

# Modélisation des traitements thermiques : application à la réingénierie des procédés

J. Guilpart, E. Derens-Bertheau, Cemagref  
I. Trezzani -Harbelot, Agroparistech  
E. Morelli, V. Noël, S. Jaloustre, ANSES



# Introduction

Objectif :

Est-il possible de redéfinir les paramètres d'un procédé de façon à maîtriser les risques sanitaires associé à la consommation d'un produit ?

Méthode proposée :

Etablir les liens existants entre les paramètres de ce procédé et le risque sanitaire associé à la consommation de ce produit

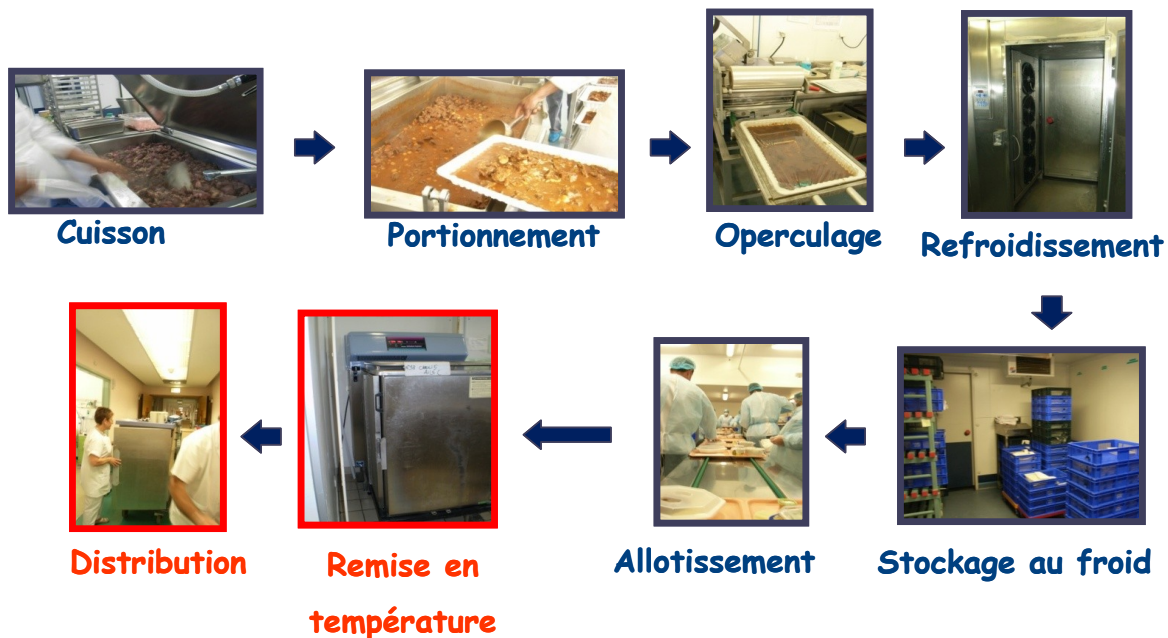
- ⇒ identifier les points (paramètres) ayant un impact majeur sur le nombre de micro-organismes présents au moment de la consommation
- ⇒ définir le jeu de paramètres permettant la meilleure maîtrise du risque (N minimal).

# Introduction

Cas étudié :

Restauration collective hospitalière en liaison froide  
(bourguignon, goulash, et mironton)

