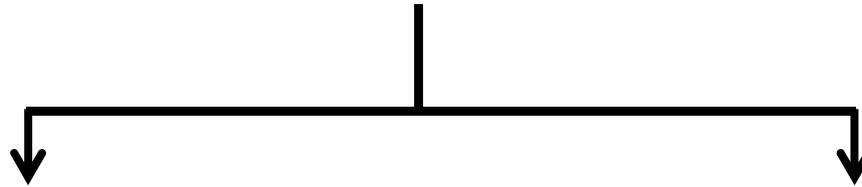




# Modélisation des transferts thermiques dans les équipements frigorifiques: association à la microbiologie prévisionnelle

O. Laguerre (Irstea)  
L. Guillier (ANSES)  
D. Flick (AgroParisTech)

**UR-Génie des procédés frigorifiques**  
**22 permanents (Chercheurs, Ingénieurs et techniciens)**



**Metfri**  
Ecoulements et transferts dans les équipements

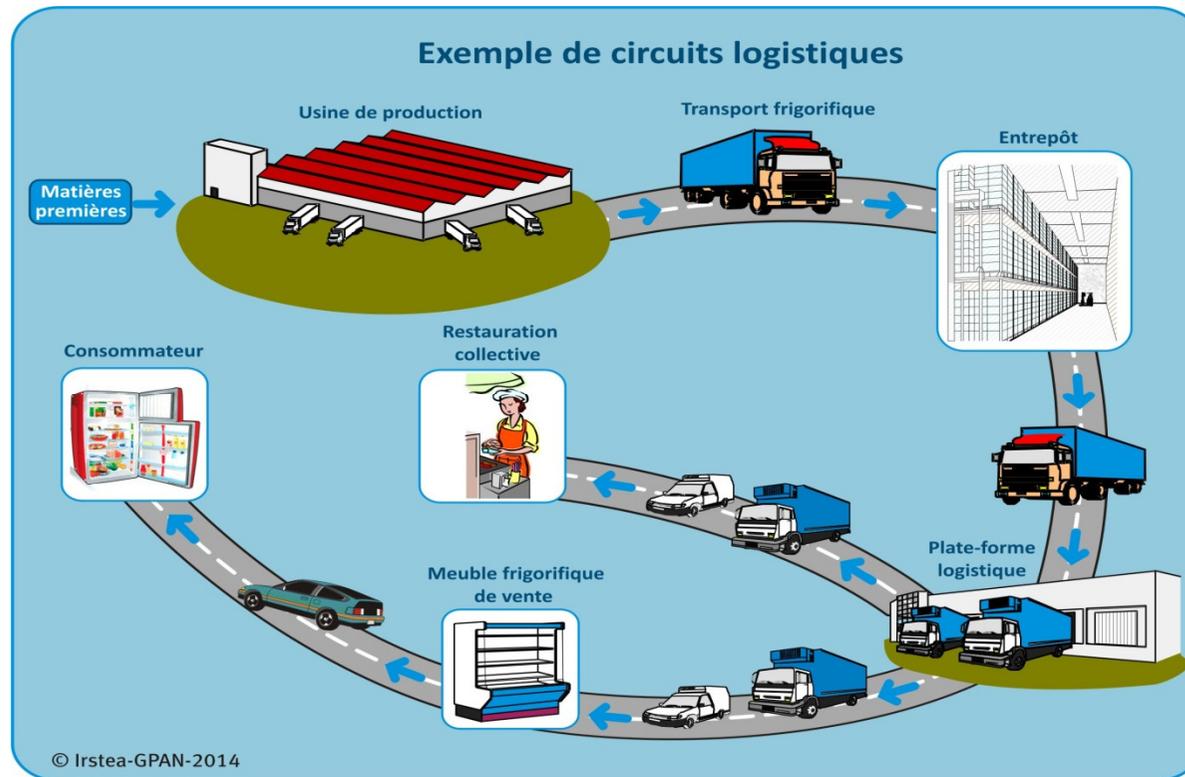
**Enerfri**  
Énergétique des installations

**Axe 1: Chaine du froid**

**Axe 2: Cristallisation/recristallisation**



**Modélisation des transferts thermiques dans les équipements frigorifiques:**  
**association à la microbiologie prévisionnelle**



