

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

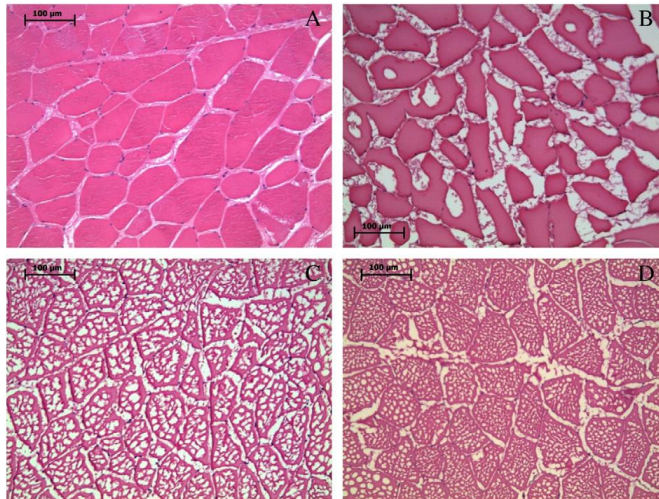


Introduction

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^{1,2} 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 ¹:

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

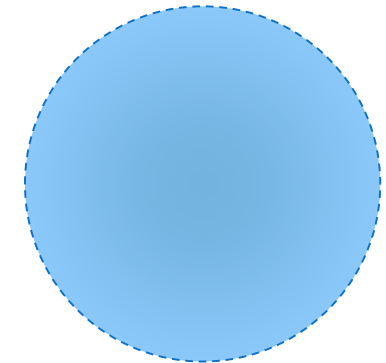
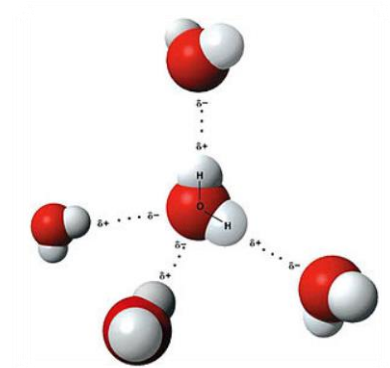
¹ ANESE, M., MANZOCCO, L., PANOZZO, A., BERALDO, P., FOSCHIA, M., NICOLI, M.C., 2012. EFFECT OF RADIOFREQUENCY ASSISTED FREEZING ON MEAT MICROSTRUCTURE AND QUALITY. FOOD RES. INT. 46, 50–54.

² 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 ³.
- Fusion partielle des cristaux due aux oscillations de température puis cristallisation secondaire ².



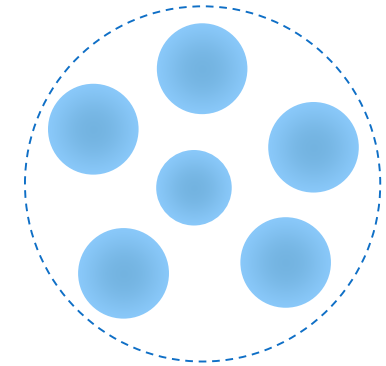
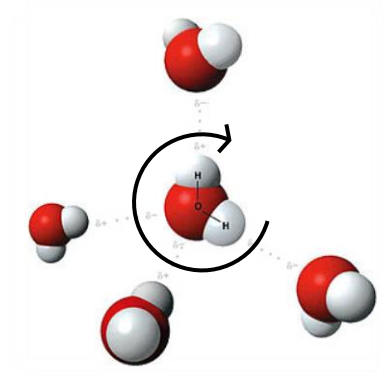
² XANTHAKIS, E., LE-BAIL, A., RAMASWAMY, H., 2014. DEVELOPMENT OF AN INNOVATIVE MICROWAVE ASSISTED FOOD FREEZING PROCESS. INNOV. FOOD SCI. EMERG. TECHNOL. 26, 176–181.

³ 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 ³.
- Fusion partielle des cristaux due aux oscillations de température puis cristallisation secondaire ².



² 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.

³ 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:

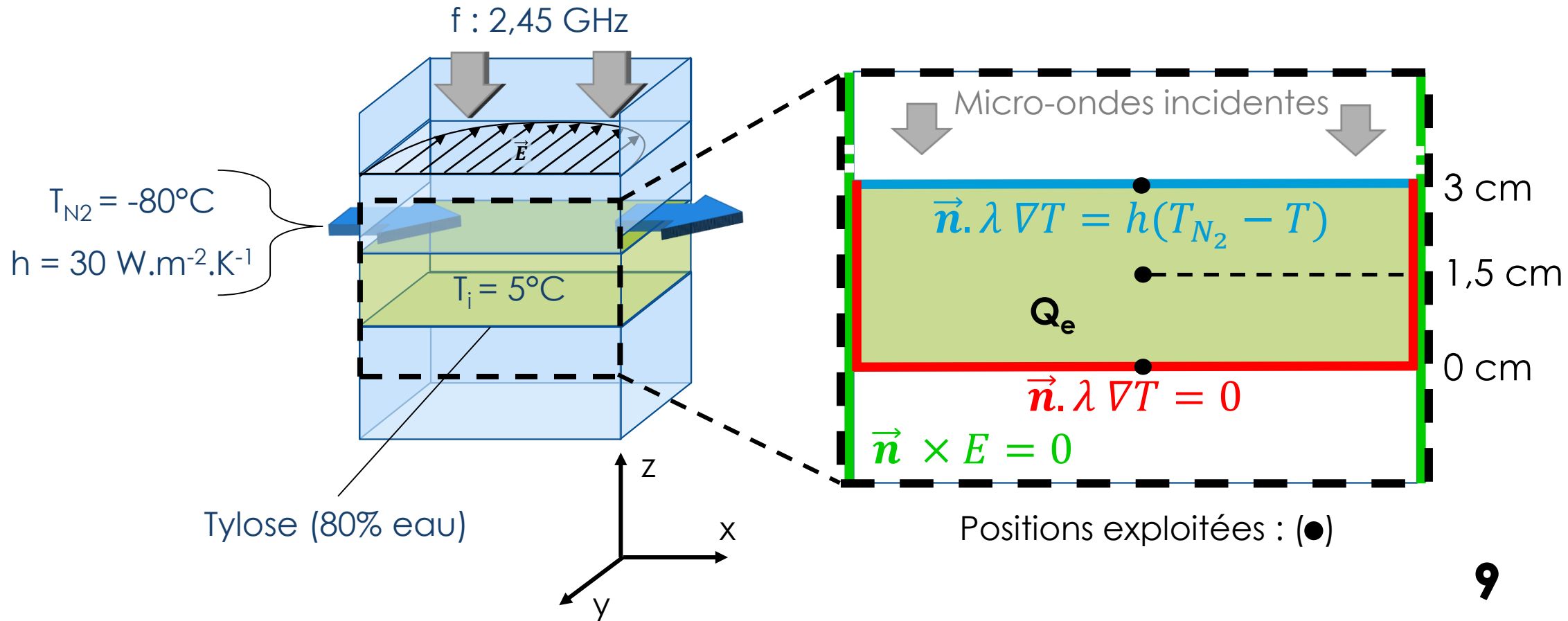
Dimensionner un prototype à échelle industrielle.





