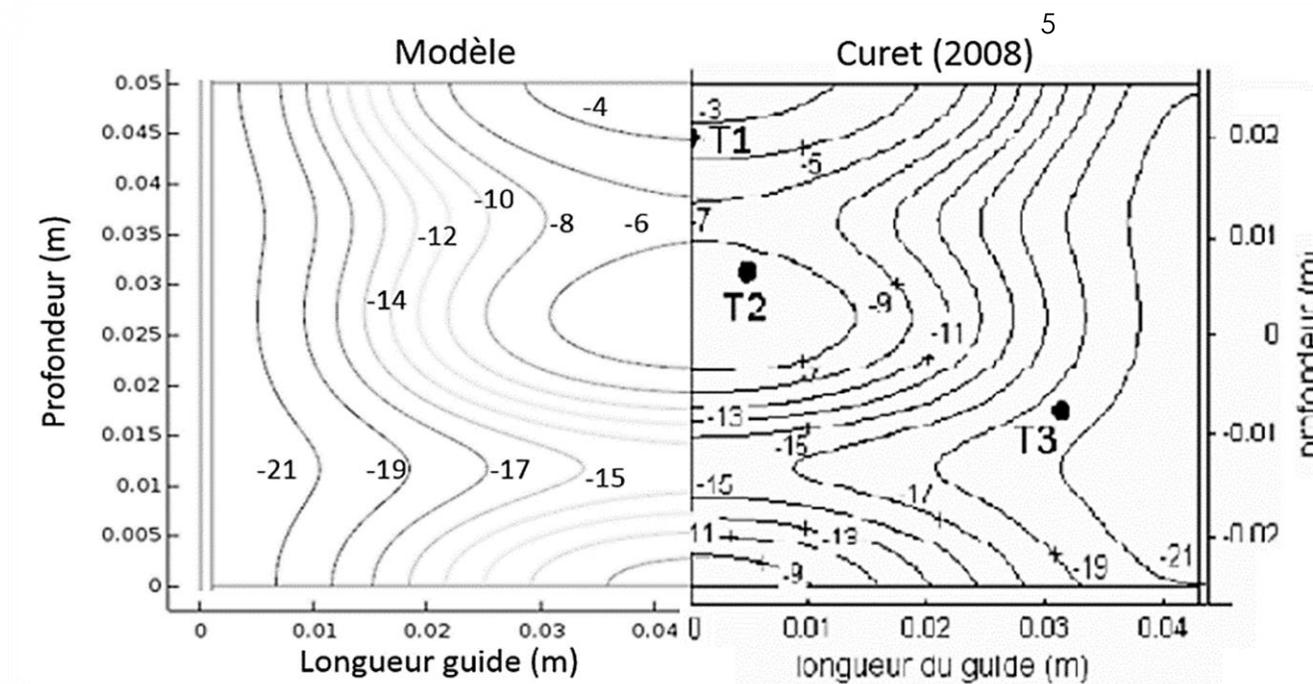
## Validation du modèle : Thermique + changement de phase :



Evolution de la température en fonction du temps en 1D lors d'une congélation cryogénique sur un gel de tylose de 2 cm d'épaisseur.

<sup>4</sup> ROUAUD, O., LE BAIL, A., DE PELLEGRIN, R., 2013. TRANSFERT DE CHALEUR ET DE MASSE LORS DE LA CONGÉLATION DE PRODUITS NON EMBALLÉS. REV. GÉNÉRALE DU FROID DU COND. L'AIR 1137, 42–47.

