



*Modélisation des transferts ~~et des réactions~~ dans les procédés de traitement des produits carnés et lien avec leurs qualités*

P.S. Mirade, J. Sicard, S. Portanguen, J.D. Daudin,  
et A. Kondjoyan  
INRA, UR370 QuaPA, 63122 St-Genès-Champanelle



*Journée SFT « Thermique et Agro-Alimentaire/Agro-Ressources », Paris, 04 Nov.*



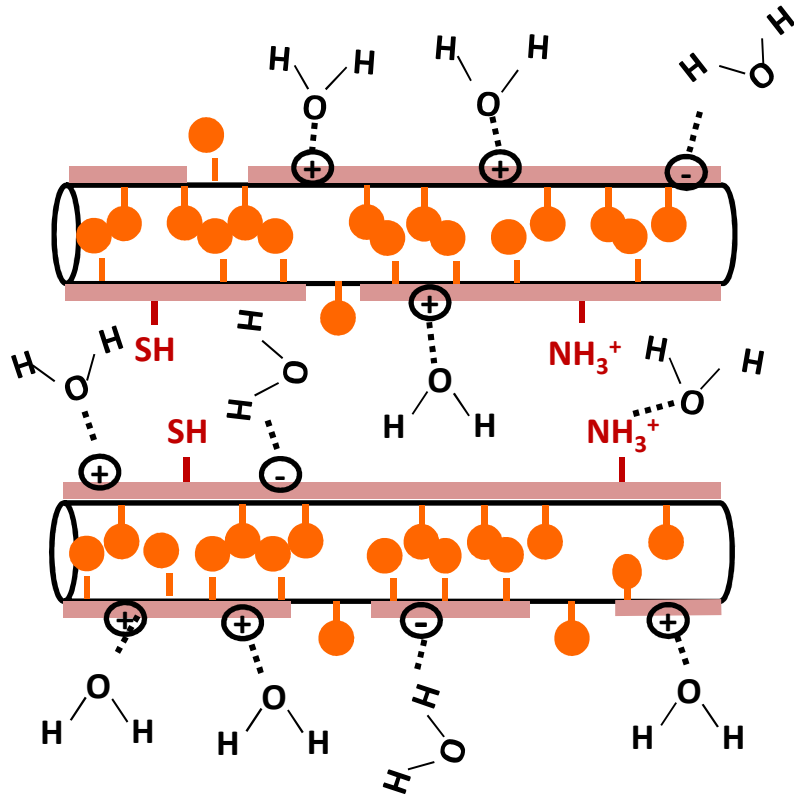
*Première partie :*

*Cuisson des viandes*

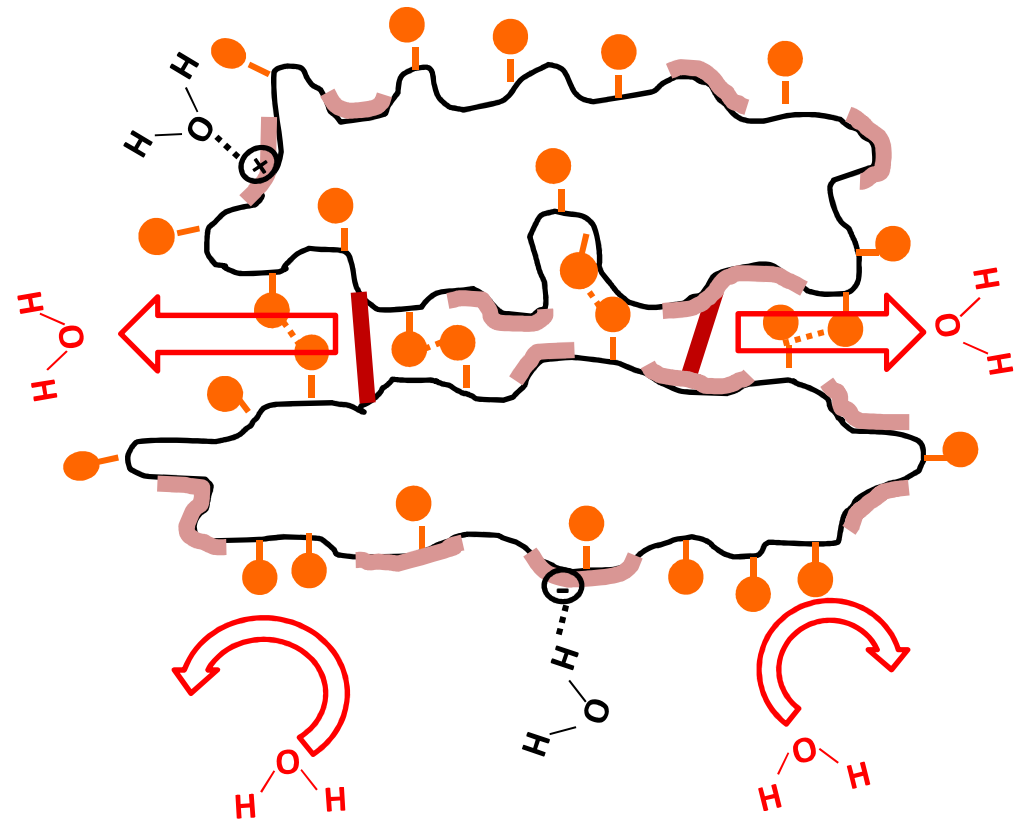
*Migration de jus dans le morceau en cours de cuisson  
Phénomène de surface : formation d'une croûte*

# Déliciation de l'eau = Phénomène rapide

Etat natif

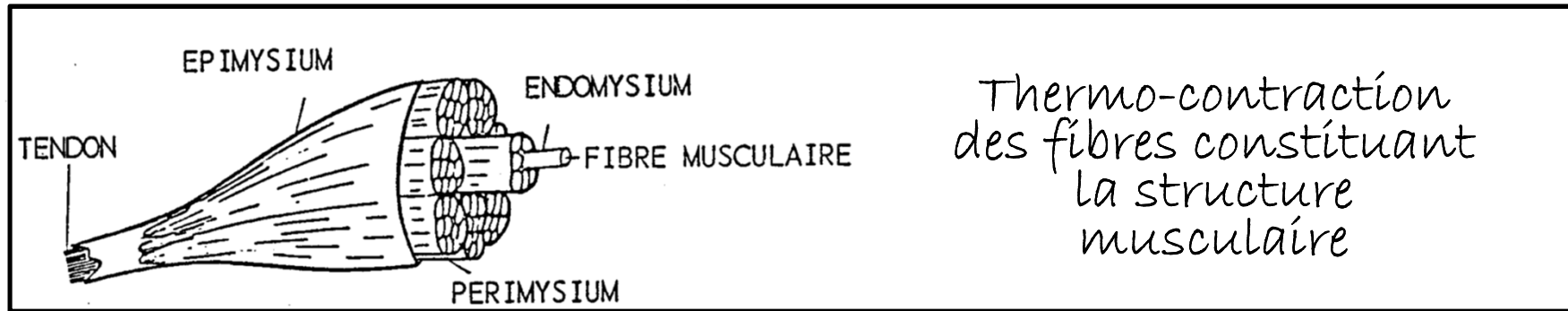


Après traitement thermique



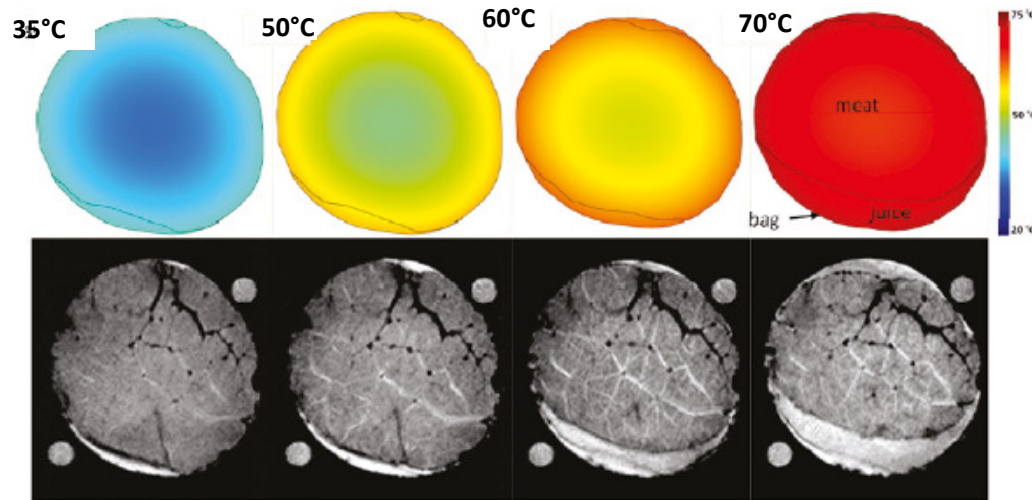
- Surface hydrophile
- Acide aminé hydrophobe
- Liaison covalente
- ⋯ Liaison hydrophobe