Modèle

Géométrie et conditions aux limites:



Hypothèses du modèle :

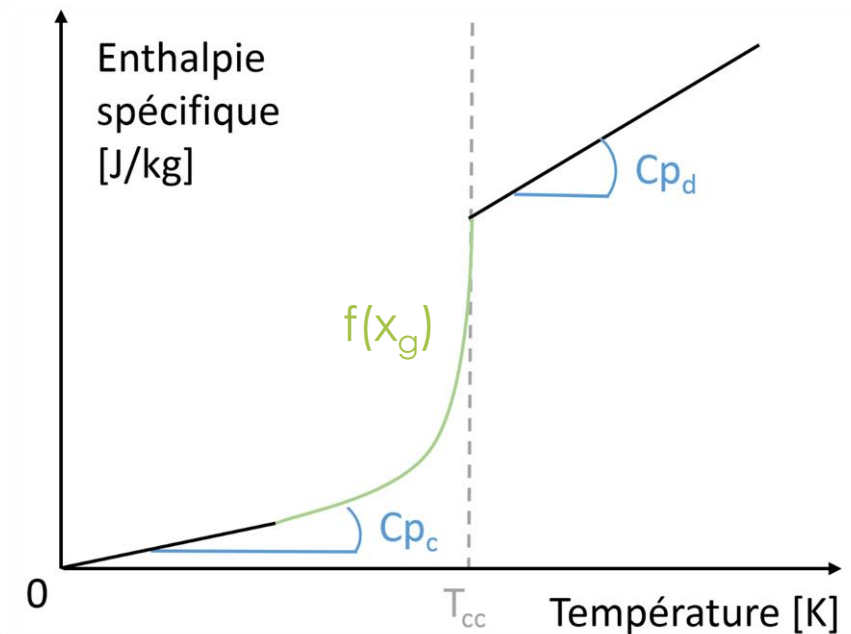
- Pas de variation de volume
- Pas de transfert de matière
- L'eau contenue dans le produit congèle sous forme de cristaux de glace sphériques de même rayon et uniformément répartis
- Propriétés thermophysiques et diélectriques constantes dans les phases congelée et décongelée
- Propriétés thermophysiques 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 ω la pulsation, ϵ_0 la permittivité du vide, ϵ_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 :

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

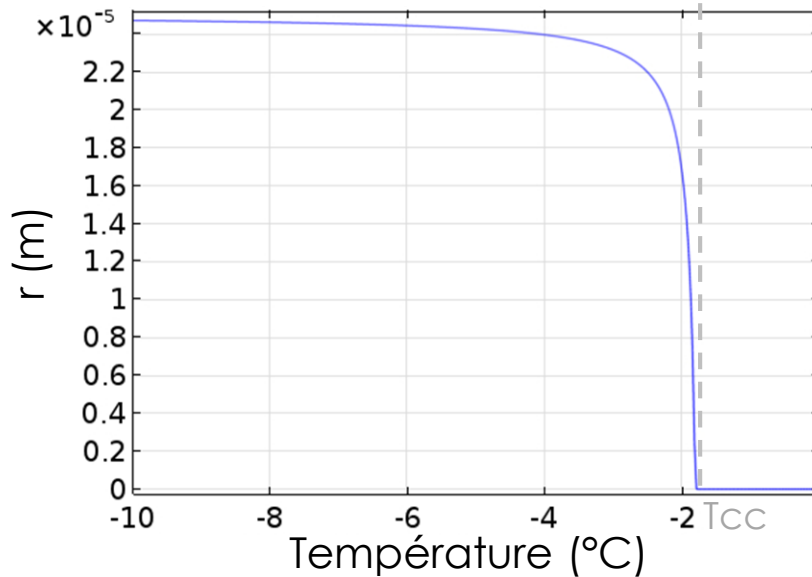
Avec m_g et m_t les masses de glace et d'échantillon, N le nombre de cristaux de glace, ρ_g et ρ_t les masses volumiques de glace et d'échantillon et V_t le volume de l'échantillon.

Avec

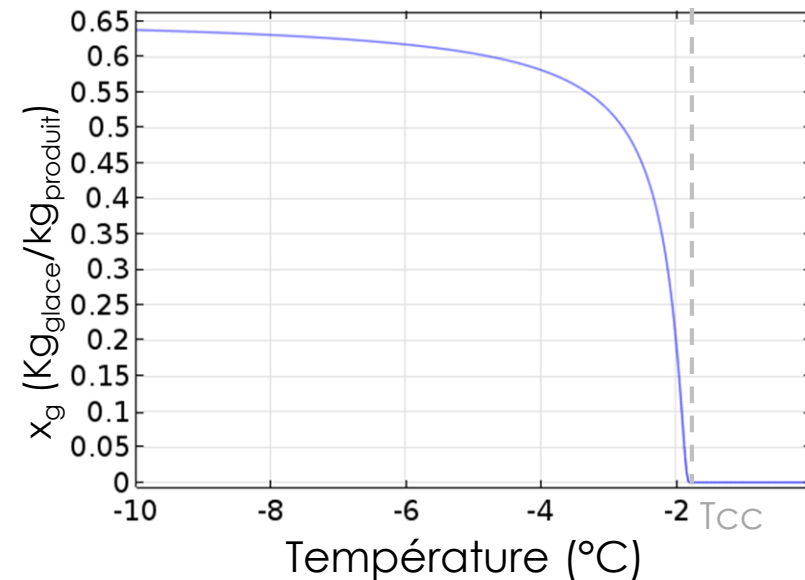
$$r(T) = \left(1 + \frac{a}{T - T_{cc} - a} \right) \cdot r_{fin}$$

Avec a une constante spécifique au système.