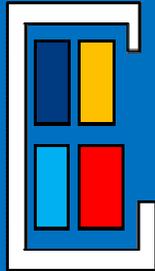
Différents profils de température de produit peuvent être observés dans une chaîne logistique



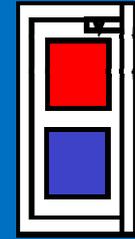
Conséquence sur la qualité de produit

Facteurs influençant l'évolution de température de produits:

- Température initiale de produits entrant dans l'équipement
- Température de réglage de thermostat
- Position des produits dans l'équipement



Meuble frigorifique de vente



Réfrigérateur domestique

- Durée de conservation dans l'équipement
- Température ambiante externe de l'équipement (hiver, été etc.)



Influence sur l'évolution de la charge microbienne (qualité sanitaire)

Démarche générale utilisée pour étudier les écoulements d'air, les transferts de chaleur et de matière (eau) dans un équipement

❖ Numérique: CFD, modèle simplifié

❖ Expérimentale

- en laboratoire pour la compréhension des phénomènes et pour la validation des modèles développés, par exemple, mesure de température (par thermocouple), d'humidité (par hygromètre), de vitesse d'air (par anémomètre, LDV, PIV) et de flux échangé (par fluxmètre convectif et radiatif)
- sur terrain par mesure de température, d'humidité et vitesse (uniquement par anémomètre) dans le but, soit d'avoir des données pour alimenter les modèles (conditions aux limites), soit pour valider les modèles développés.

# Exemple réfrigérateur domestique



Convection: air-produit, air-paroi

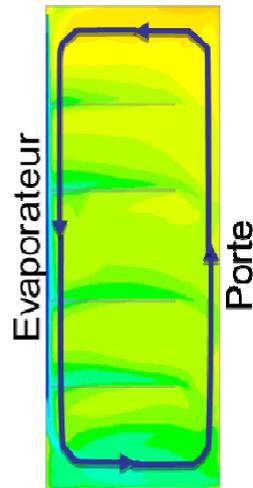
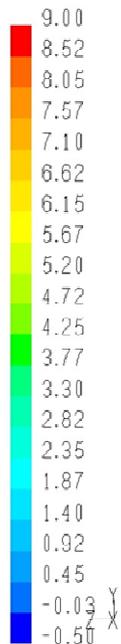
Conduction: produit-produit

Rayonnement: produit-paroi

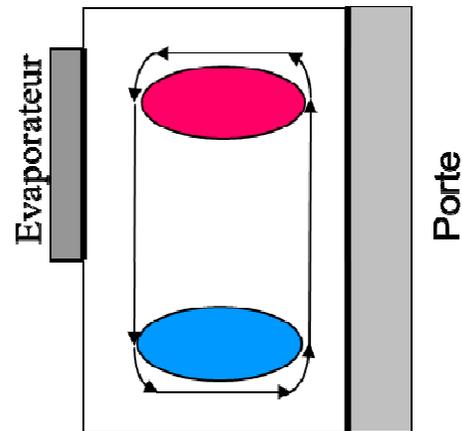
Evaporation et condensation: air-produit et air-paroi

Approche CFD

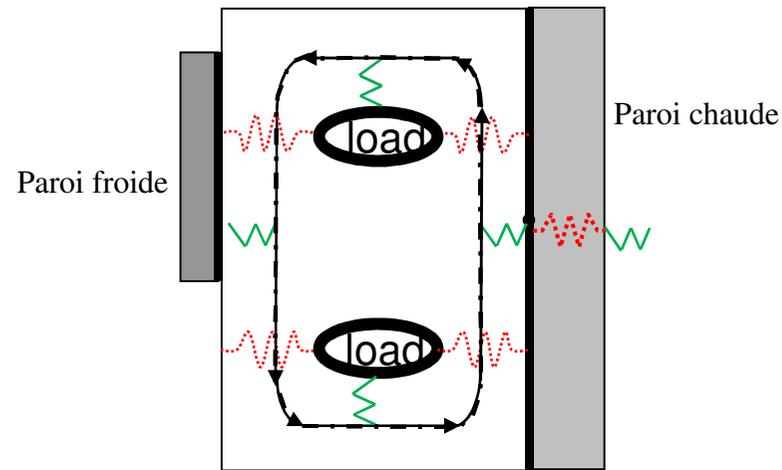
Approche zonale



Simplification



Champ de température



-  conduction dans la paroi
-  convection entre la paroi et l'air
-  convection entre le chargement et l'air
-  radiation entre le chargement et la paroi