## Validation du modèle : Micro-ondes + thermique :

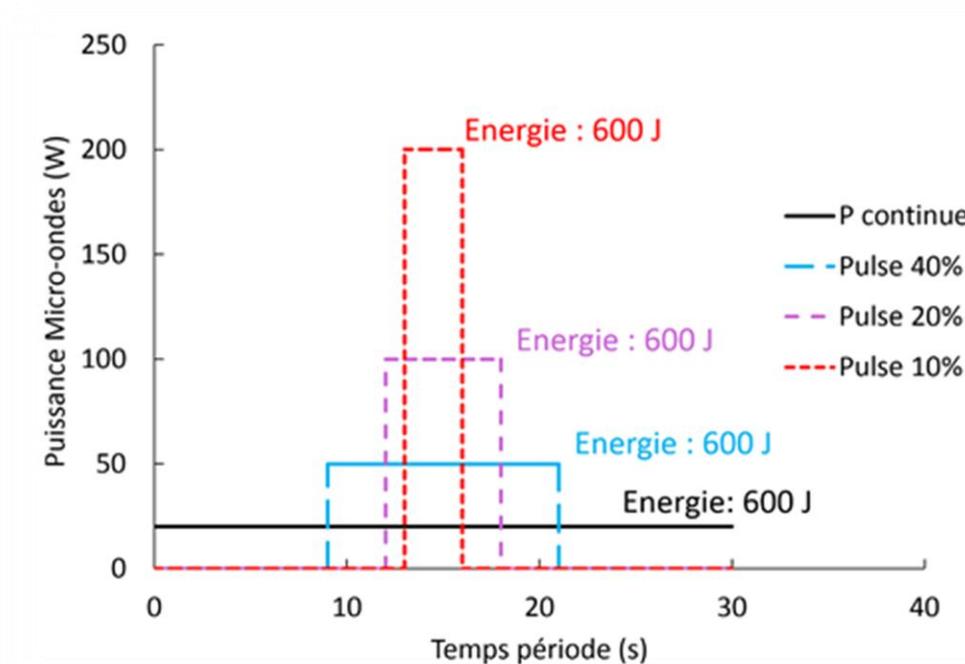


Répartition de la température dans un gel de tylose en fonction de la profondeur après 14 s traitement micro-ondes

<sup>5</sup> CURET, S., 2008. TRAITEMENTS MICRO-ONDES ET TRANSFERTS DE CHALEUR EN MILIEU MULTIPHASIQUE. THÈSE DE L'UNIVERSITÉ DE NANTES.

## Stratégie :

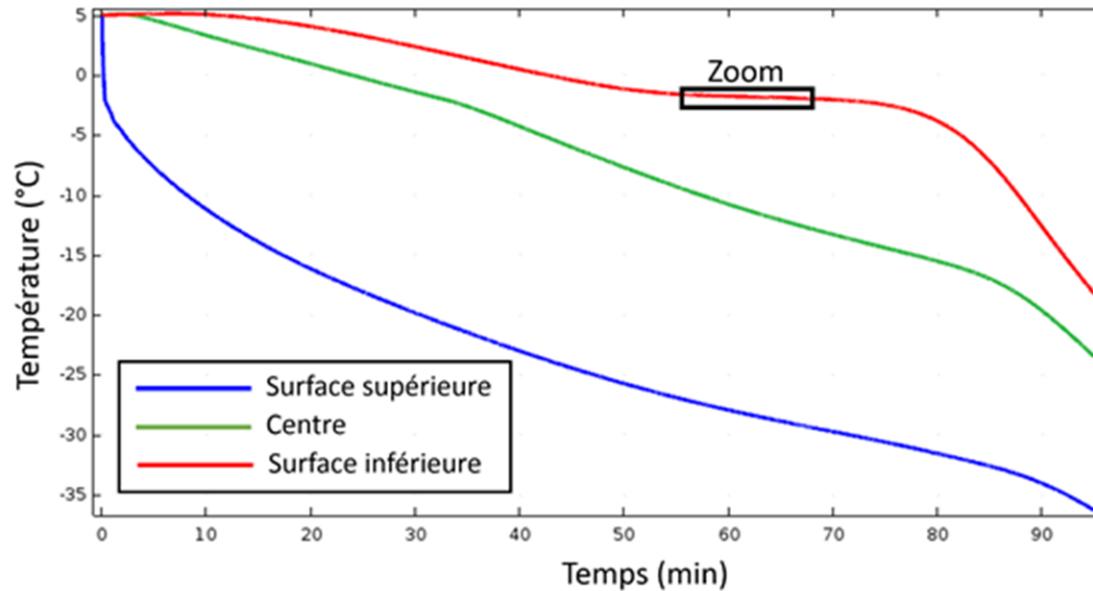
Puissance moyenne constante, Duty ratio différents :



Etude de l'influence de la durée des pulses à apport d'énergie égal sur la période.