Rayon et fraction de glace en fonction de la température:

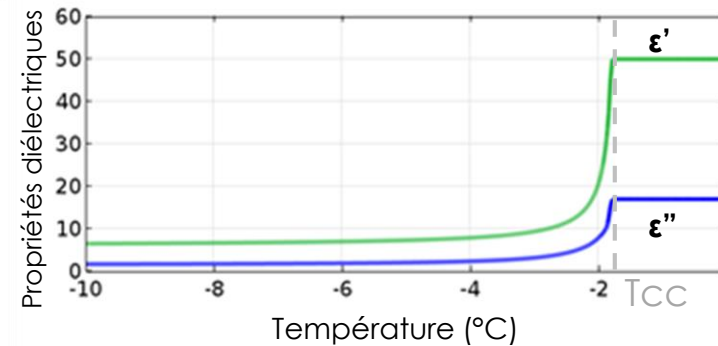


Rayon d'un cristal de glace

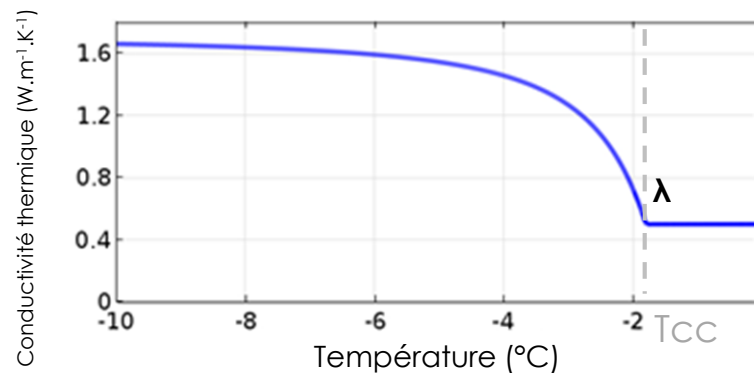


Fraction de glace

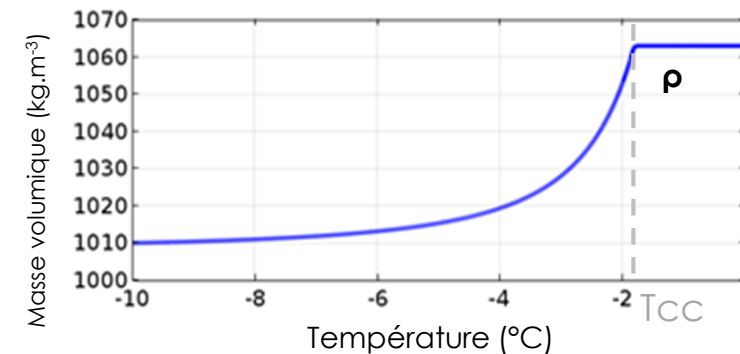
Propriétés diélectriques et thermophysiques en fonction de la température:



Propriétés diélectriques



Conductivité thermique

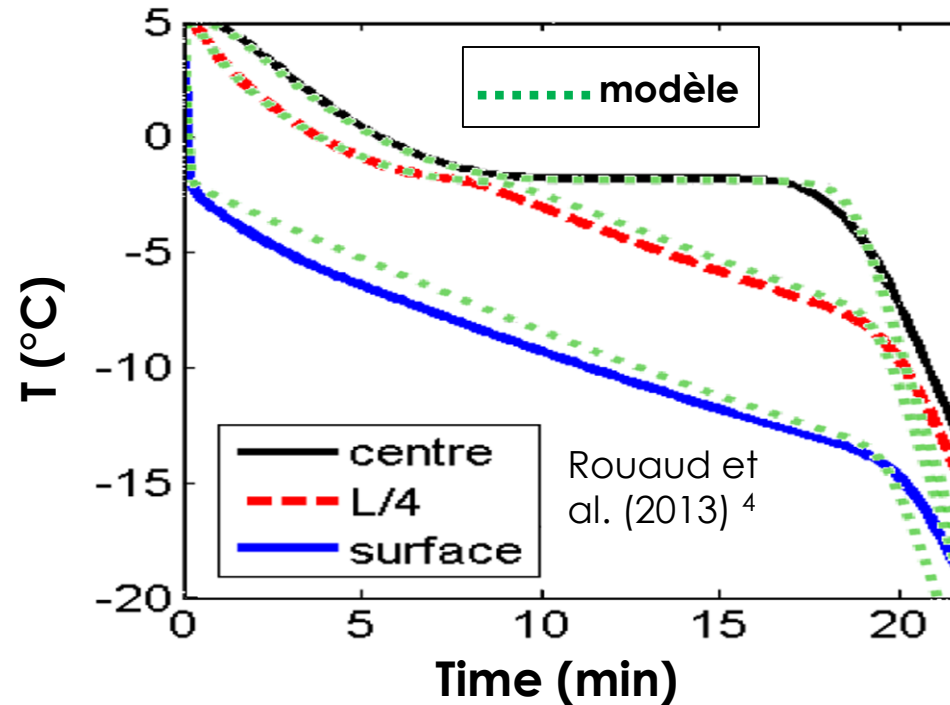


Masse volumique



Résultats numériques

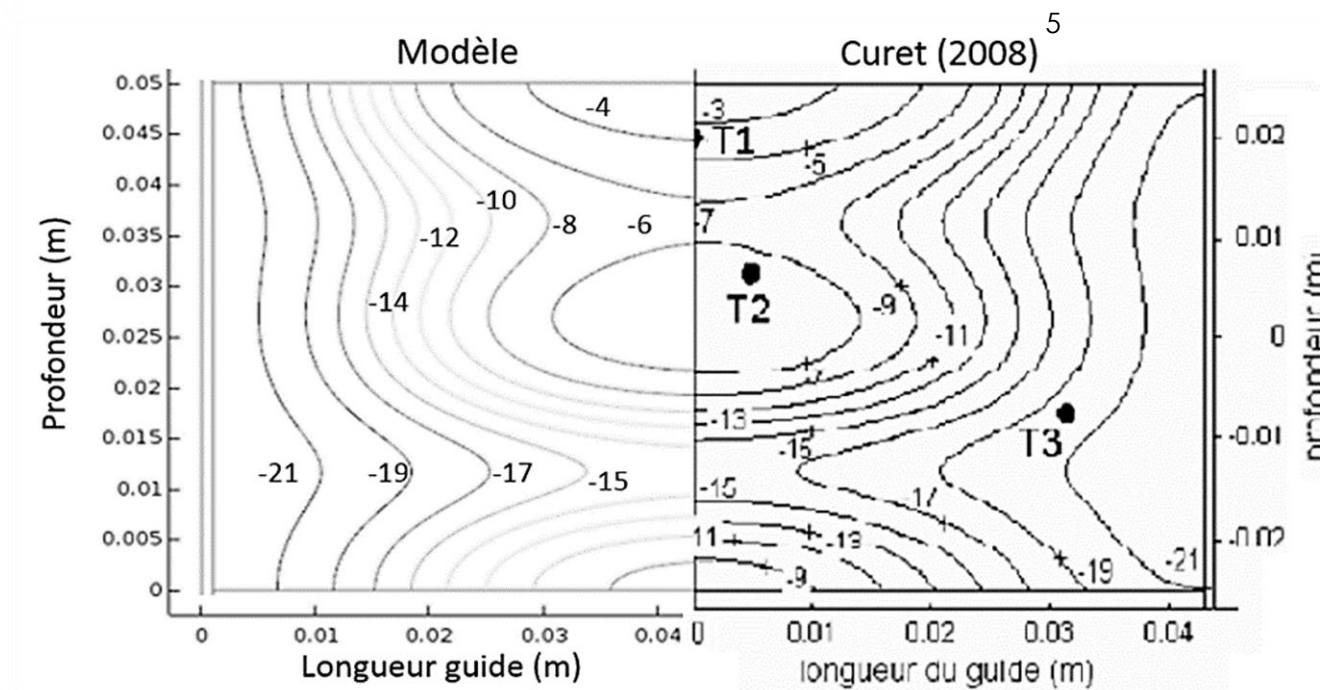
Validation du modèle : Thermique + changement de phase :



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.

⁴ 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 :

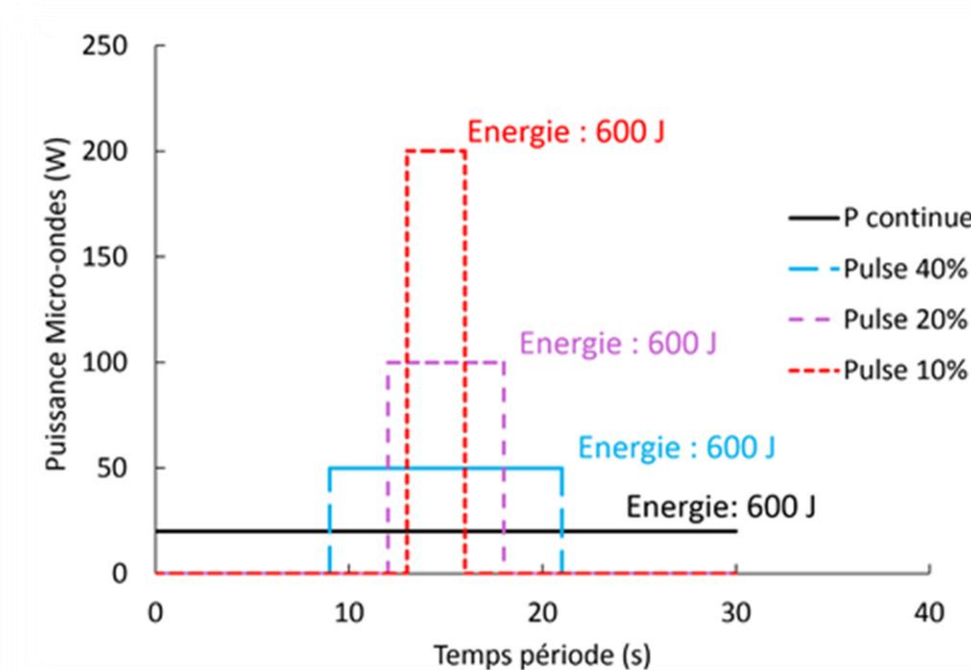


Répartition de la température dans un gel de tylose en fonction de la profondeur après 14 s traitement micro-ondes

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

Stratégie :

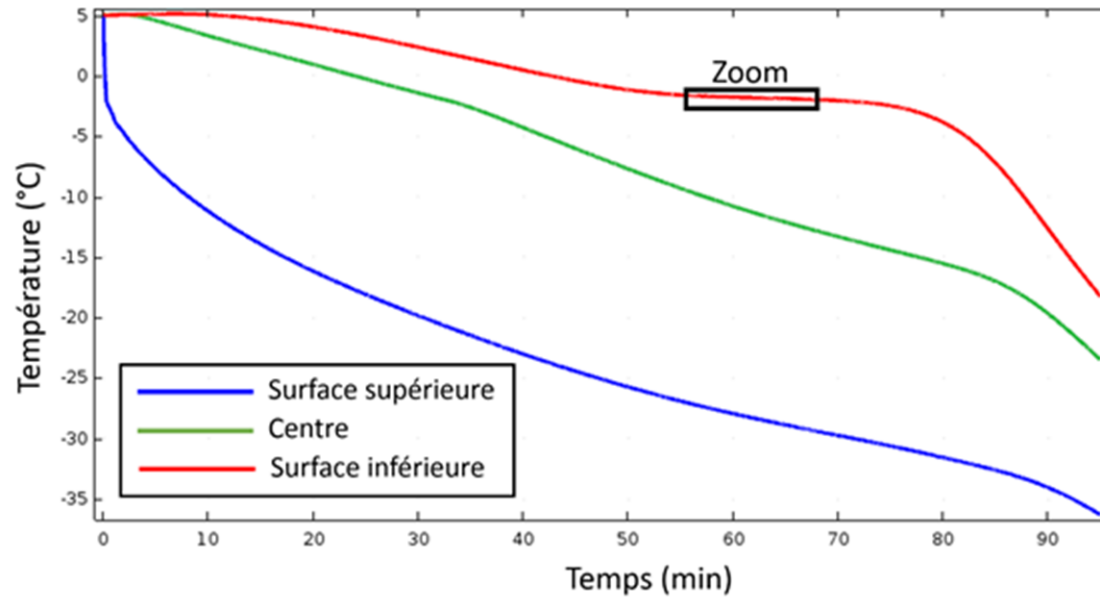
Puissance moyenne constante, Duty ratio différents :