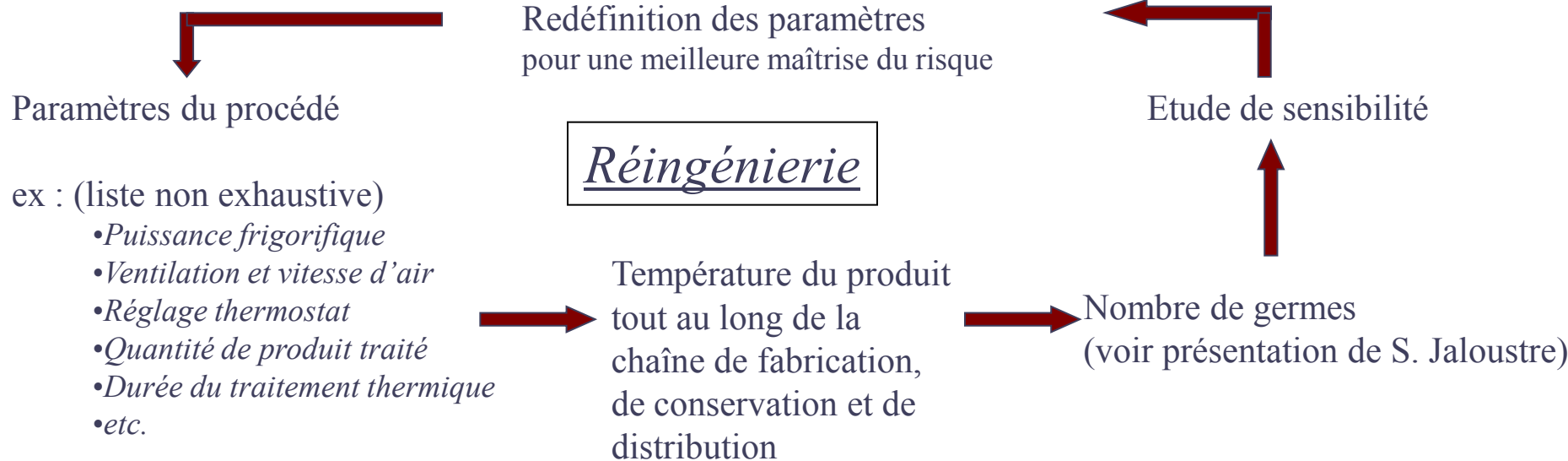
Micro-organisme de référence : *Clostridium perfringens*



# Introduction

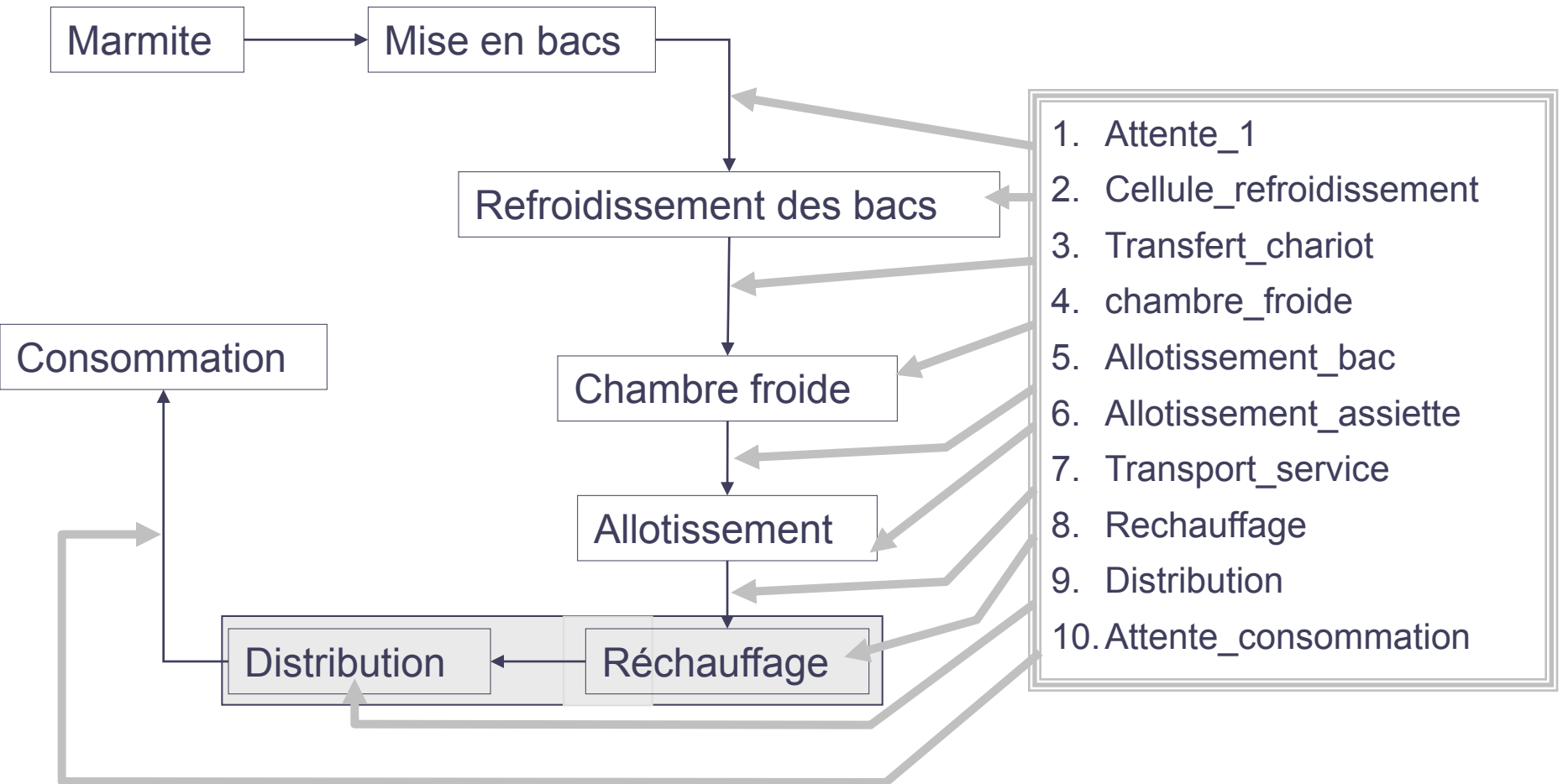
Démarche :