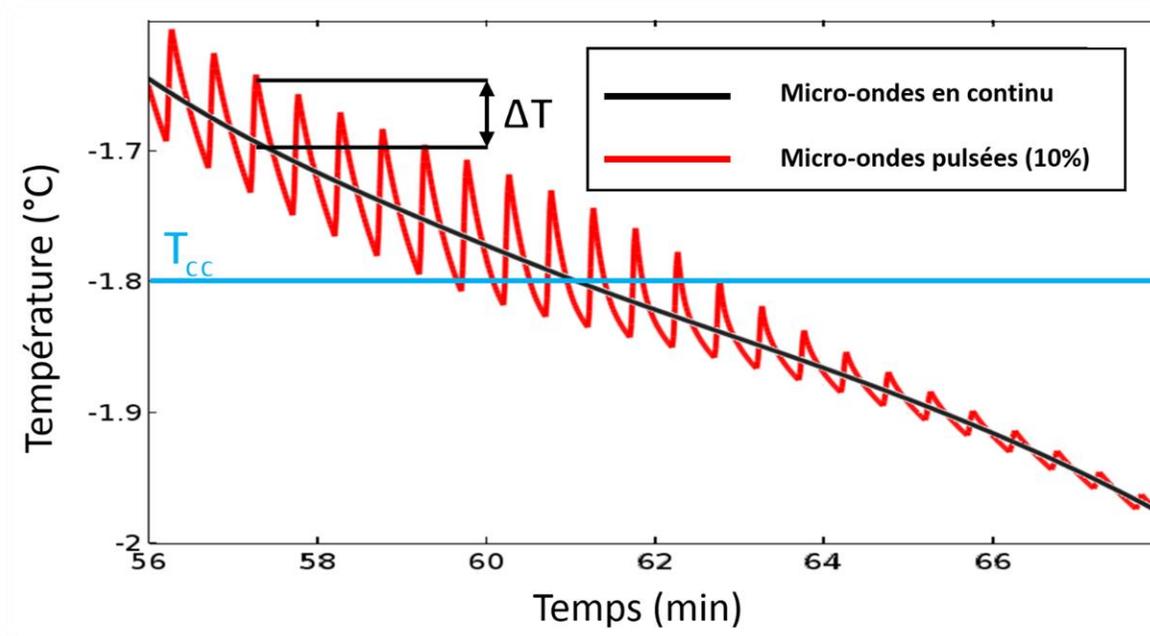
*Puissance micro-ondes pour un apport en continu et pulsé à 10%, 20% et 40% d'une période de 30 s.*

## Evolution de la température :



Evolution de température en surfaces supérieure (3 cm), milieu (1,5 cm) et inférieure (0 cm) pour des micro-ondes pulsées à 10% de la durée de la période.

## Evolution de la température :



Zoom sur l'évolution de température (en surface inférieure) pour des micro-ondes pulsées (10% de la période).

## Effets de la diminution des propriétés diélectriques:

- ❖ Moins de réflexion à l'interface air/produit

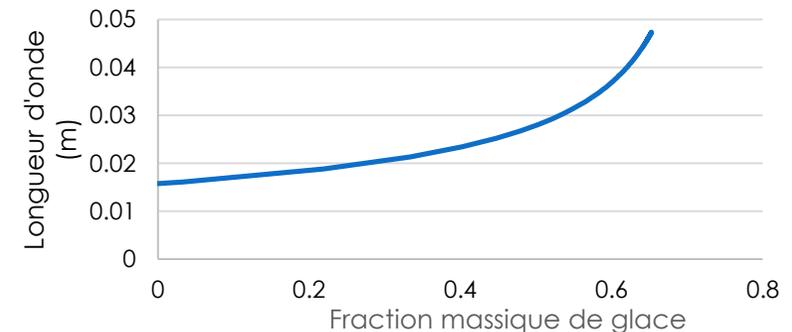
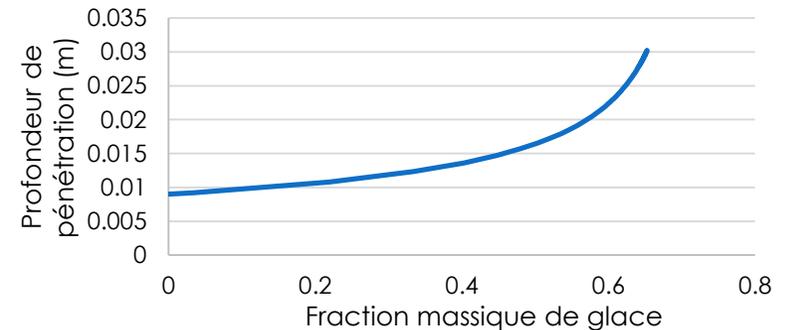
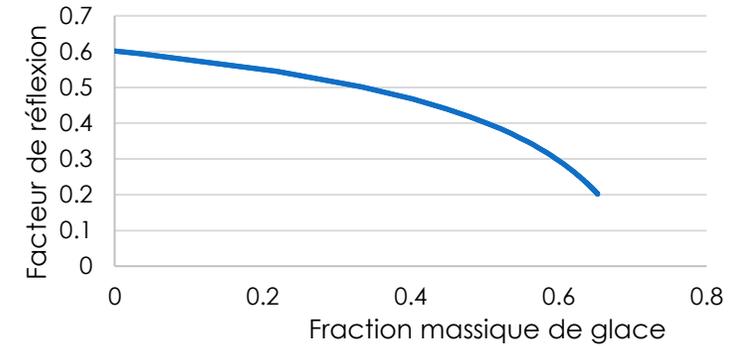
$$FR \approx \left( \frac{\sqrt{\epsilon_r'} - 1}{\sqrt{\epsilon_r' + 1}} \right)^2$$