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

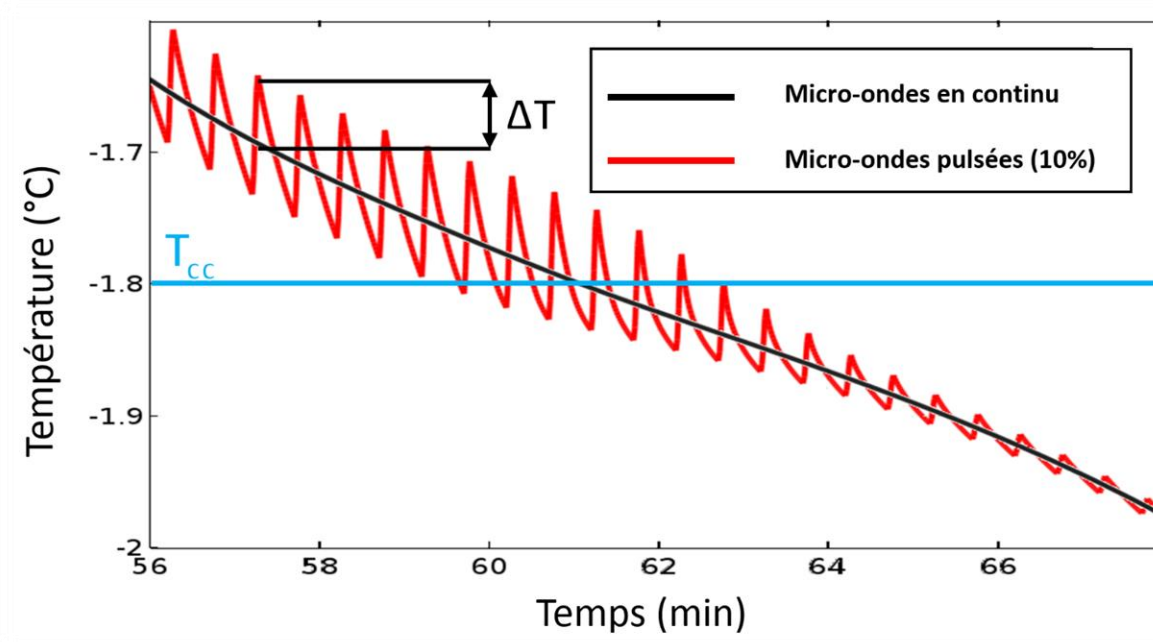
Puissance micro-ondes pour un apport en continu et pulsé à 10%, 20% et 40% d'une période de 30 s.

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

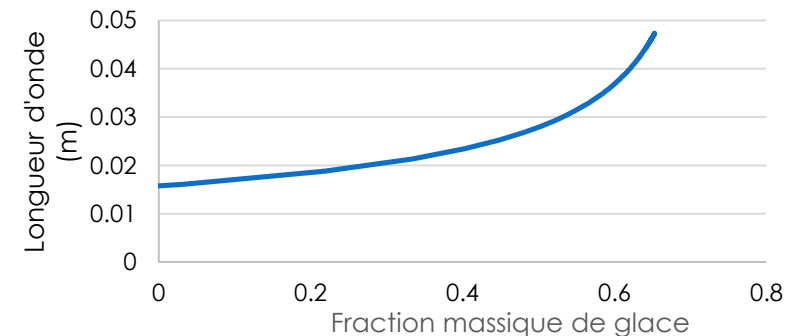
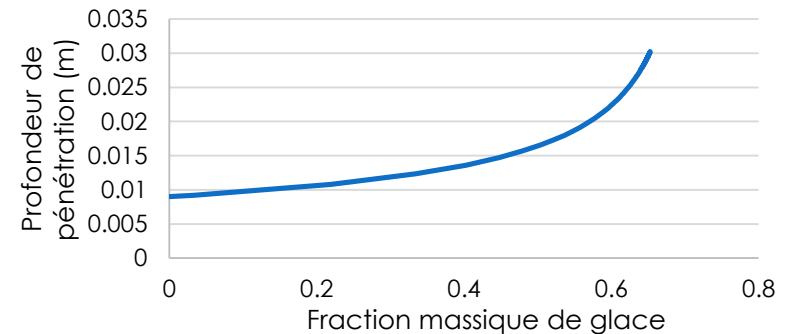
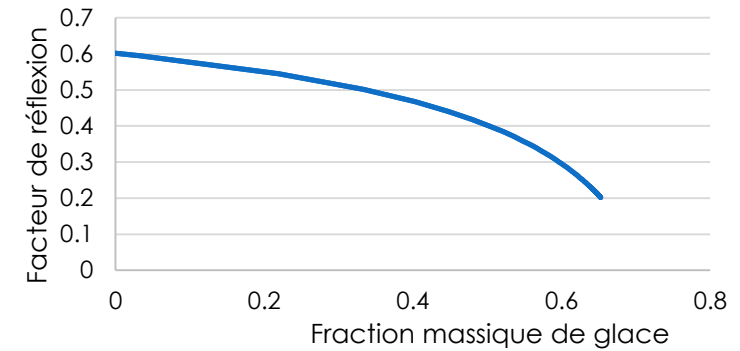
$$FR \approx \left(\frac{\sqrt{\epsilon_r'} - 1}{\sqrt{\epsilon_r' + 1}} \right)^2$$