- Etablir les liens physiques entre les paramètres de procédé et l'histoire thermique vécue par le produit (diagramme temps / température)
- Lier la température du produit et le nombre de germes par l'utilisation de modèles de microbiologie prévisionnelle



# Modélisation thermique

*Simuler l'histoire thermique du produit de la marmite à l'assiette*



# L'ajustement et la validation des modèles thermiques



- Suivi des températures sur 3 préparations (bœuf bourguignon, bœuf mironton et goulasch)
- 17 manipulations, 2 services par manipulations
- X heures de mesure, Y données temps / température

## ↳ 2 familles de modèles utilisées

### ! Là où l'équipement est « actif »

Régulation, paramètres « contrôlables », influence directe de la conception sur la température du produit, réingénierie envisageable

## Cellule de refroidissement, cellule de réchauffage

Modèles discrétisés en temps (on prédit le fonctionnement de la machine toutes les 30 secondes pour voir si on dépasse les consignes et on ajuste en conséquence).



# Modélisation thermique

## Équipement « actif »

### Cellule de refroidissement

Prise en compte de nombreux paramètres de l'équipement

Masse thermique de l'enveloppe, puissance frigorifique disponible, surface d'échange sur la batterie, caractéristiques de la ventilation, réglage et différentiel du thermostat, ...

et de fonctionnement

Nombre de plateaux dans la cellule, réglage du thermostat, température initiale des plateaux, ...



# Modélisation thermique

## Equipement « actif »

### Cellule de refroidissement

2 points à souligner :

1- Le transfert air - produit est calé sur les calculs de José Rabi

$$h_{\text{prod}} = \mathcal{N}(12, 4) \text{ en } W \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

2- Le refroidissement est stoppé lorsque la température du produit atteint une valeur limite de ...