- ❖ Augmentation de la profondeur de pénétration des microondes

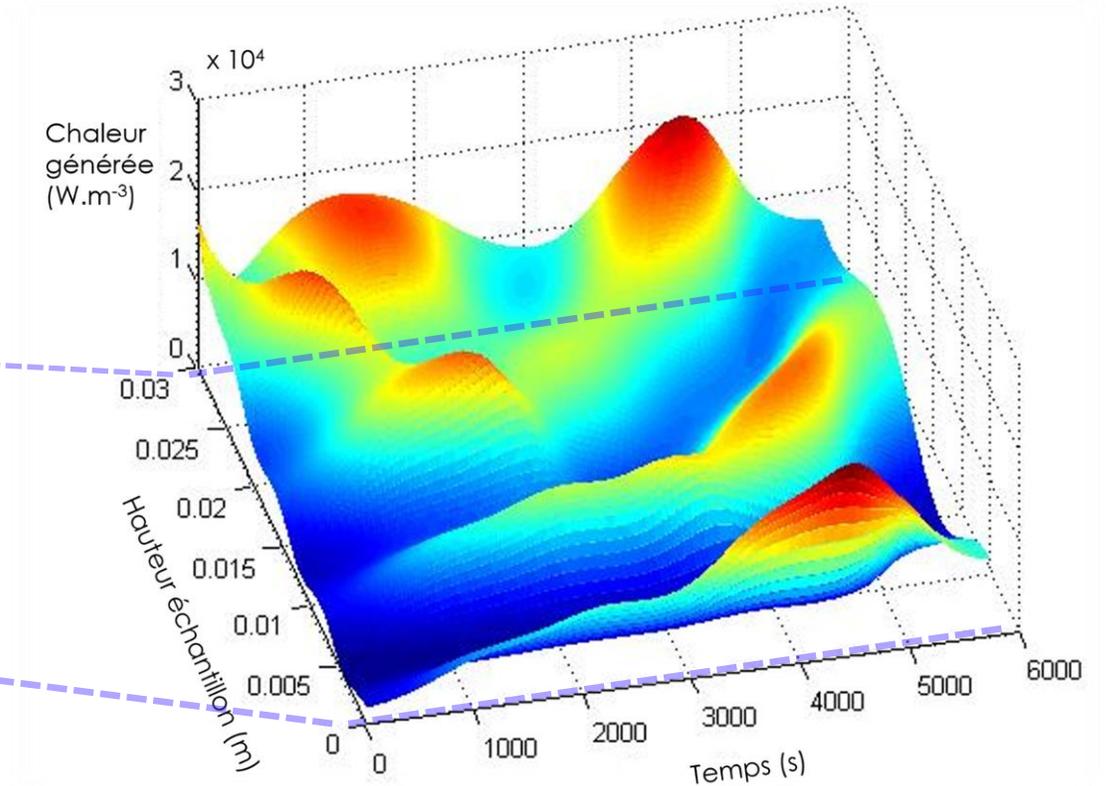
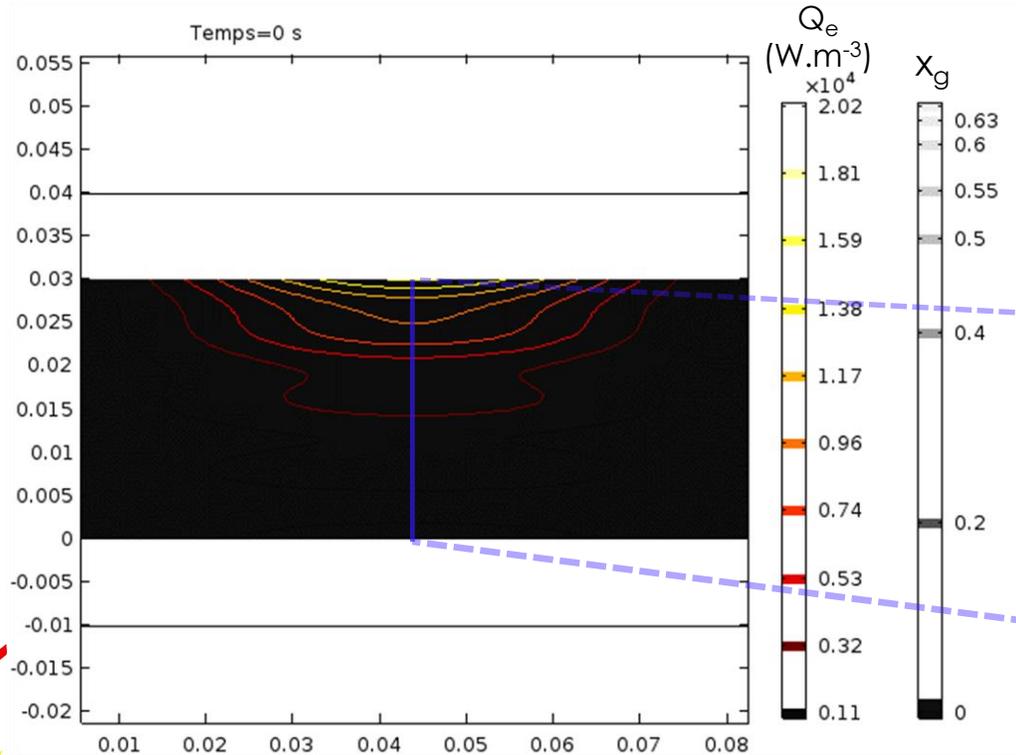
$$d_p = \frac{c_0}{2\sqrt{2}\pi f \sqrt{\epsilon_r'(\sqrt{1+\tan^2 \delta}-1)}}$$