- ❖ Augmentation de la profondeur de pénétration des microondes

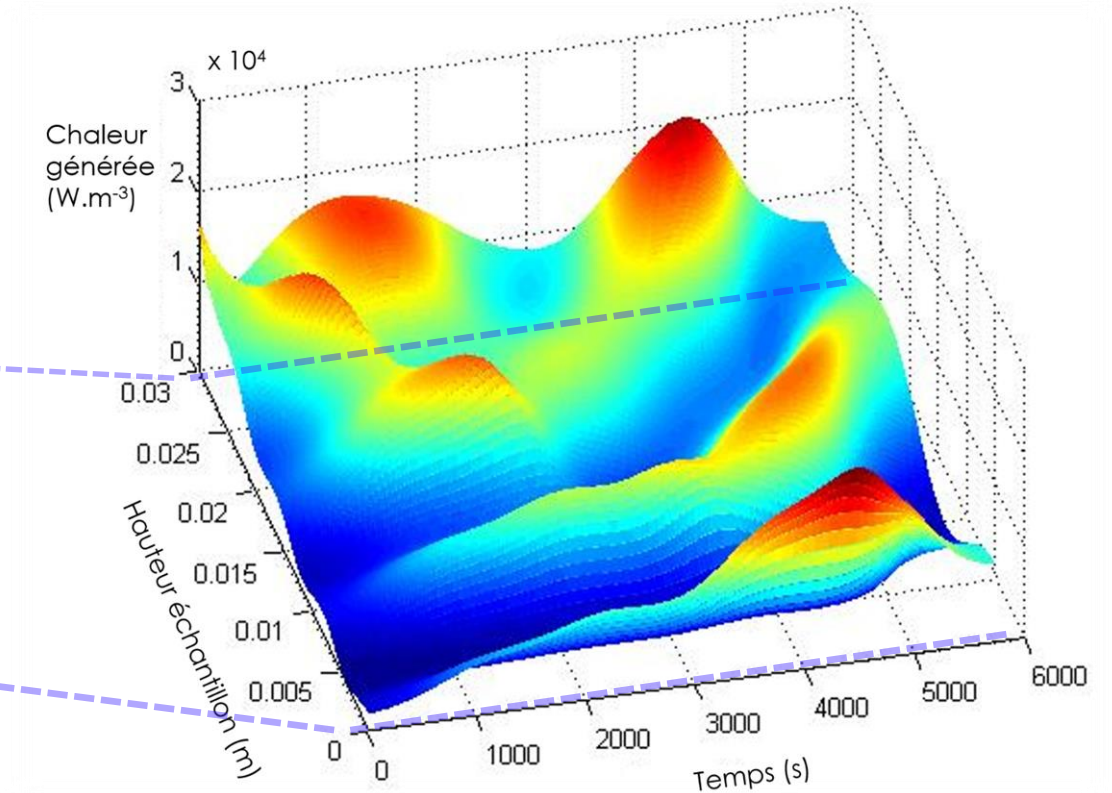
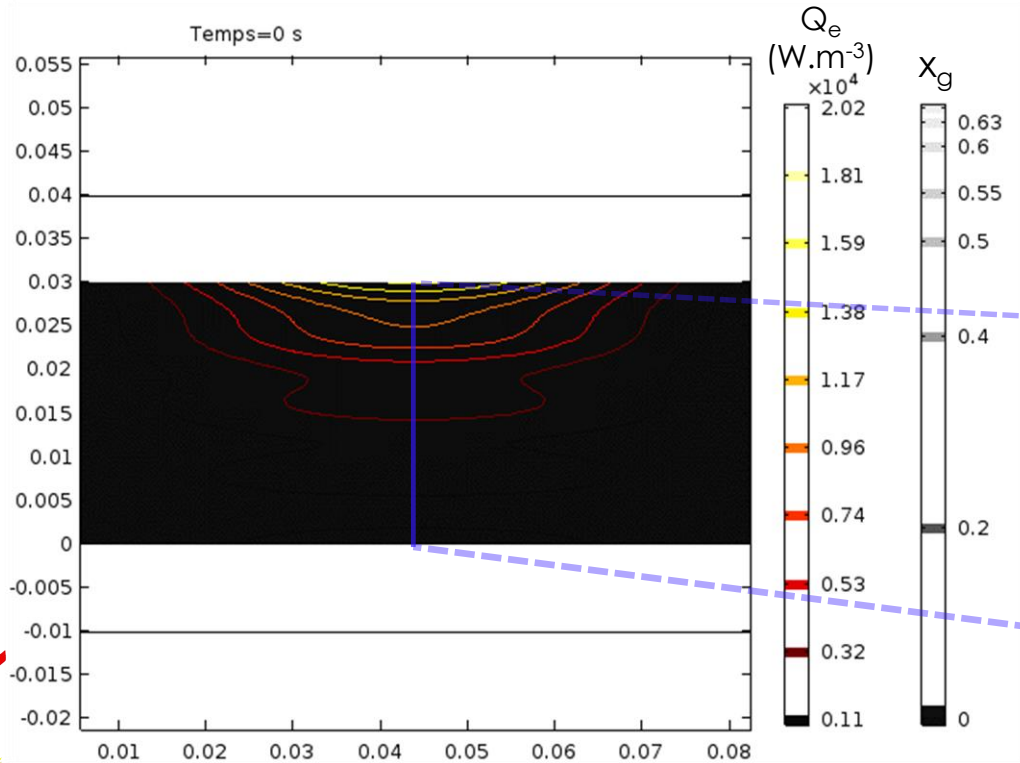
$$d_p = \frac{c_0}{2\sqrt{2}\pi f \sqrt{\epsilon_r'(\sqrt{1+\tan^2 \delta}-1)}}$$