$$T_{\text{pr}} = \mathcal{N}(17.5, 8.8)$$

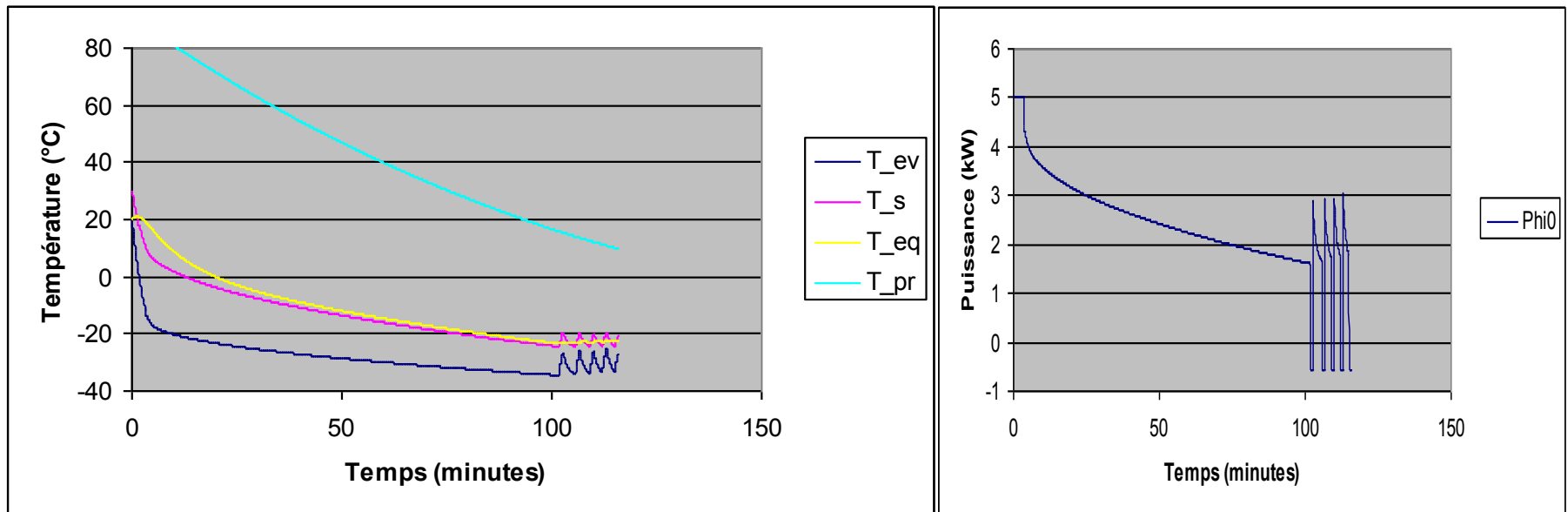
ce qui permet de « simuler » le comportement de l'opérateur qui donne des coups de sonde de température et arrête la cellule lorsqu'une valeur cible est (presque) atteinte.

# Modélisation thermique

## Equipement « actif »

### Cellule de refroidissement

Exemple de cinétique de refroidissement en cellule  
(10 plateaux entrés à 90°C,  $\Phi_{\max} = 5$  kW, thermostat -21°C)



# Modélisation thermique

## Équipement « actif »

### Cellule de remise en température

Un équipement, deux étapes

1- Remise en température comportant 2 phases :

a- Chauffage ON, portes fermées

temps de retard entre les températures équipement / air / produit

b- Chauffage OFF, portes fermées

Stabilisation de la température équipement / air / produit (inertie)

2- Distribution, porte ouverte



Compartiment  
froid

Compartiment  
chaud

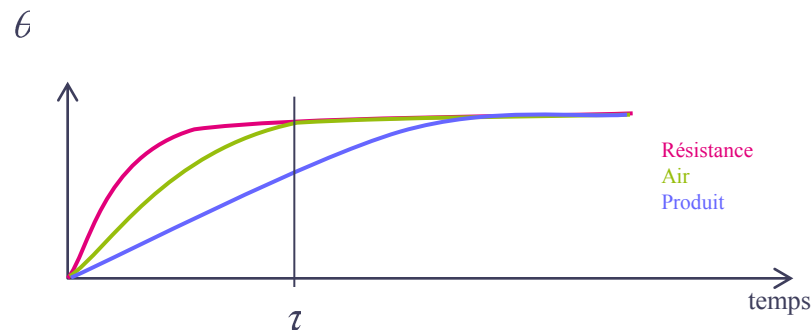
# Modélisation thermique

## Équipement « actif »

### Cellule de remise en température

L'introduction d'un temps de retard pur entre température de la résistance chauffante et l'ambiance de la cellule de réchauffage permet d'alléger les procédures de calcul