# Migration de jus sous pression

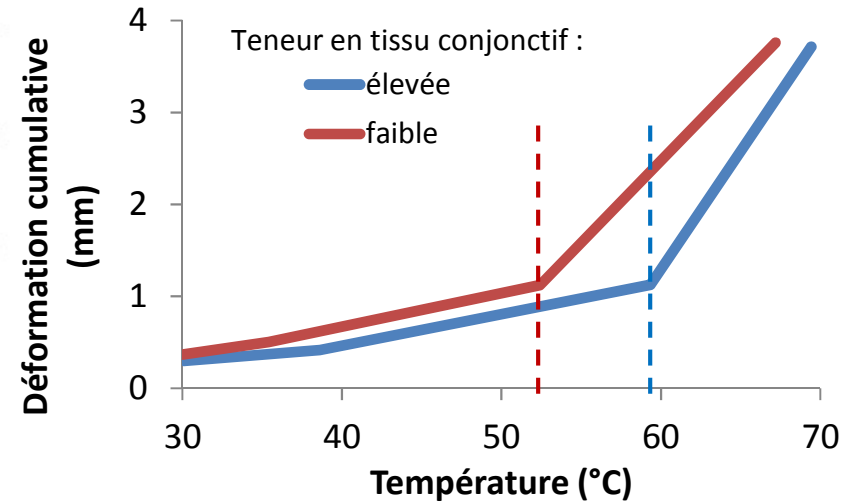


Thermo-contraction  
des fibres constituant  
la structure  
musculaire

Contraction d'une pièce de bœuf observée en IRM



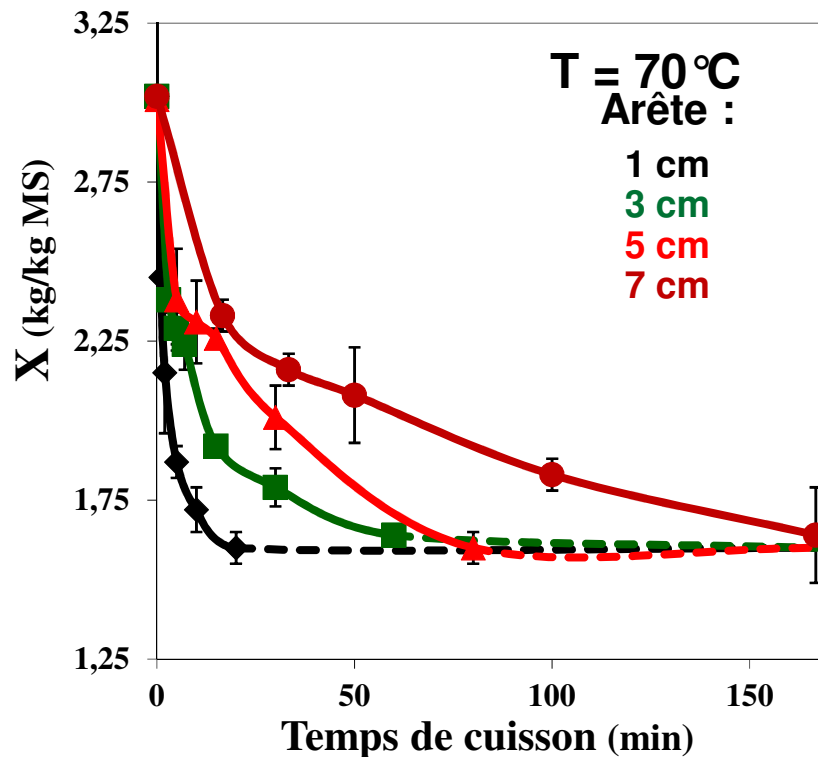
Effet de la température sur la déformation



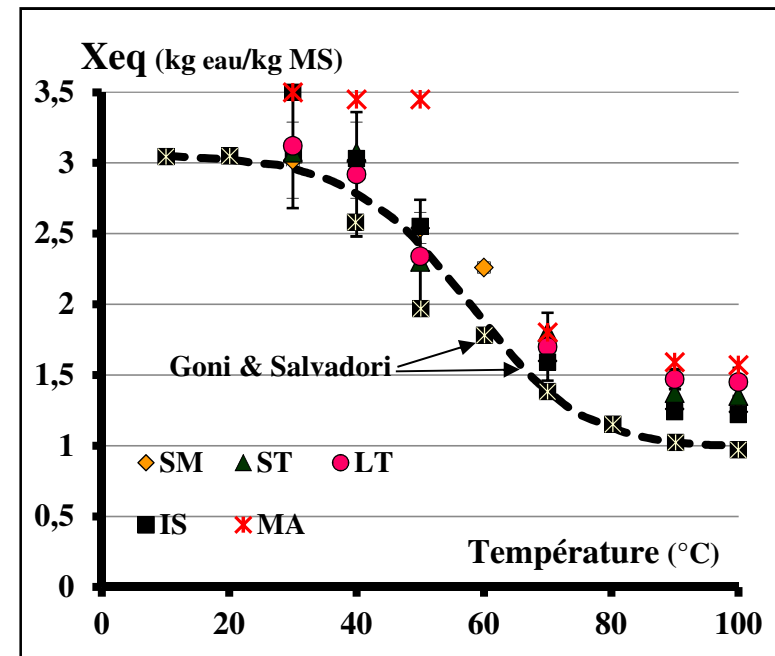
Phénomènes beaucoup plus lents que la déliaison