- ❖ Augmentation de la longueur d'ondes dans le produit

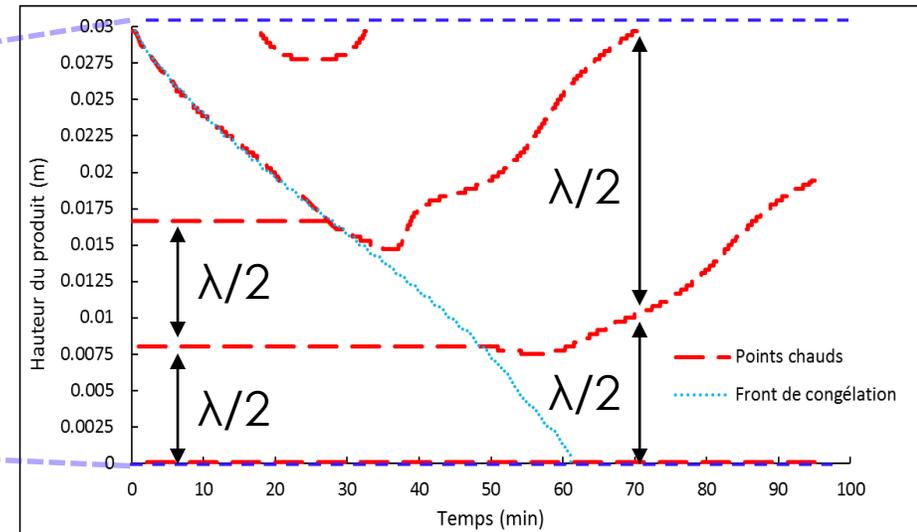
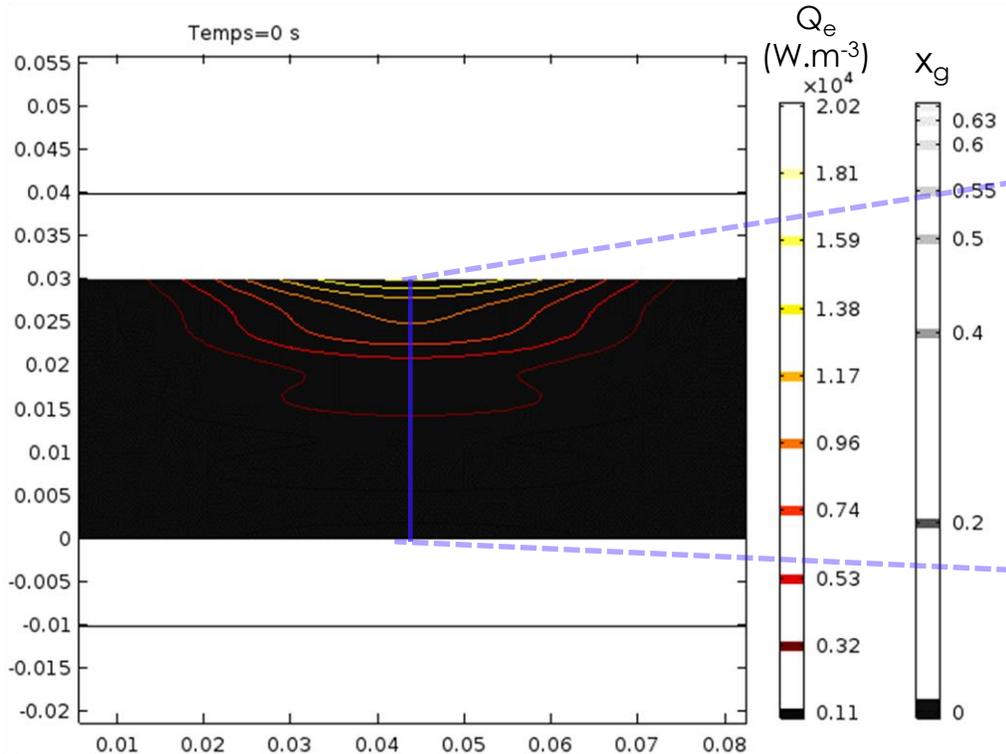
$$\lambda = \frac{c_0 \sqrt{2}}{f \sqrt{\epsilon_r'(1+\sqrt{1+\tan^2 \delta})}}$$