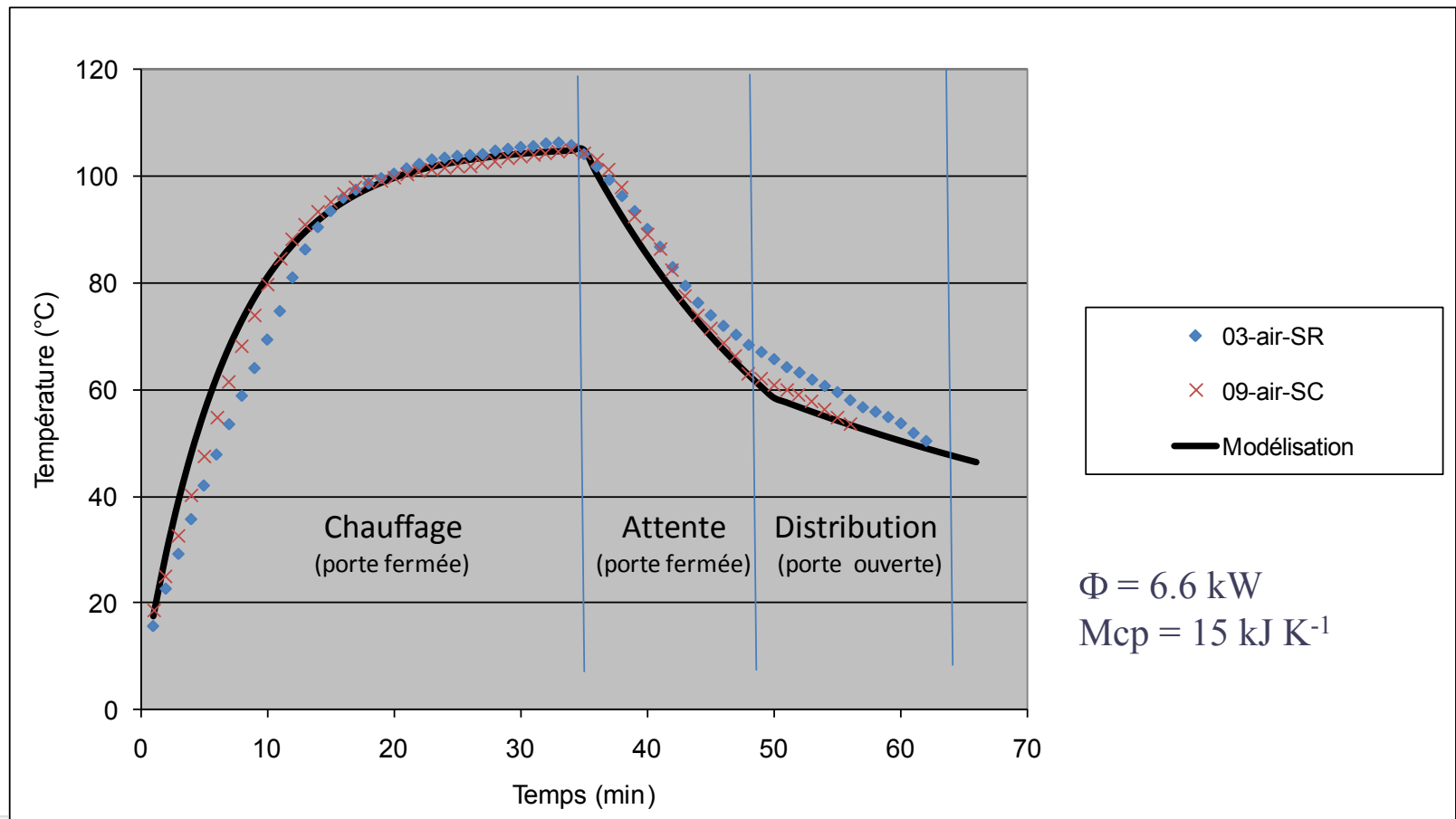
Temps de retard = au bout duquel le produit atteint la température de consigne (130°C) lorsque la cellule est branchée. 50' n'est pas aberrant ... et donne des résultats cohérents.

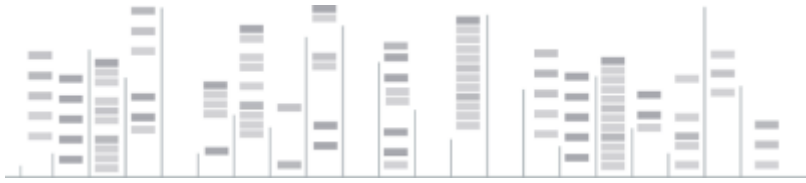


# Modélisation thermique

## Equipement « actif »

### Calage des temps de retard sur les expérimentations





## Modélisation thermique

### Équipement « passif »

#### ↳ Deuxième famille de modèles :

#### ! Là où l'équipement est « passif »

ex: la chambre froide,  
les transferts, la table du patient, ...