## Modélisation déterministe d'un réfrigérateur domestique Régime permanent

### Réfrigérateur à froid statique:

$$T_{load.1} = 0.0723T_{ext} + 0.9277T_{th}$$

$$T_{load.2} = 0.0077T_{ext} + 0.9923T_{th}$$

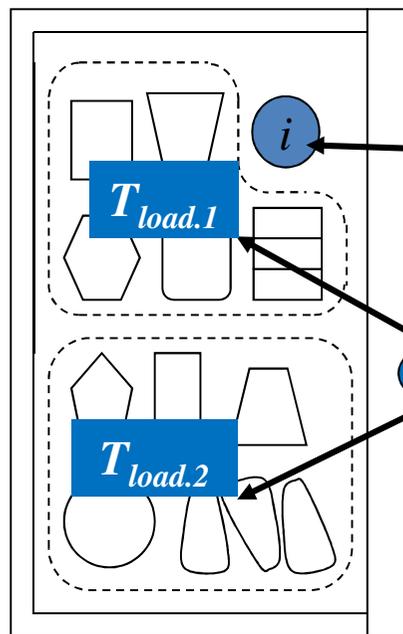
### Réfrigérateur à froid ventilé:

$$T_{load.1} = 0.0343 T_{ext} + 0.9657 T_{th}$$

$$T_{load.2} = 0.0147 T_{ext} + 0.9853 T_{th}$$

# Modélisation déterministe d'un réfrigérateur domestique

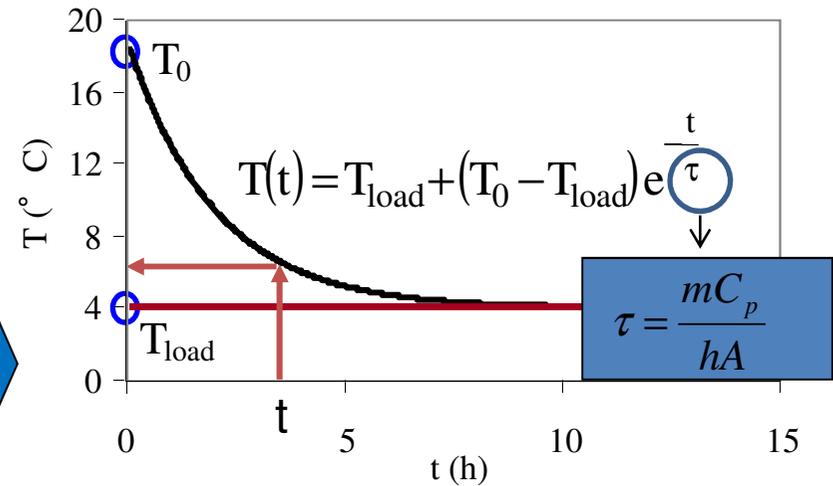
## Régime instationnaire



**Product of interest i**  
Temperature evolution

**Loads**  
Constant Temperature

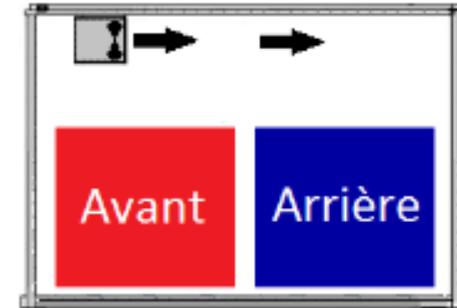
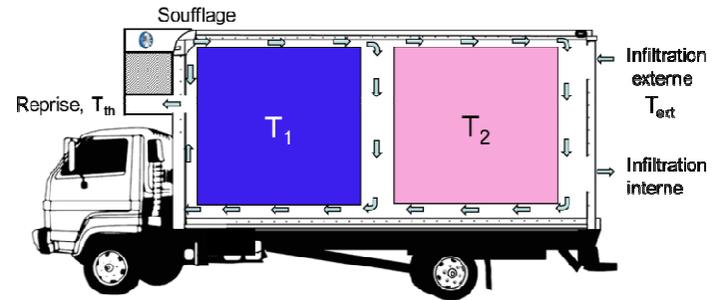
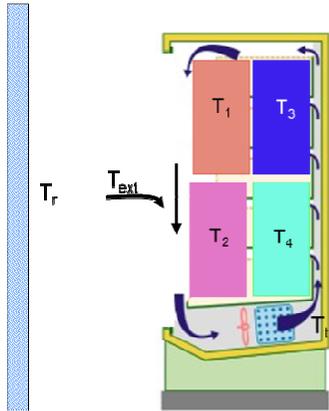
**Régime instationnaire**