# Etat d'équilibre à l'issue d'une cuisson longue

Concentration en eau/Taille cubes



Equilibre concentration en eau / T

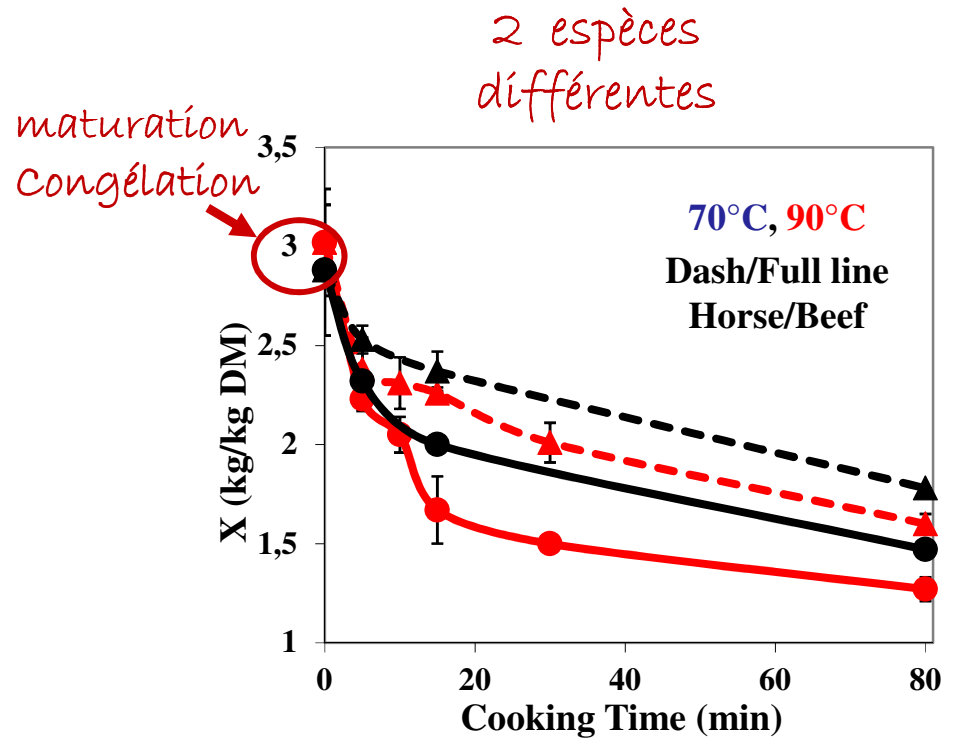


*OILLIC et al. Meat Science, 88(3), 338-346 (2011)*

*BOMBRUN et al. Meat Science, 99, 113-122 (2015)*

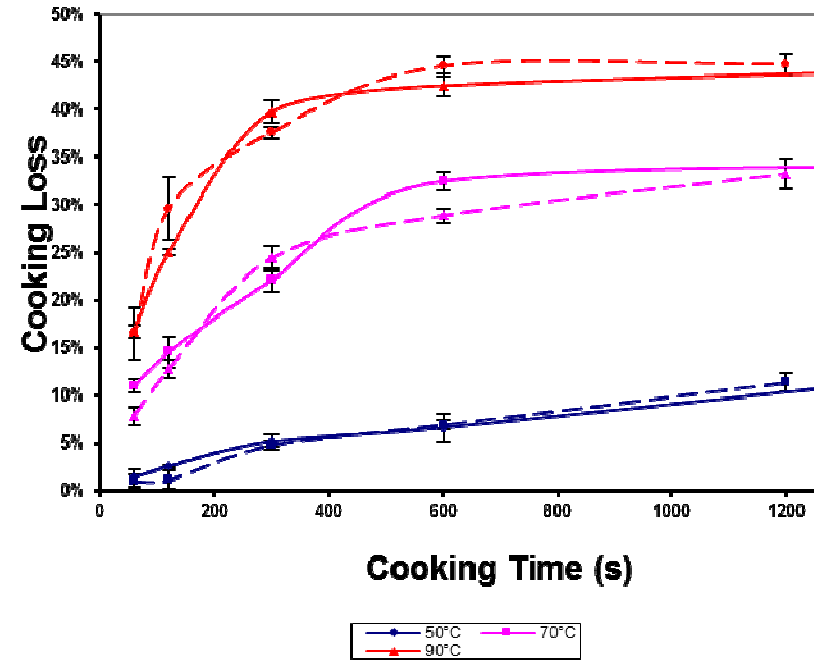
La valeur de la concentration en eau à l'équilibre dépend de la température et non de la taille du morceau (pour tous les muscles)

# Effets sur la perte de jus de : espèce animale, direction des myofibrilles, maturation, et congélation



OILLIC et al. Meat Science, 88(3), 338-346 (2011)

Orientation différente des fibres  
Morceaux de SM de 1x1x7cm



Comportement cinétique similaire pour toutes espèces (bœuf, cheval, porc, agneau, poulet). Maturation & congélation affectent  $X_0$ . Pas d'effet de l'orientation des fibres



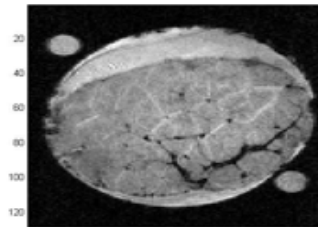
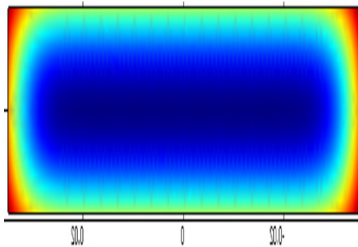
# Modéliser l'effet de la thermo-contraction sur la concentration en eau et la perte de poids

Transfert Chaleur  
3D équations  
classiques de la  
conduction

Transfert par  
migration de jus  
Sous contraintes  
mécaniques

Effets de convection  
interne et de  
déformation négligés

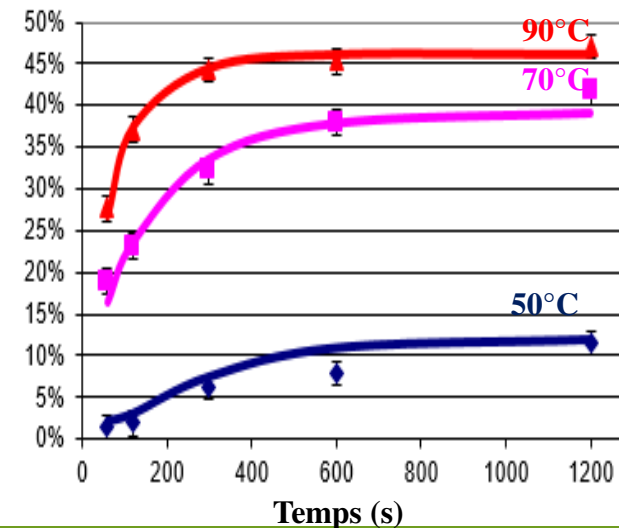
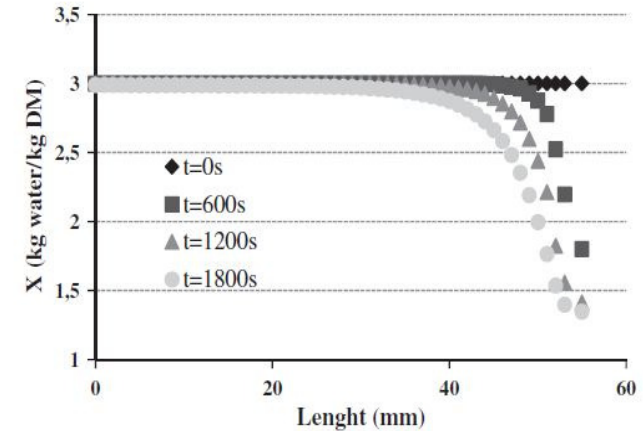
Assimilé à une  
cinétique chimique  
du 1er ordre



profils de  
teneur en eau

Prédictions

Pertes  
de poids



KONDJOYAN et al. *Meat Science*, 95(2), 336–344. (2013)

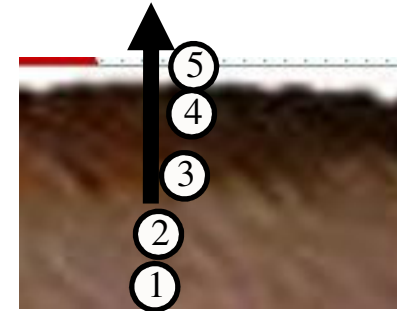
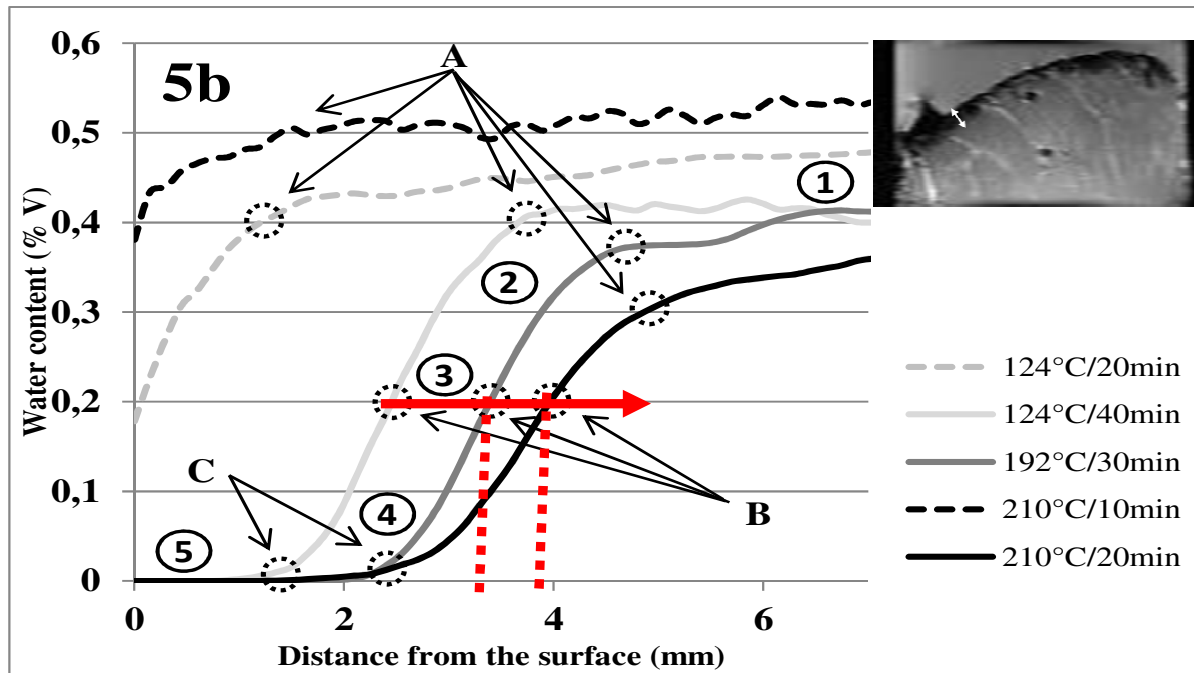
KONDJOYAN et al. *Meat Science*, 97(3), 323–331 (2014)