## Déplacement des points chauds dû à la variation des propriétés diélectriques :



## Déplacement des points chauds dû à la variation des propriétés diélectriques :





# **Partie expérimentale**

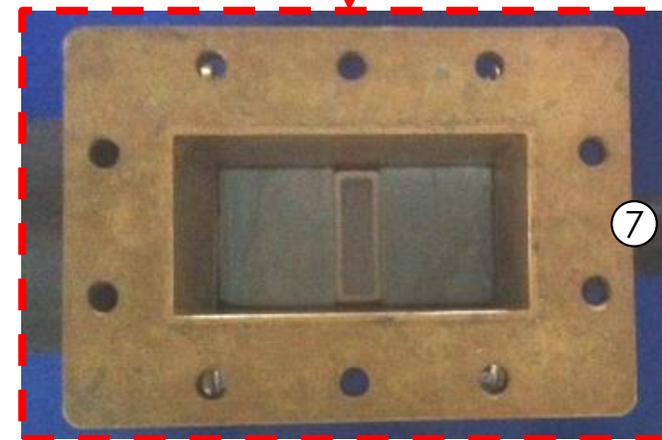
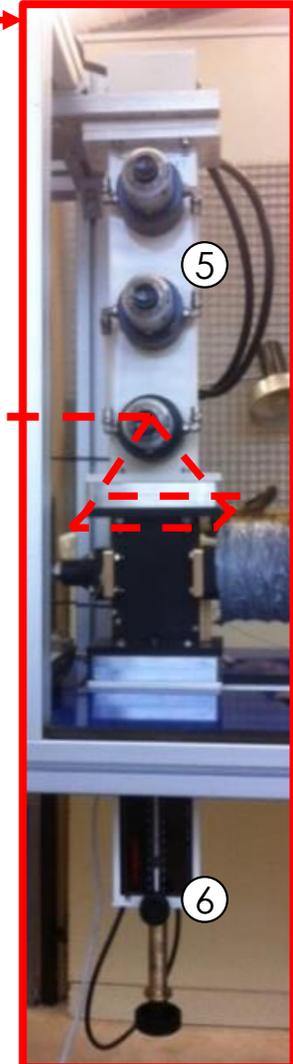
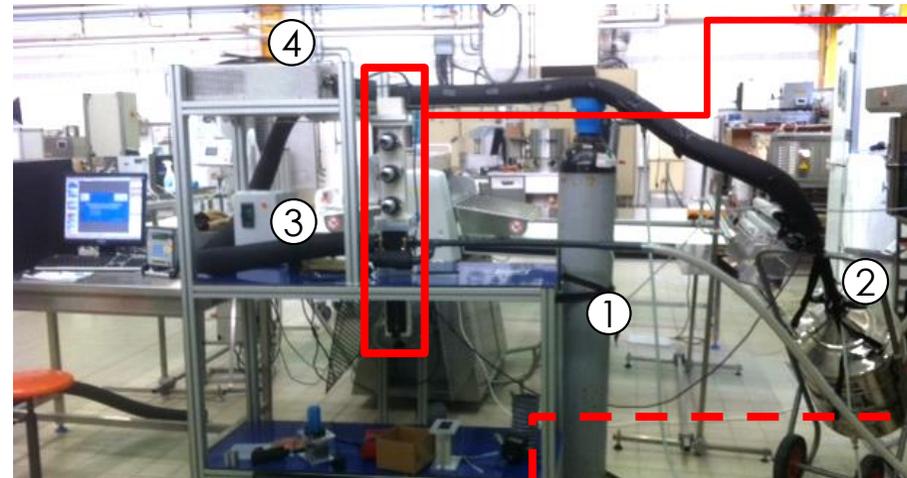
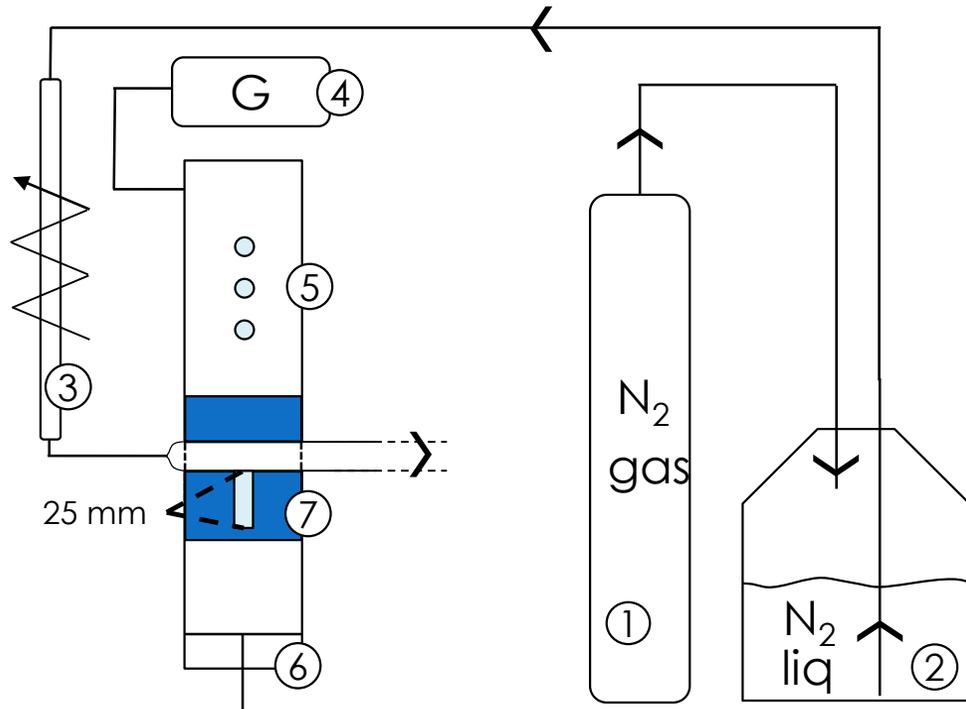