**Régime permanent**

$$T_{load} = BT_{ext} + CT_{th}$$

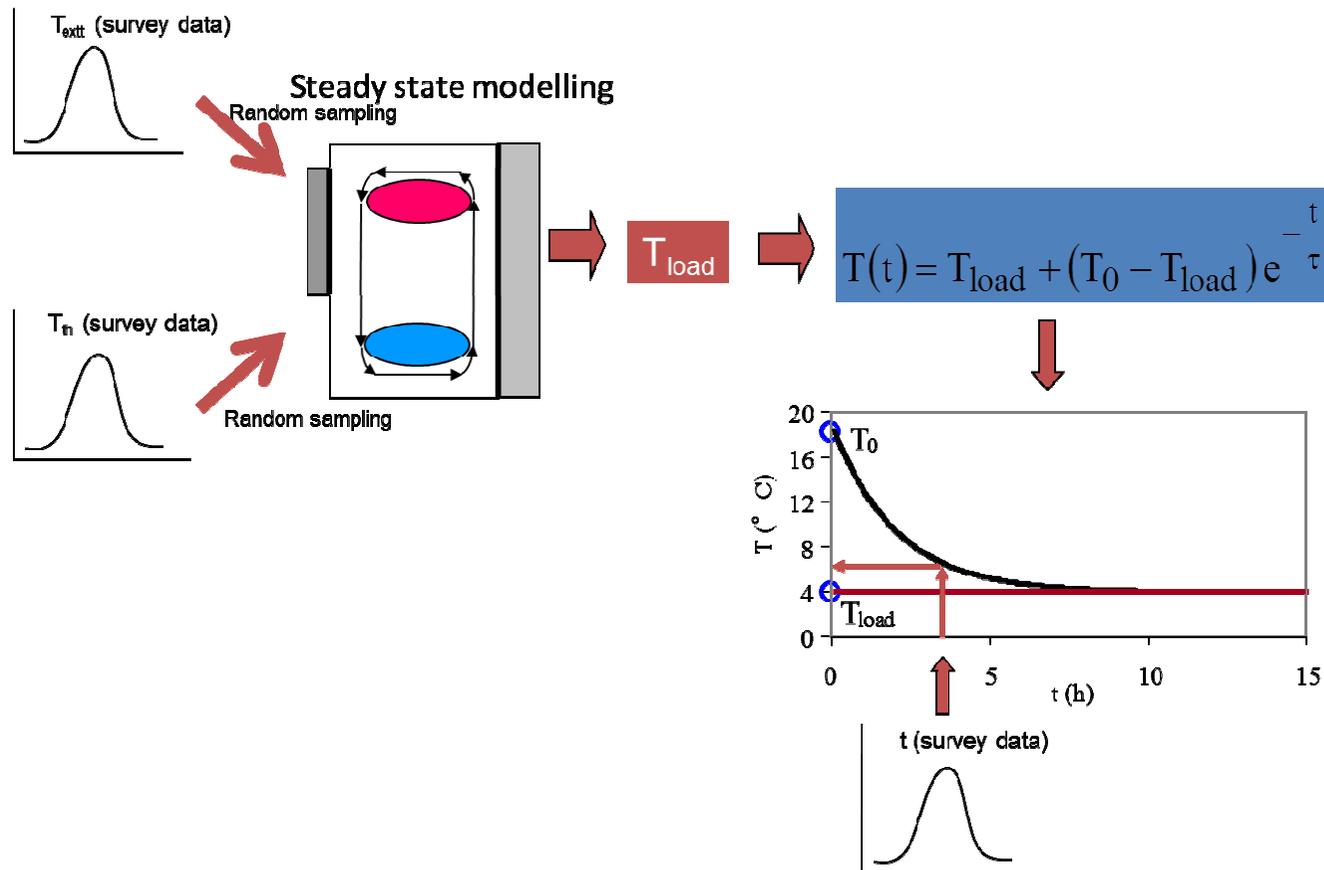
# Différents modèles zonaux ont été développés