BOMBRUN et al. *Meat Science*, 99, 113–122 (2015)

# Phénomènes de surface -

## Profils de teneur en eau et structure de la croûte

### Profils IRM



1. Zone à dominante liquide
2. Zone liquide/vapeur
3. Front d'Evaporation/ébullition
4. Fin de la formation de vapeur
5. Zone sèche

PORTANGUEN et al. *Food and Bioprocess Technology*, 7, 3308-3318 (2014)

Forme sigmoïde des profils pour les hautes températures.  
Le front d'ébullition pénètre de plus en plus profondément dans la viande



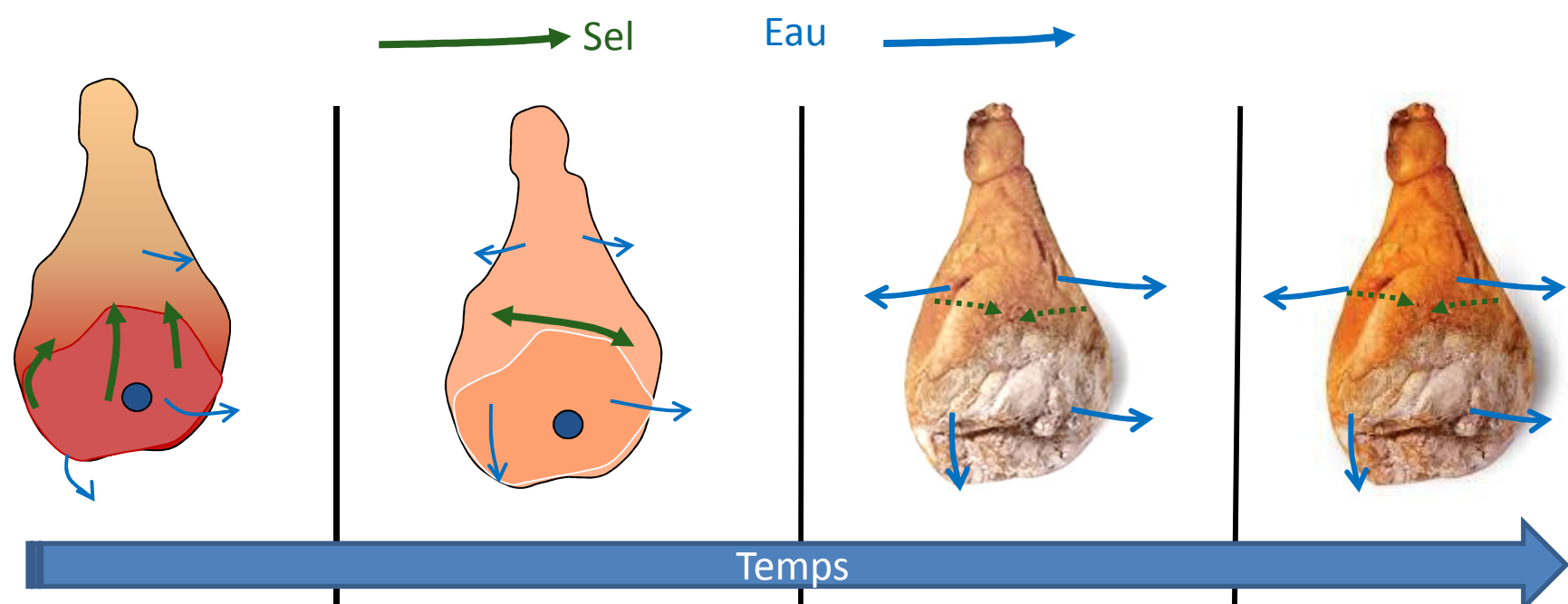


Nuo Deng, Chine

*Seconde partie :*

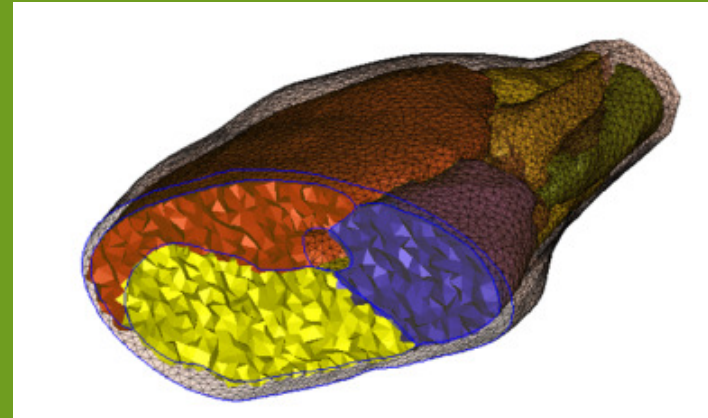
*Fabrication d'un jambon sec*

# TCM lors de la fabrication du jambon sec



Temps <span style="color: blue;">→</span>			
<p>✓ <b>Salage</b>                      T basse                      8 – 15 jours                      Transfert sel ++                      Transfert eau -                      ✓ <b>Q sel entrant</b></p>	<p>✓ <b>Repos</b>                      T basse                      Plusieurs semaines                      Transfert sel ++                      Transfert eau +                      ✓ <b>Homogénéité du sel ?</b></p>	<p>✓ <b>Etuvage</b>                      T haute                      1-2 semaines                      Transfert sel -                      Transfert eau ++                      ✓ <b>'Maturation'</b></p>	<p>✓ <b>Séchage</b>                      T intermédiaire                      Plusieurs mois                      Transfert sel -                      Transfert eau ++                      ✓ <b>Réduction <math>a_w</math></b></p>

## Modèle 3D de « jambon numérique »



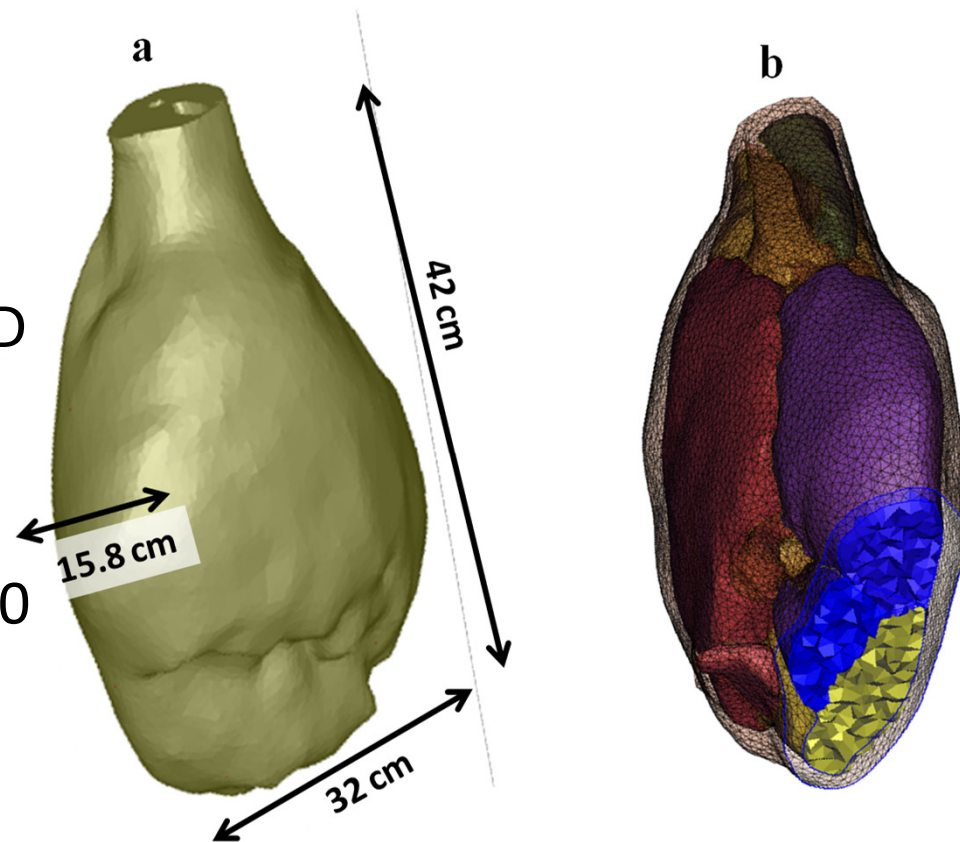
Objectif : Construire un modèle permettant de calculer la distribution du sel et de l'eau, ainsi que l'évolution de la protéolyse, tout au long de la fabrication d'un jambon sec :