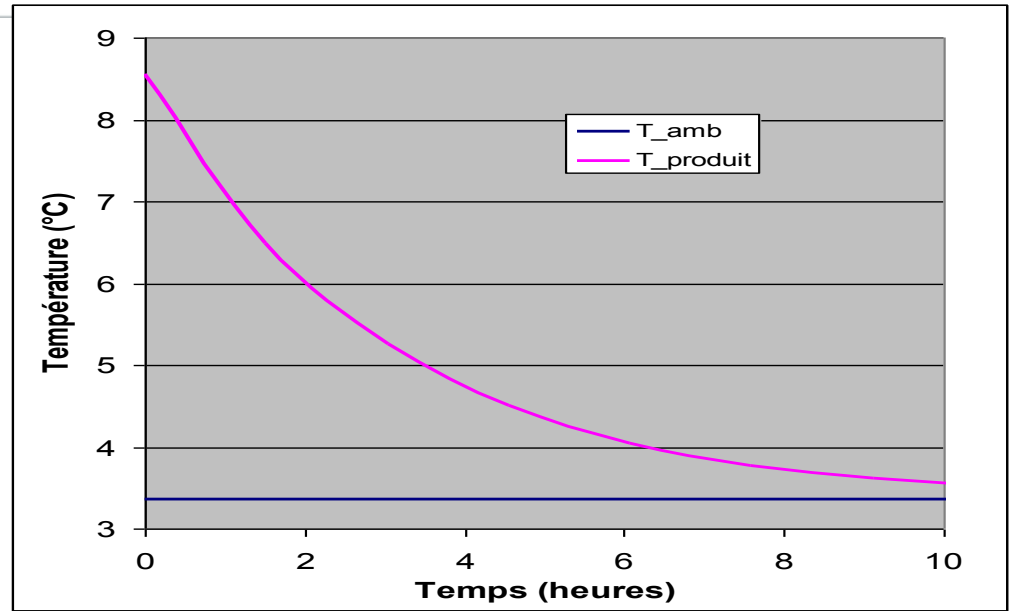
Modèles simples, « discrétisés » en nombre de points de calculs sur le temps passé dans l'étape.

50 points par étape est bien.

# Modélisation thermique

## Modèle simple :

Transferts purement convectifs  
(bonne vieille equ. diff.)



$$\Phi : MS(\theta_{amb} - \theta_{r,r}) = MCp \frac{d\theta_{r,r}}{dt}$$

$$\theta_{r,r} = \theta_{amb} + (\theta_{r,r} - \theta_{amb}) \exp\left\{-\frac{hS}{MCp} dt\right\}$$

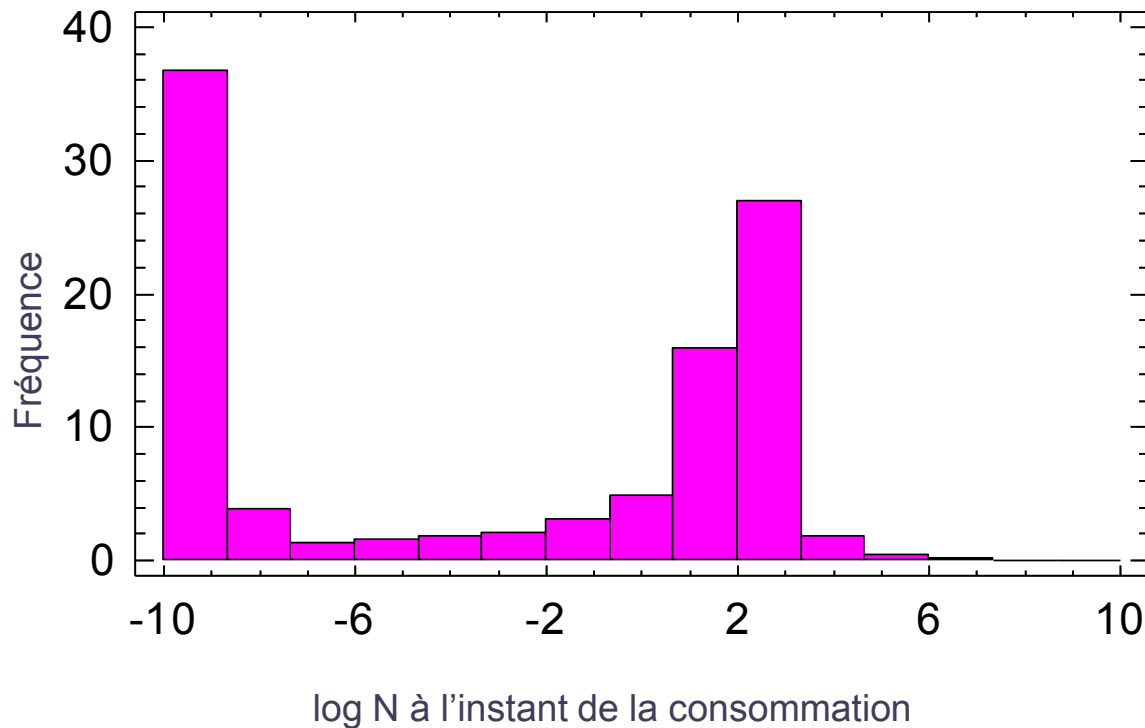
$$\text{Où } dt = \frac{\tau_{\text{temps de séjour}}}{\text{nb points}}$$