## Prise en compte des phénomènes aléatoires pour un réfrigérateur domestique:

- Réglage du thermostat
- Température ambiante dans la cuisine

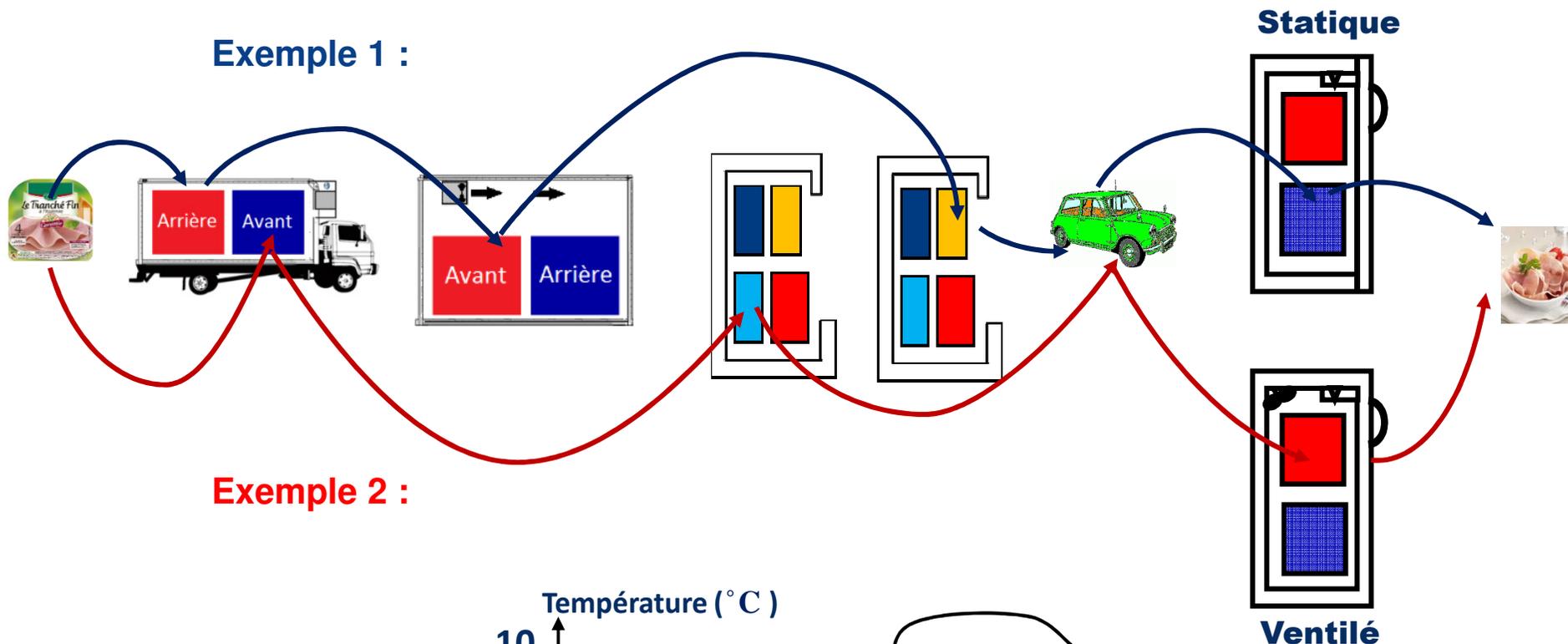
## Association de la modélisation déterministe et stochastique