I - Partie expérimentale : étude de la protéolyse et développement de lois phénoménologiques :  $IP = f(X_{\text{eau}}, X_{\text{sel}}, T, \text{muscle})$

II – Partie numérique : le modèle de « Jambon numérique »

# Géométrie et maillage d'un jambon

- ✓ Une tâche complexe réalisée à partir d'une série de 181 images de tomographie X (fournies par l'IFIP) et correspondant à des coupes 2D d'un jambon frais et de l'utilisation de Mimics®.
- ✓ Modèle 3D de jambon : 202000 mailles, 5 groupes de muscles différents, importation dans Comsol® Multiphysics
- ✓ La géométrie 3D de jambon construite est vraiment réaliste



# Principales conditions limites : transferts eau/sel

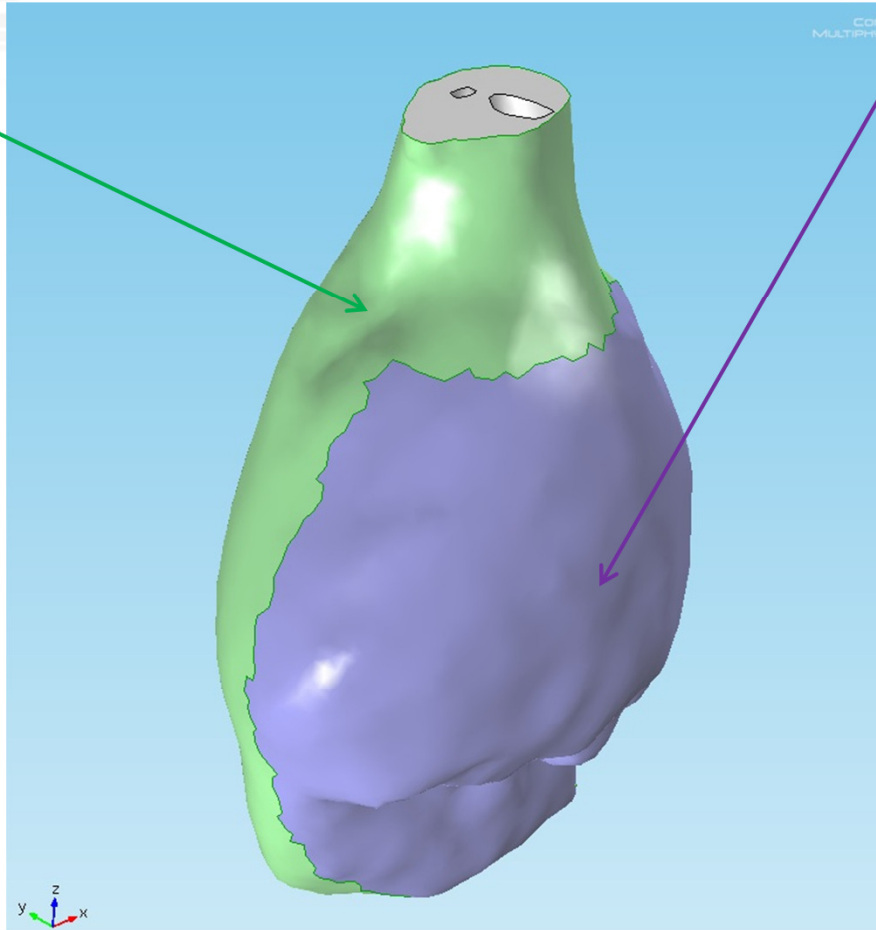
## Conditions limites : salage par apport limité

### Côté « Couenne

+ gras » :

- **Pas de sel**

- **Flux d'eau**  
réduit du fait de  
l'épaisseur de  
gras



### Côté « Muscle » :

**Le flux d'eau évaporé** est calculé à partir d'un **bilan d'eau à la surface**.

**Salage en surface** : saumure avec  $m_{\text{sel}}$  variable et  $V_{\text{eau}}$  constant.

**Salage** : à chaque pas de temps, la masse de sel qui a pénétré dans le jambon est calculée à partir d'une **relation d'équilibre d' $a_w$**  entre la saumure et la 1<sup>ère</sup> couche de viande salée (protéines + eau + sel).

**Transfert d'eau (diffusif, loi de Fick) :  $D_{\text{eau}} = f(X_{\text{eau}})$ , dans la trame  $D_{\text{eau}} = 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$**   
**Transfert de sel (diffusif, loi de Fick) :  $D_{\text{sel}} = 5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ , dans la trame  $D_{\text{sel}}/5$**



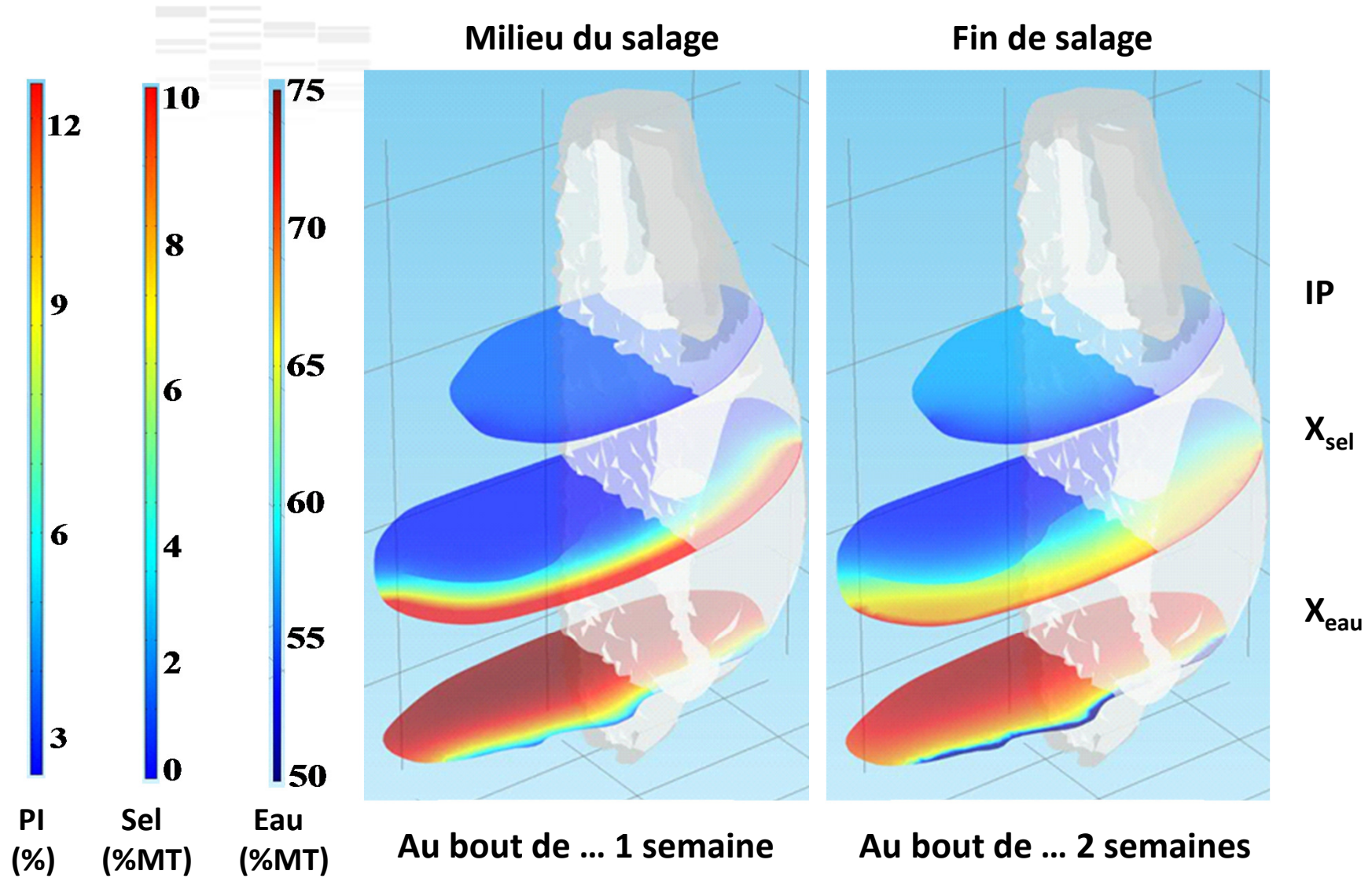
# Sorties du modèle de « jambon numérique »