## Précision :

- ! Les valeurs et chiffres annoncés dans la suite de l'exposé ne sont applicables qu'aux seuls équipements et itinéraires techniques étudiés,
- ! L'extrapolation des tendances et recommandations formulées à d'autres équipements et à d'autres itinéraires techniques n'est pas prudente,
- ! La généralisation de la méthode est possible, moyennant la validation des paramètres utilisés dans la présente étude.

# Résultats des simulations

80 variables de procédés  
25 variables aléatoires  
10 000 simulations



*Plus de 97% des observations conduisent à des concentrations inférieures à  $10^3$  CFU/g (max :  $10^{5.8}$ )*



# Etude de sensibilité

## Deux étapes apparaissent comme critiques

### Le réchauffage des portions avant service

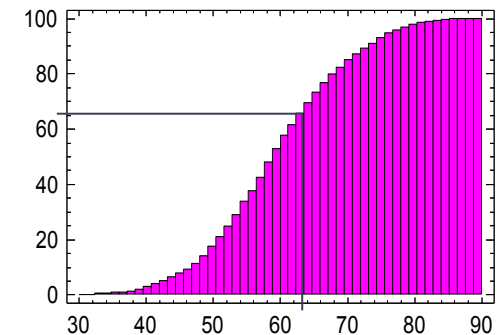