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

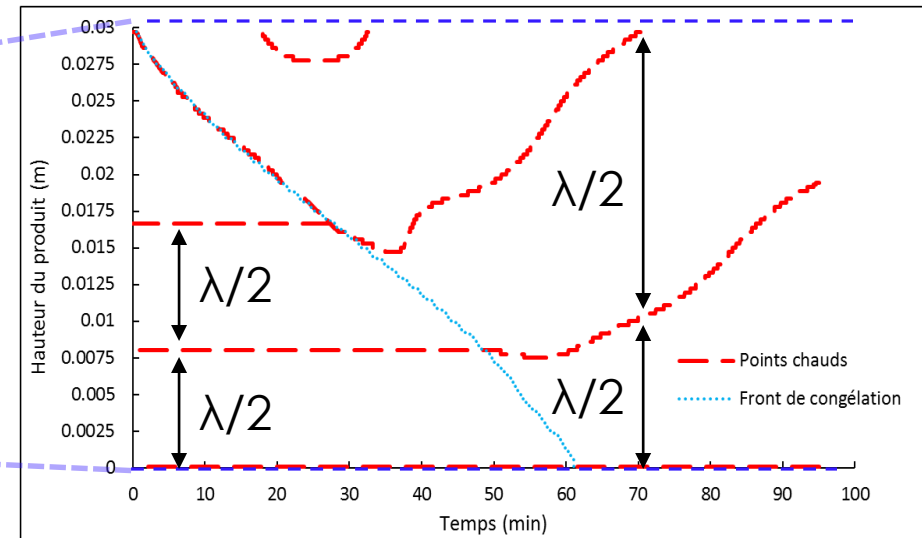
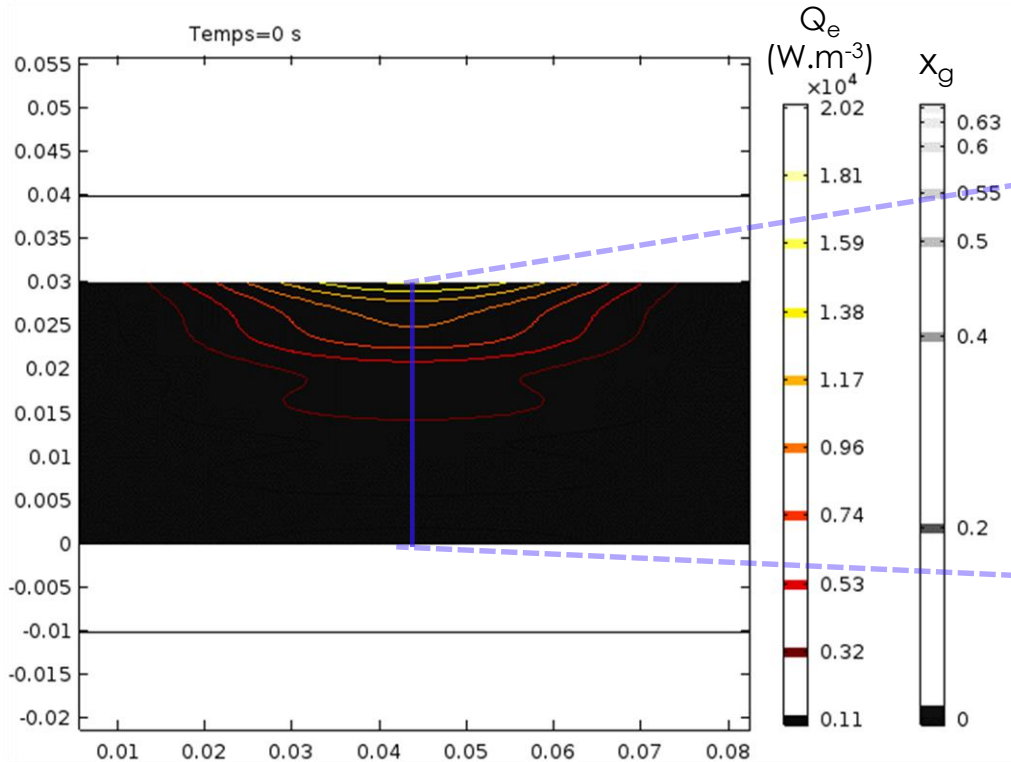
$$\lambda = \frac{c_0 \sqrt{2}}{f \sqrt{\epsilon_r'(1+\sqrt{1+\tan^2 \delta})}}$$



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



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





Partie expérimentale

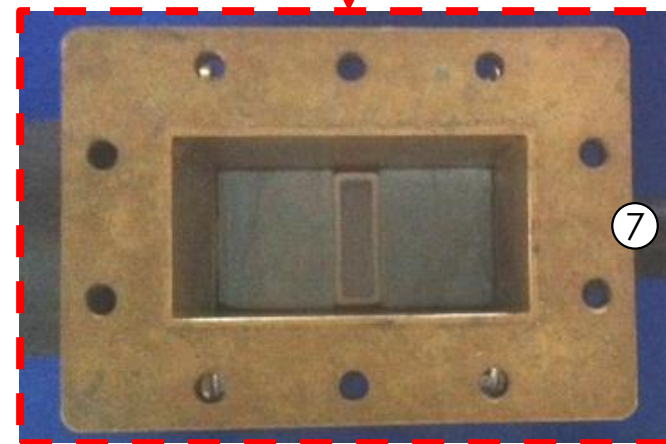
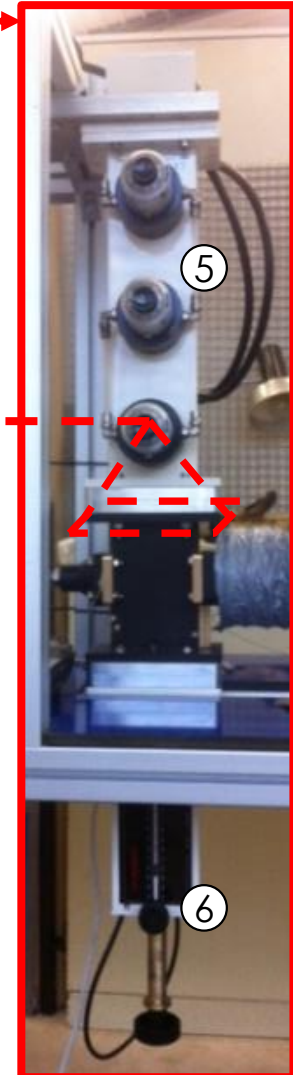
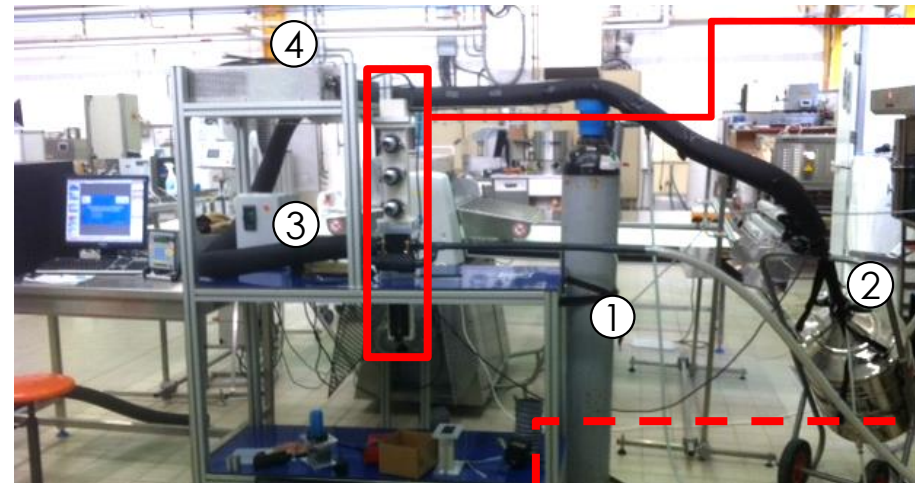
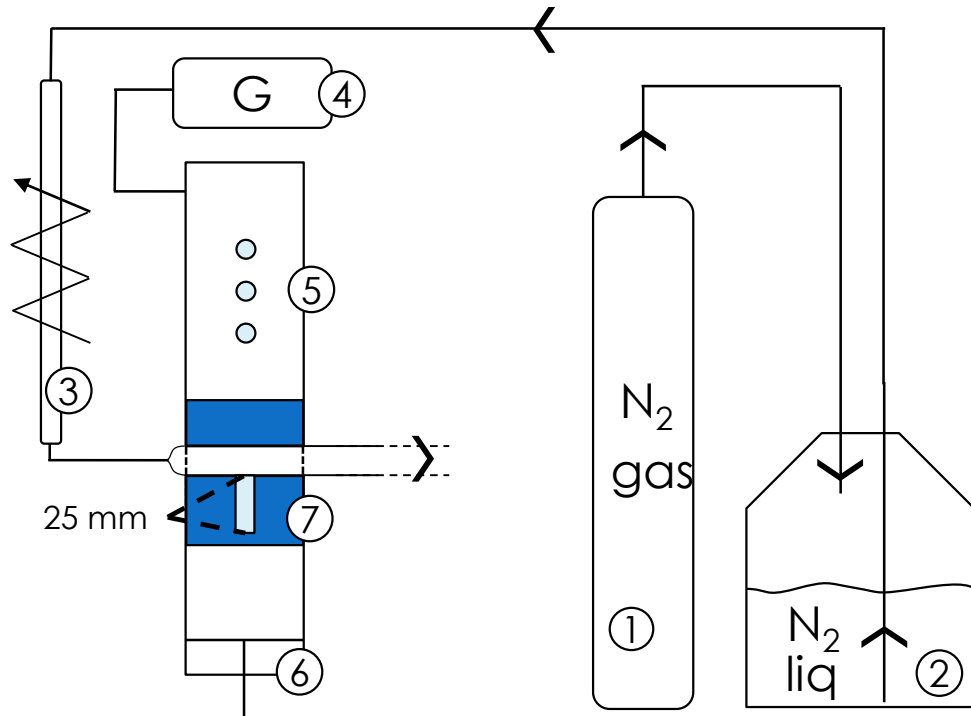
Détermination des propriétés de la tylose:

- › Capacité calorifique et fraction d'eau libre : μ 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

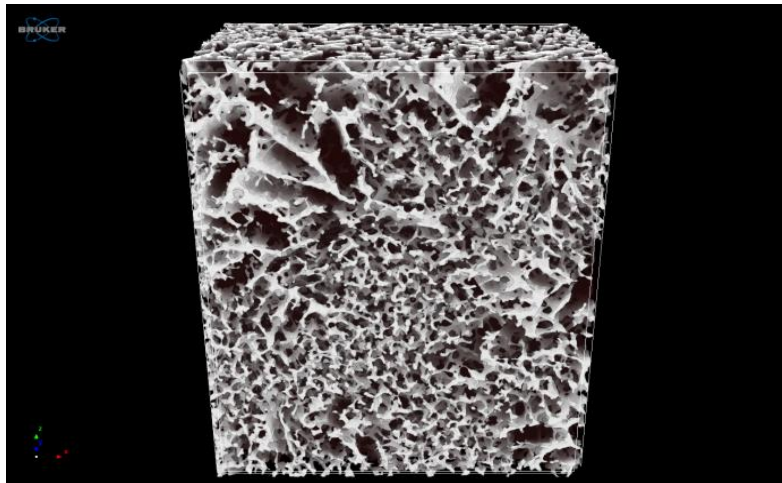
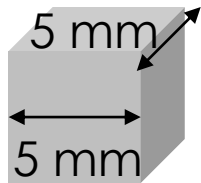
Propriétés mesurées:

	Congelé	Décongelé
Cp [J/(kg.K)]	2321 ± 5%	3816 ± 1%
Ls [J/kg]	243626 ± 32	
x_fw [kg/kg]	(73,38 ± 0,01) %	
λ [W/(m.K)]	1,72 ± 5%	0,54 ± 5%
ρ [kg/m³]	961.9	1040.2
ϵ'	6	50.5
ϵ''	1.5	20.7

Partie expérimentale



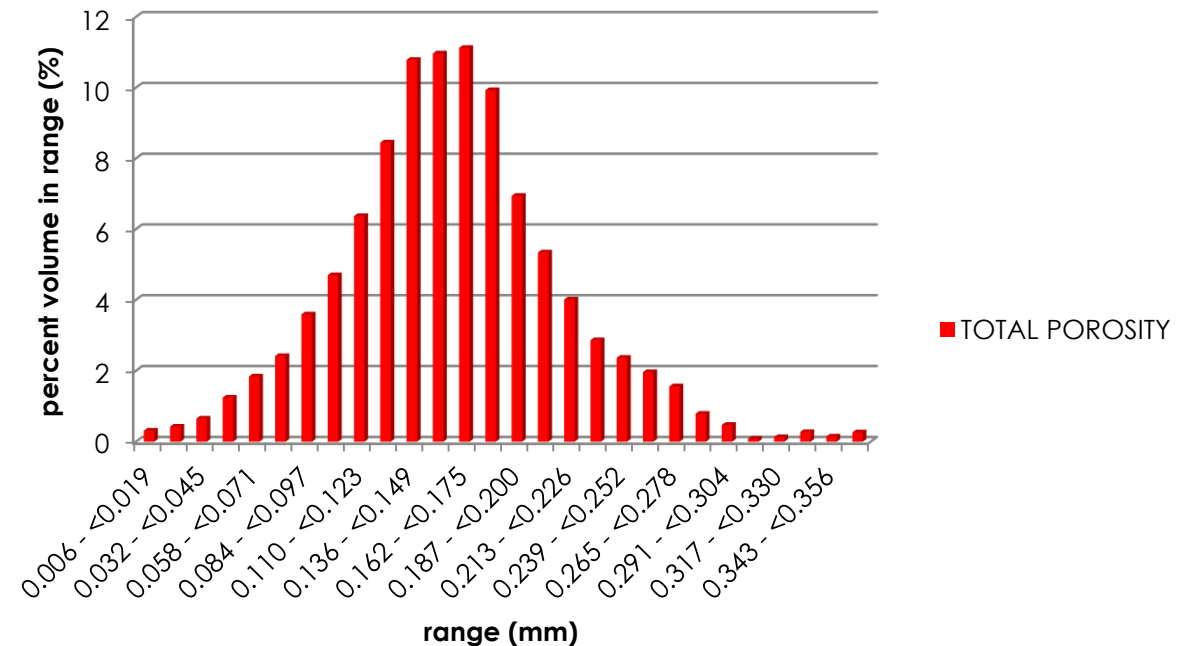
Etude de la porosité par tomographie sur un échantillon de tylose congelé puis lyophilisé



Paramètres:

taille de voxel : 7,5 μm
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**