Après résolution des équations et environ 3,5 h de calcul sur un PC Xeon 3GHz doté de 8-coeurs et de 48 Mo de RAM, il est possible de visualiser :

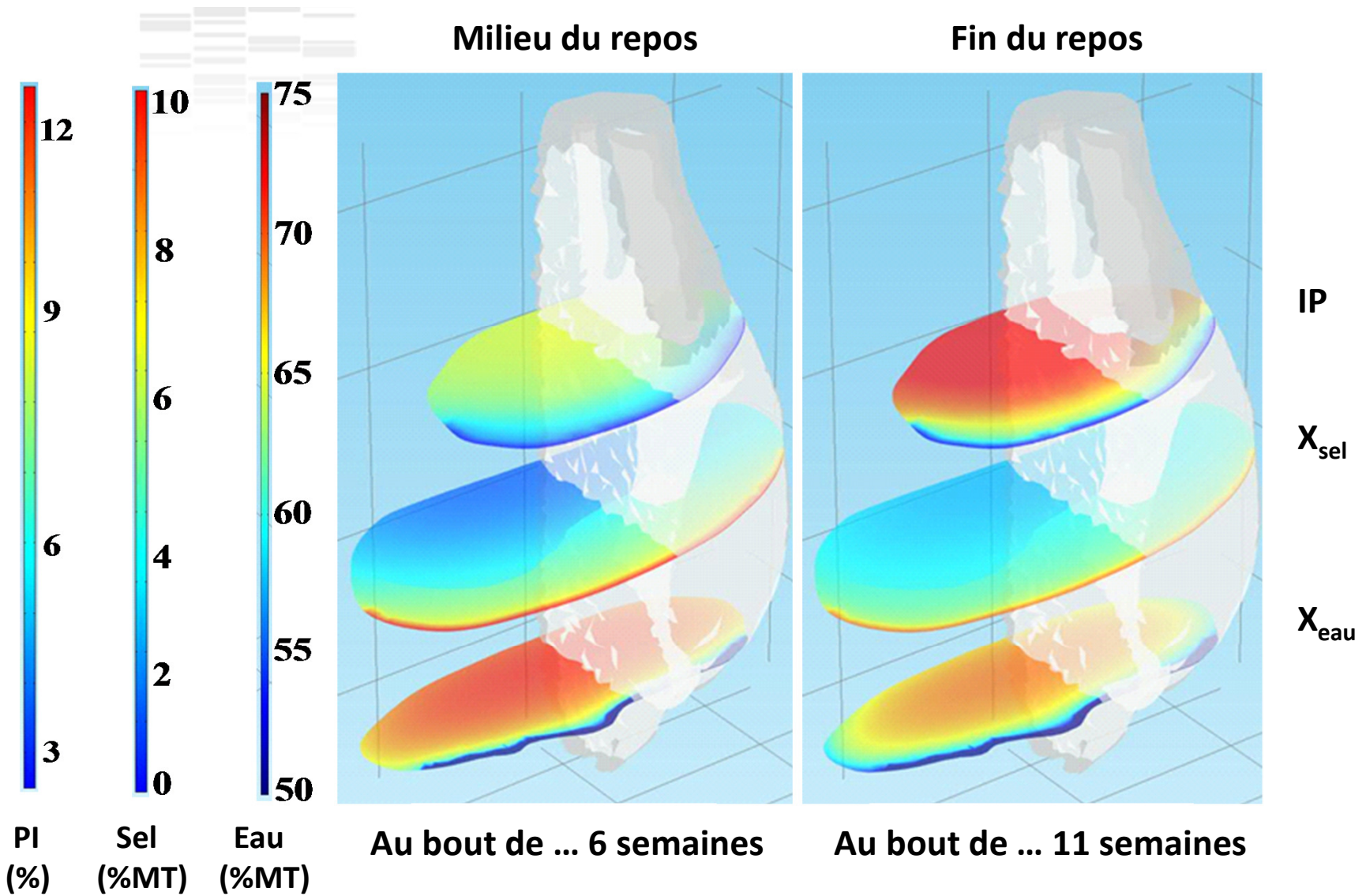
- ◇ **Distributions calculées :  $X_{\text{sel}}$ ,  $X_{\text{eau}}$ , IP**
  - ◇ Exemples pendant les phases de salage et de repos
- ◇ **Profils de teneurs en sel et en eau (effet de la trame grasse interne)**
- ◇ **Teneurs moyennes en sel, eau,  $a_w$ , IP par groupe de muscles**
- ◇ **Cinétique de pertes de poids (non présentée)**



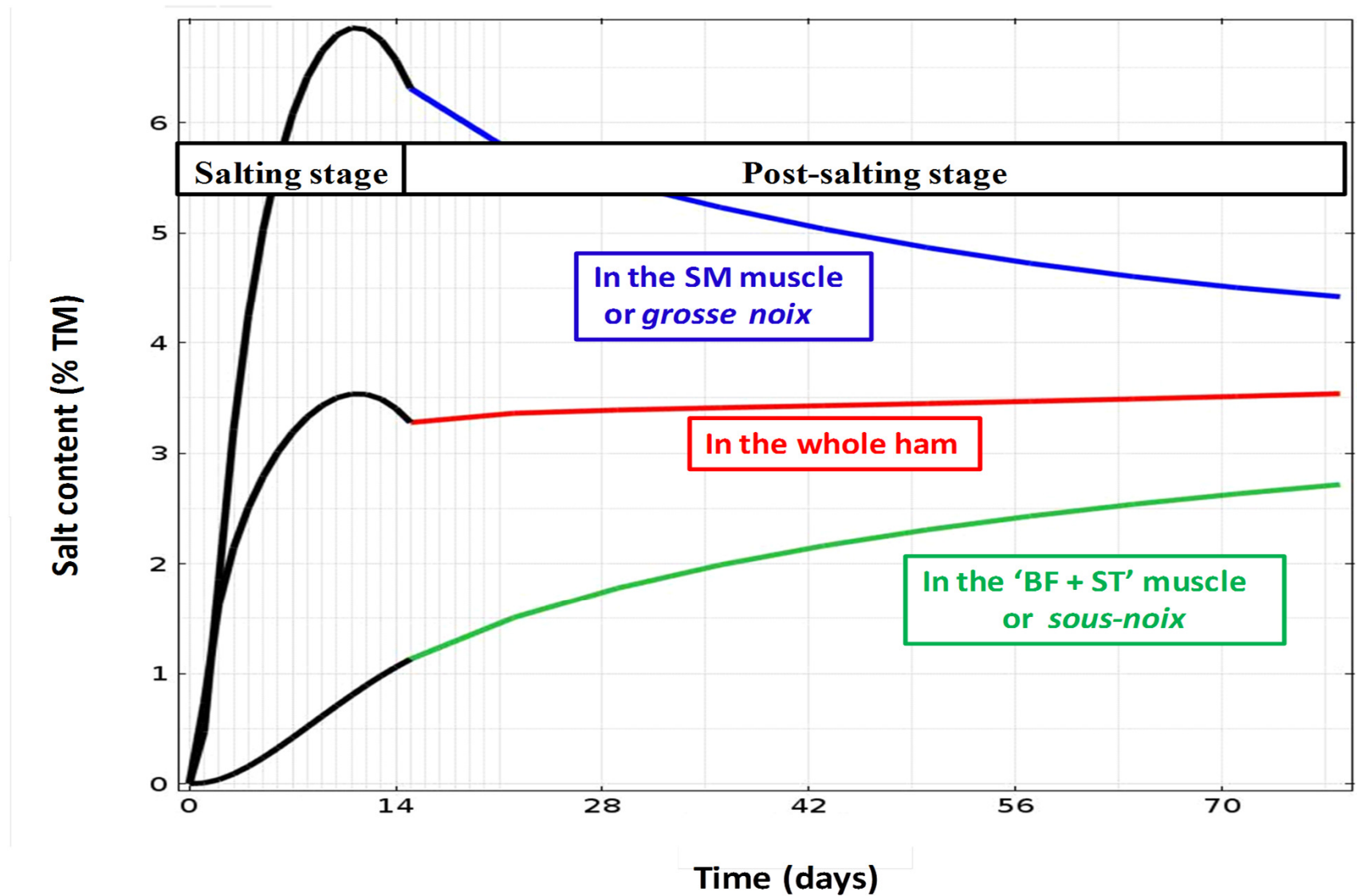
# Distributions des teneurs en eau, en sel et de l'IP