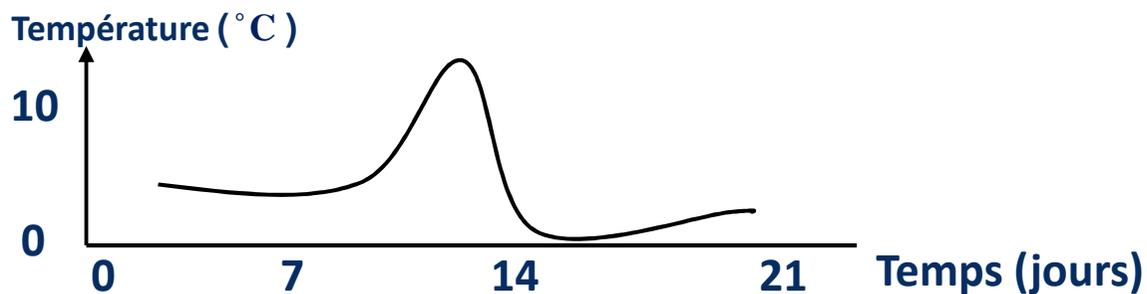
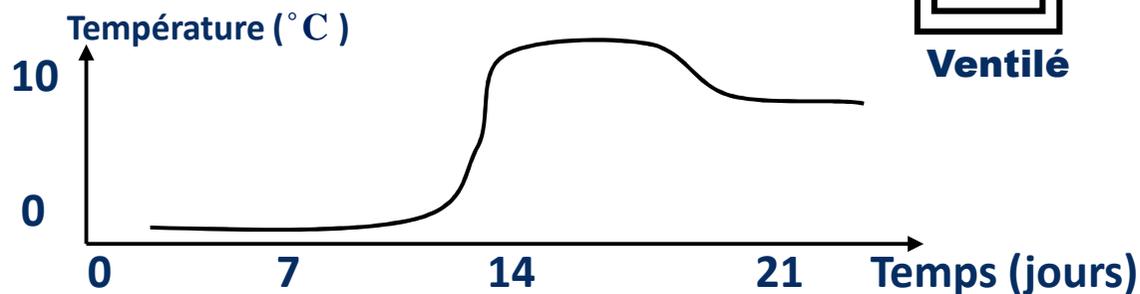
Généralisation de la démarche pour l'ensemble de la chaîne logistique des produits alimentaires en prenant en compte des phénomènes aléatoires

- Propriétés des produits (pH,  $a_w$ , teneur en sel...)
- Circuit logistique
  - Température ambiante
  - Température de réglage du thermostat
  - Position de produit dans l'équipement
- Microorganismes

### Exemple 1 :



### Exemple 2 :



Grand nombre de simulations effectuées pour établir les profils temps température de produit

## Température et durée moyenne de jambon dans la chaîne du froid

	French Frisbee study (83 ham products)		Frisbee Reference cold chain of cooked sliced ham	
	Mean temperature (°C)	Mean duration	Mean temperature	Mean duration
Entire chain	3.8	14 days	/	/
Refrigerated transport	2.4	8 hours	/	/
Logistics platform	2.5	2 days	3.1	1 hour 55min
Cold room in store	2.6	17 hours	/	/
Display cabinet	2.8	3 days 14 hours	3	5 days 4 hours
Transport after purchase	6.5	1 hour 13 min	8.6	1 hour 12min
Domestic refrigerator	6.3	6 days 6 hours	5.7	3 days 5 hours

# Couplage avec le modèle de microbiologie prévisionnelle

Profils temps-température de produit dans une chaîne logistique



Modèle de microbiologie prévisionnelle



Evolution de la charge microbienne

**Modèle de croissance primaire**

$$\frac{dN(t)}{dt} = \mu N(t)$$

$N(t)$ : Charge microbienne à l'instant  $t$  (CFUg<sup>-1</sup>)  
 $\mu$ : Taux de croissance (s<sup>-1</sup>)