## Détermination des propriétés de la tylose:

- › Capacité calorifique et fraction d'eau libre :  $\mu$ DSC
- › Conductivité thermique : méthode du fil chaud
- › Masse volumique : modèle de mélange à partir des propriétés des constituants
- › Propriétés diélectriques : Sonde coaxiale ouverte
  - ➔ Problème de mesure des propriétés en phase congelée

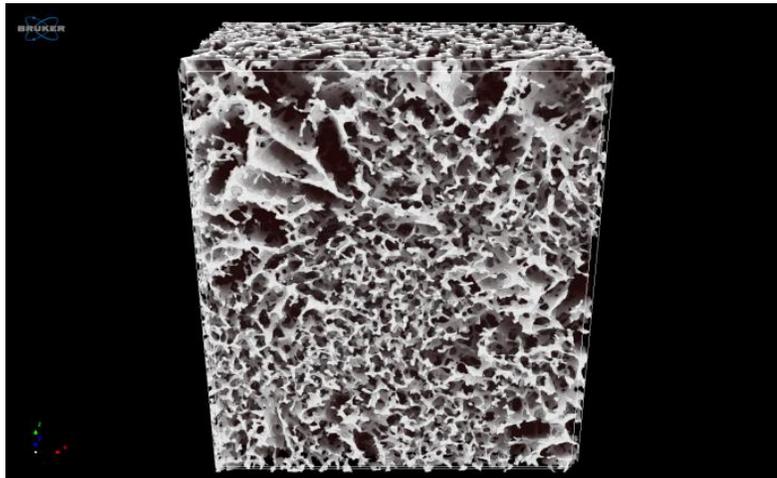
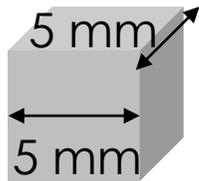
### Propriétés mesurées:

	Congelé	Décongelé
<b>Cp [J/(kg.K)]</b>	2321 ± 5%	3816 ± 1%
<b>Ls [J/kg]</b>	243626 ± 32	
<b>x_fw [kg/kg]</b>	(73,38 ± 0,01) %	
<b><math>\lambda</math> [W/(m.K)]</b>	1,72 ± 5%	0,54 ± 5%
<b><math>\rho</math> [kg/m<sup>3</sup>]</b>	961.9	1040.2
<b><math>\epsilon'</math></b>	6	50.5
<b><math>\epsilon''</math></b>	1.5	20.7

# Partie expérimentale



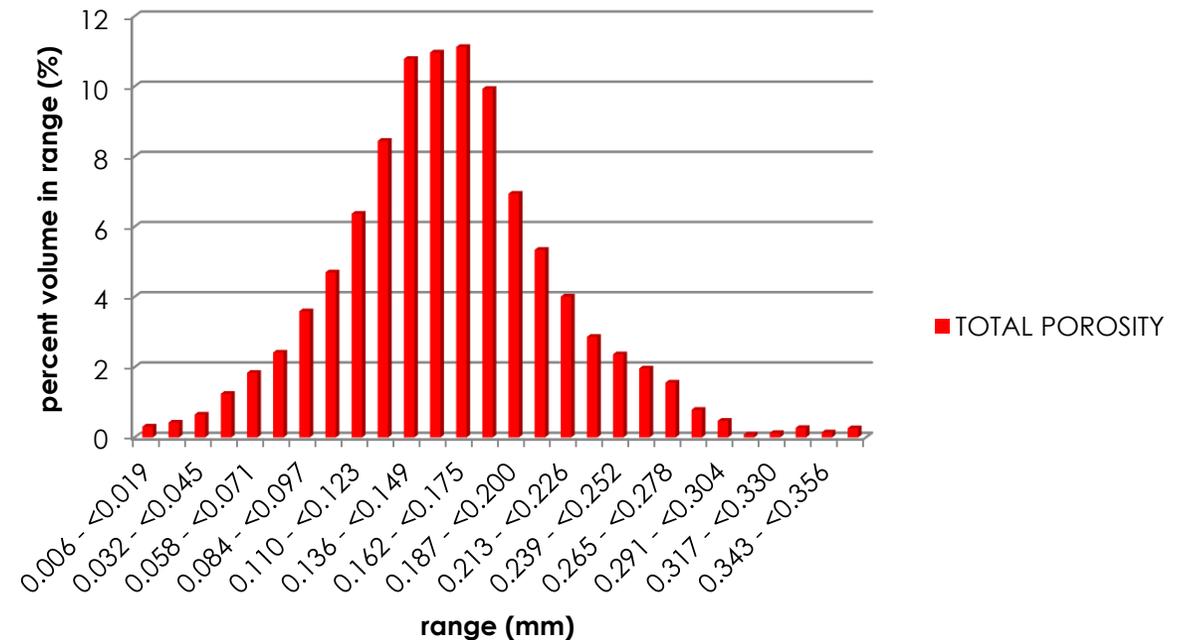
## Etude de la porosité par tomographie sur un échantillon de tylose congelé puis lyophilisé



Paramètres:

taille de voxel : 7,5  $\mu\text{m}$   
Nombre de plans : 993

**TOTAL POROSITY**





# **Conclusion et perspectives**

Un modèle a été développé et validé à partir des données de la littérature.

Il a mis en évidence:

- L'interaction des ondes électromagnétiques sur l'interface du changement d'état
- L'hétérogénéité spatiale et temporelle de la chaleur générée
- De faibles oscillations de températures

Le modèle permet d'appréhender la complexité du procédé de congélation assistée par microondes.

# Perspectives

- Plusieurs puissances microondes, durées et fréquences de pulses seront testées pendant la congélation pour étudier l'effet sur la taille des cristaux de glace.
- La tomographie après lyophilisation permettra de mesurer la distribution de taille des cristaux de glace.
- Le modèle sera complété pour prendre en compte l'adaptation d'impédance et l'effet du procédé sur la taille des cristaux.

**Merci de votre  
attention**