# Distributions des teneurs en eau, en sel et de l'IP

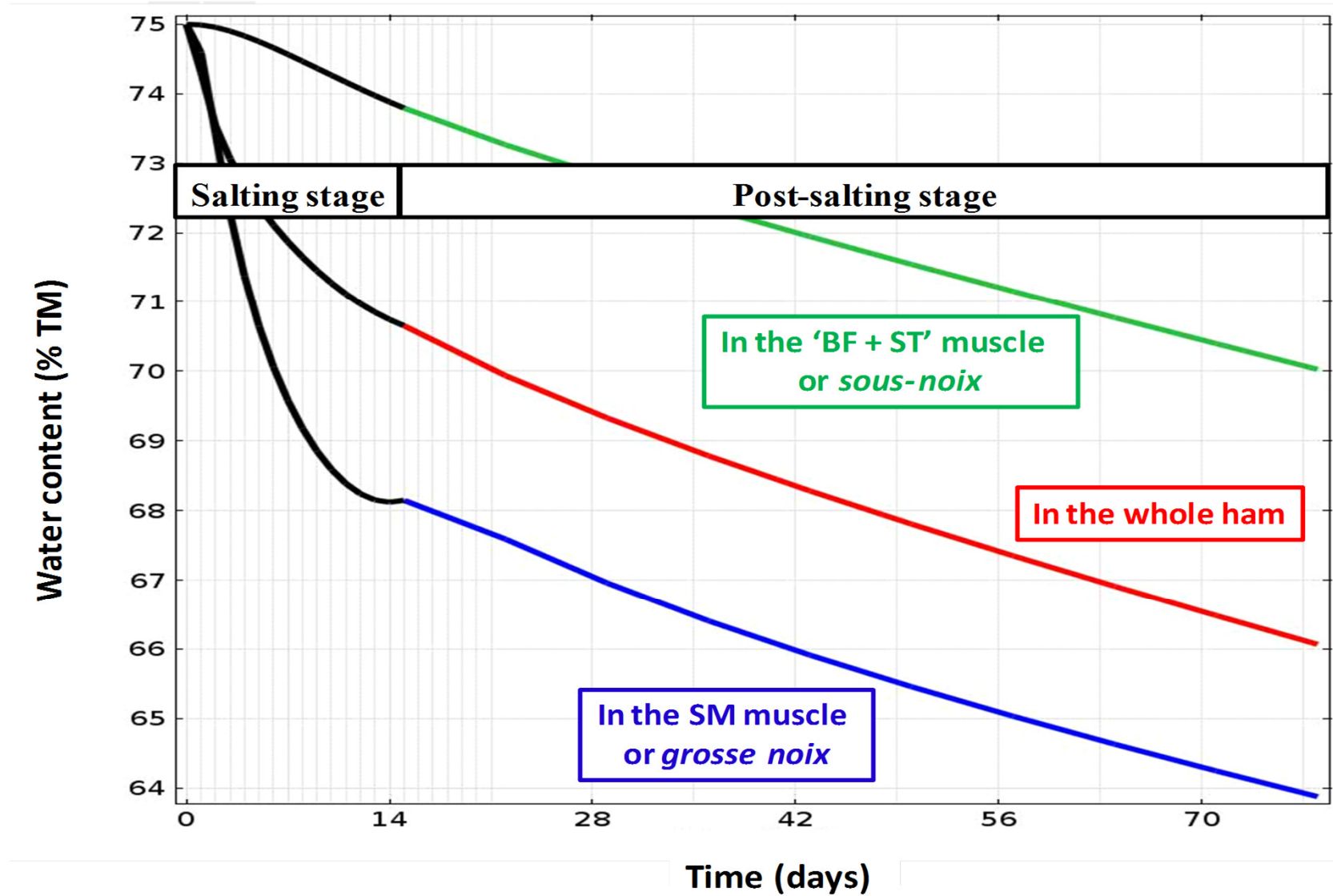


# Teneurs moyennes en sel par groupe de muscles

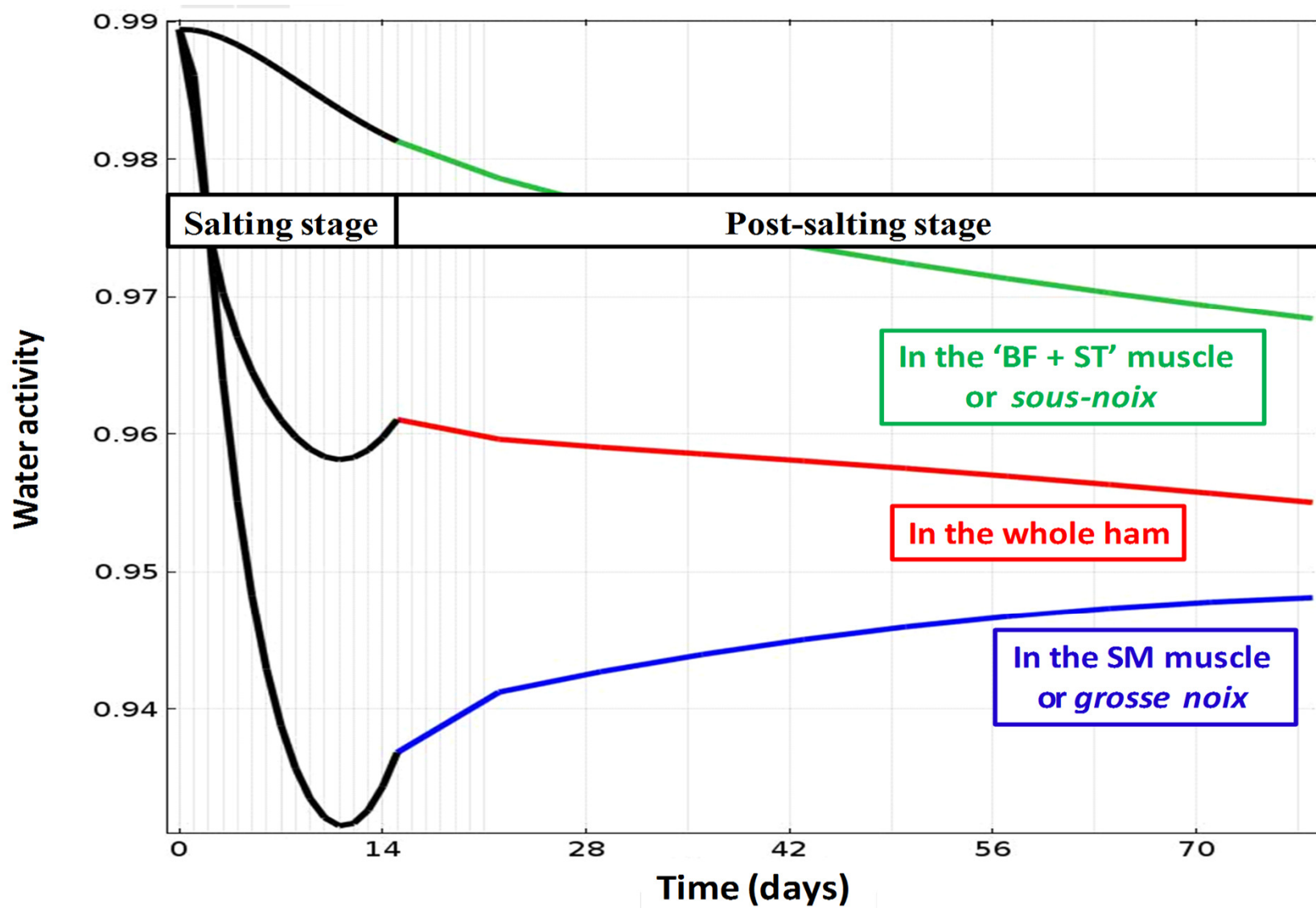




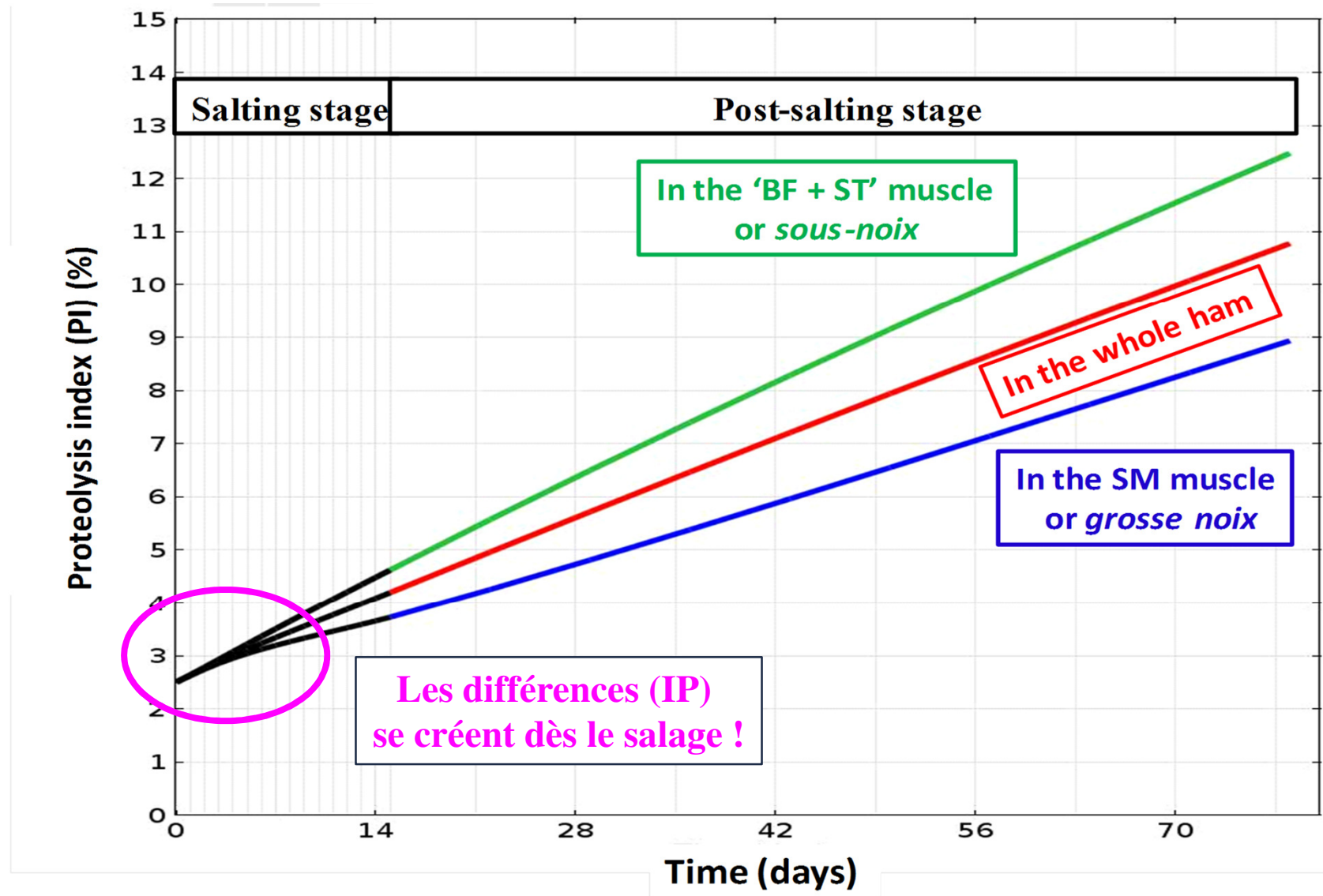
# Teneurs moyennes en eau par groupe de muscles



# Valeurs moyennes d' $a_w$ par groupe de muscles



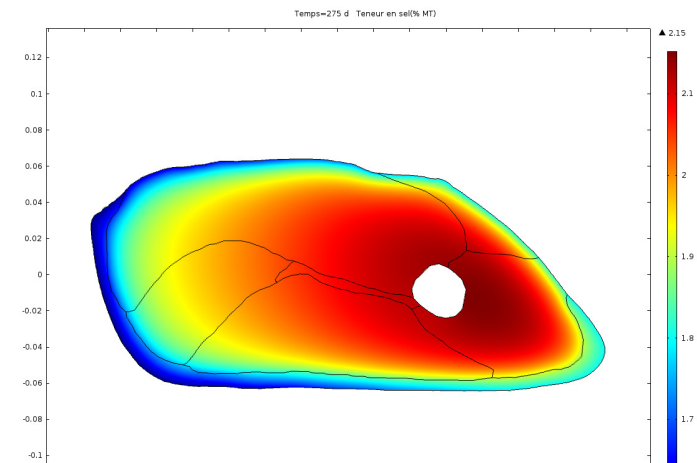
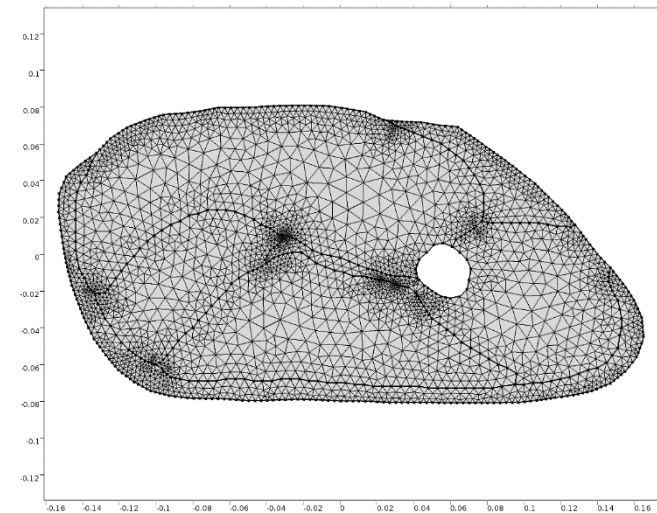
# Valeurs moyennes d'IP par groupe de muscles





# Perspectives : vers un « jambon num. virtuel »

- ✓ Continuer à développer des modèles 3D en y intégrant de + en + de données expérimentales (étape cruciale du salage)
- ✓ Développer des modèles 2D (calculs beaucoup plus rapides, prise en compte de la déformation)
- ✓ A + long terme : développer des modèles simplifiés/dégradés
- ✓ Aller vers le “virtual processing” et le “virtual food”



$X_{sel}$  au bout de 9 mois avec déformation du maillage en fonction du flux d'eau moyen évaporée