**Modèle de croissance secondaire :**

$$\mu = f(T, a_w, pH \dots)$$

# Résultats de simulation de 10000 paquets de jambon dans un circuit logistique

## Bactéries lactiques

Seuil :  $8,6 \log_{10} \text{UFC g}^{-1}$ , Mataragas et al., 2006

$\text{LAB} < 8,6 \log_{10} \text{UFC g}^{-1}$   
Pas d'altération

$\text{LAB} > 8,6 \log_{10} \text{UFC g}^{-1}$   
Altération

## *Listeria monocytogenes*

Seuil :  $100 \text{ UFC g}^{-1}$

$L.m > 100 \text{ UFC g}^{-1}$   
risque

$L.m < 100 \text{ UFC g}^{-1}$   
pas de risque

Risque

-

Pas d'altération

0,63 %

Risque

-

Altération

0,73 %

Pas de risque

-

Pas d'altération

91,90 %

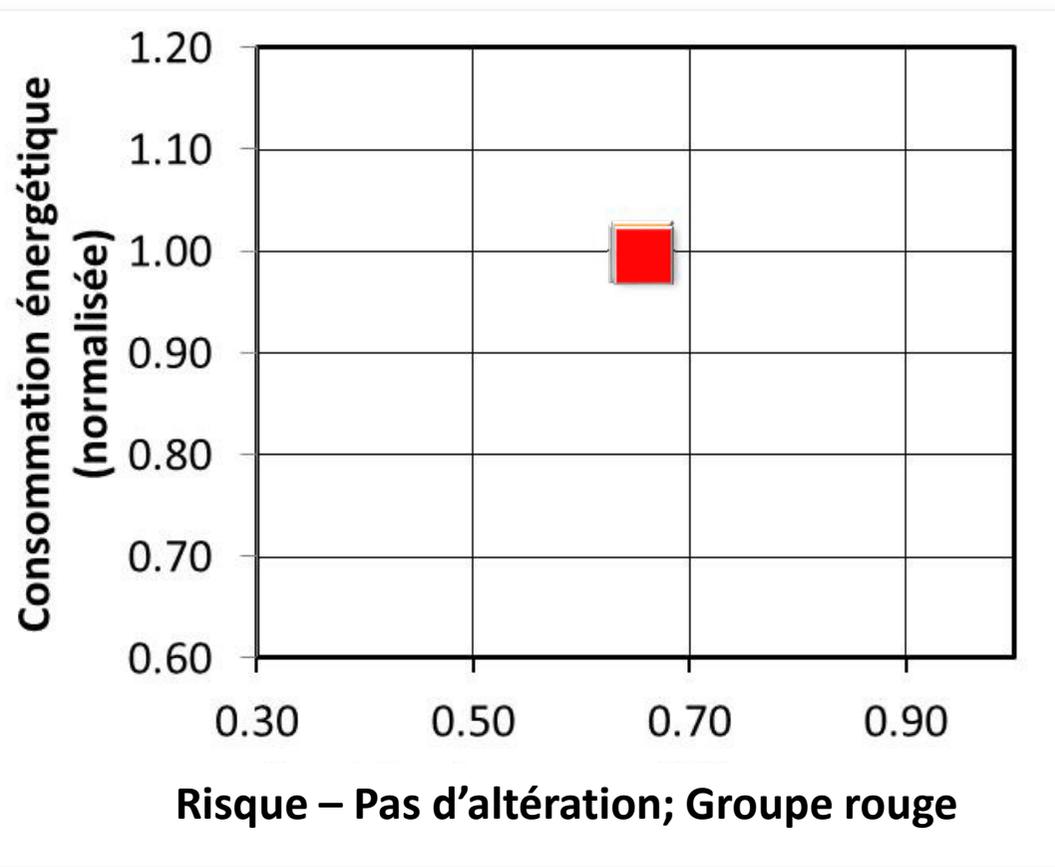
Pas de risque

-

Altération

6,74 %

# Etude numérique de l'impact des conditions opératoires



■ Référence

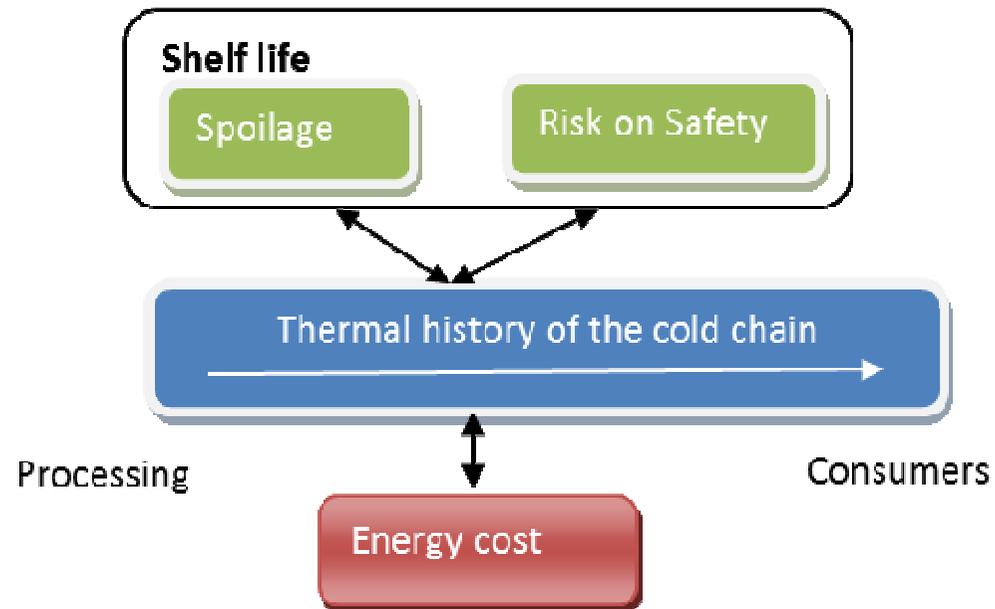
■ Thermostat réfrigérateur  
6 → 3,8 (°C)

■ Isolation réfrigérateur  
K=0,7 → 0,3 W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>

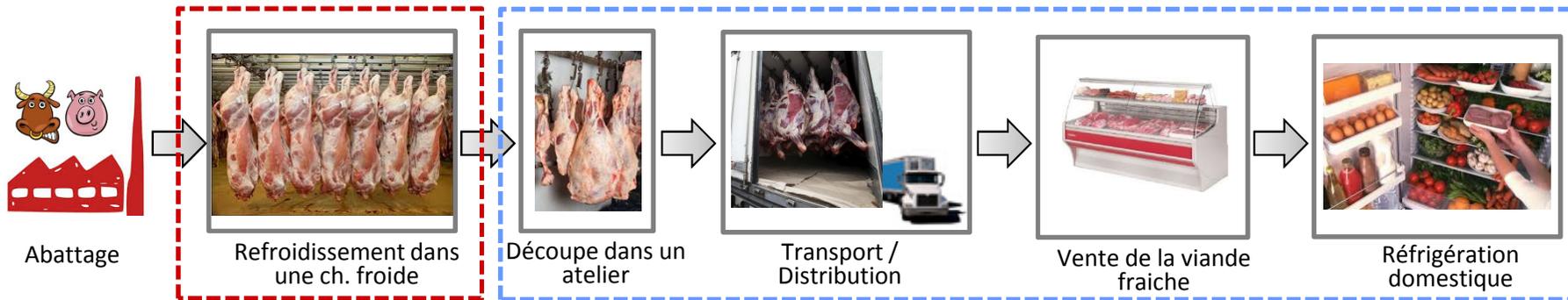
■ Débit d'air meuble de vente  
 $\dot{m}=0,09 \rightarrow 0,045 \text{ kg s}^{-1}$

# Recherche en cours ANR Opticold

Optimisation multicritères:  
qualité de produit et consommation énergétique des  
équipements



## Thèse en cours



### Questionnement:

- Le chargement d'un produit tiède dans un véhicule frigorifique pourrait-il présenter un risque microbiologique lors du refroidissement pendant le transport ?
- Cette pratique qui entraîne un coût énergétique vaut-elle la peine d'être réalisée ?



Modélisation des transferts (thermiques-hydriques) et des évolutions microbiologiques pour la maîtrise de la sécurité sanitaire avec prise en compte des variabilités dans la chaîne du froid : application à la filière viande (Mouna Merai)

Partenaires financeurs: ANR, Européen, Région IDF

Partenaires nationaux de recherche : AgroParisTech, ANSES, INRA

Partenaires centre technique: IFIP, AERIAL

Partenaires industriels: Labeyrie, Culture Viande, CNIEL,  
Bonduelle, Bongrain, Air Liquide,

**Merci pour votre attention**