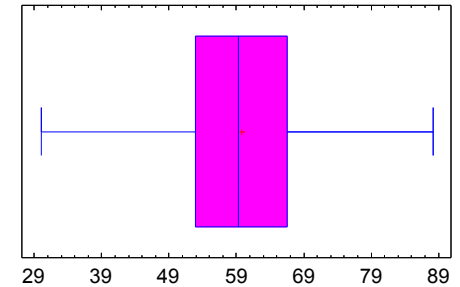
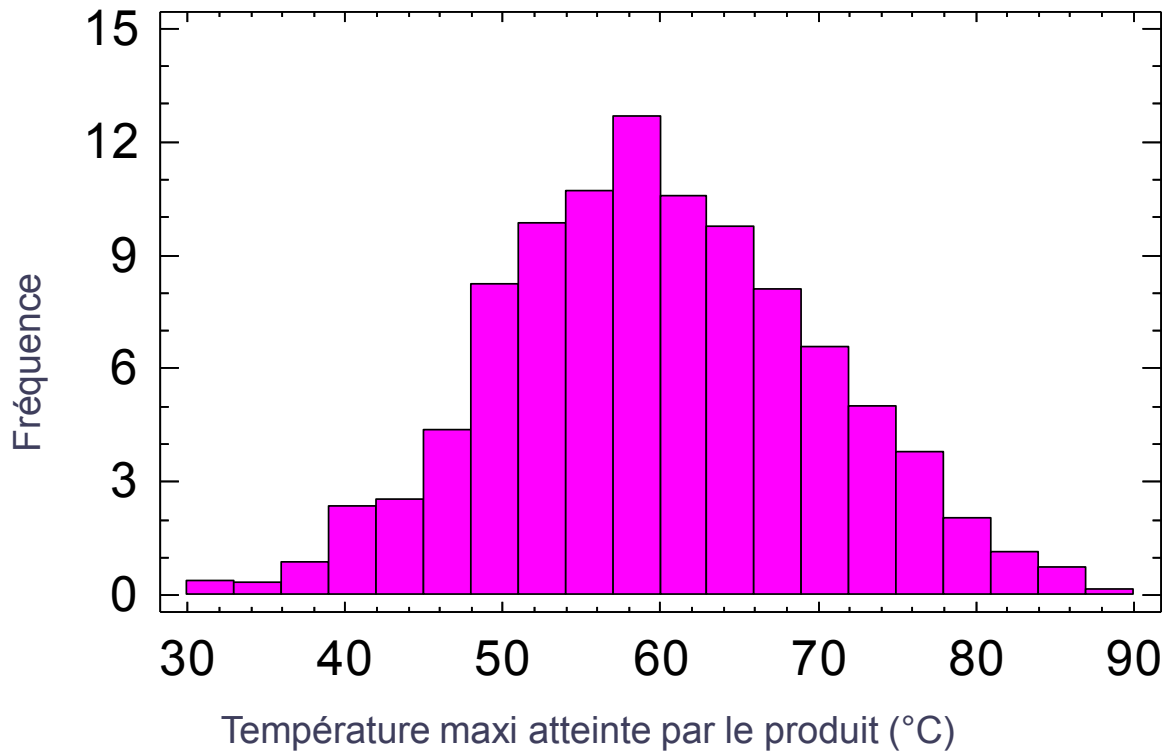
La destruction des germes débutant dès lors que la température dépasse 53°C, il convient d'atteindre et de rester au dessus de cette température un temps suffisamment long pour mieux maîtriser le risque sanitaire. La réglementation impose le seuil de +63°C pour garantir cette sécurité sanitaire.

### La cellule de refroidissement rapide après cuisson

Un temps de passage rapide entre +63°C et +10°C permettant de limiter la croissance bactérienne.

# Etude de sensibilité

## La cellule de remise en température



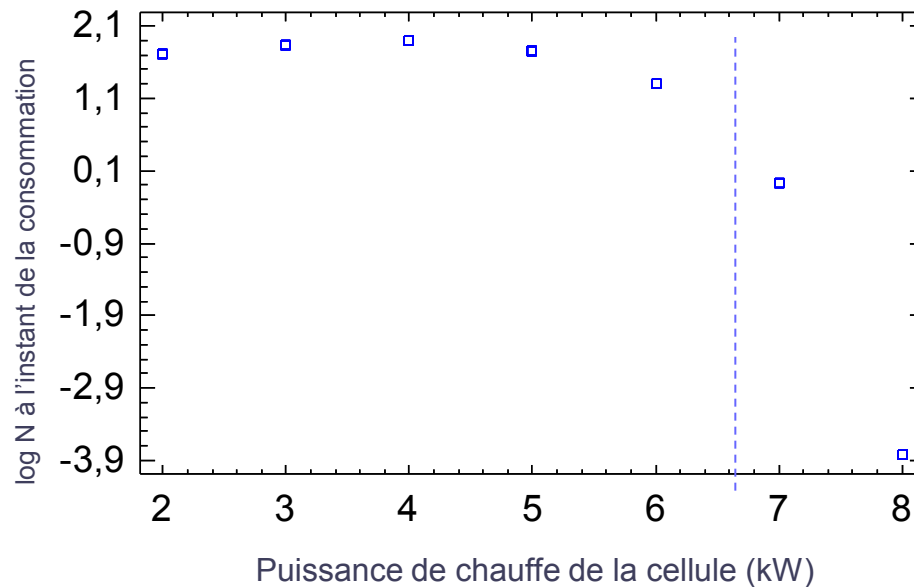
Les 2/3 des produits n'atteignent pas la température de +63°C

(60% dans les expérimentations)

# Etude de sensibilité

## I La cellule de remise en température

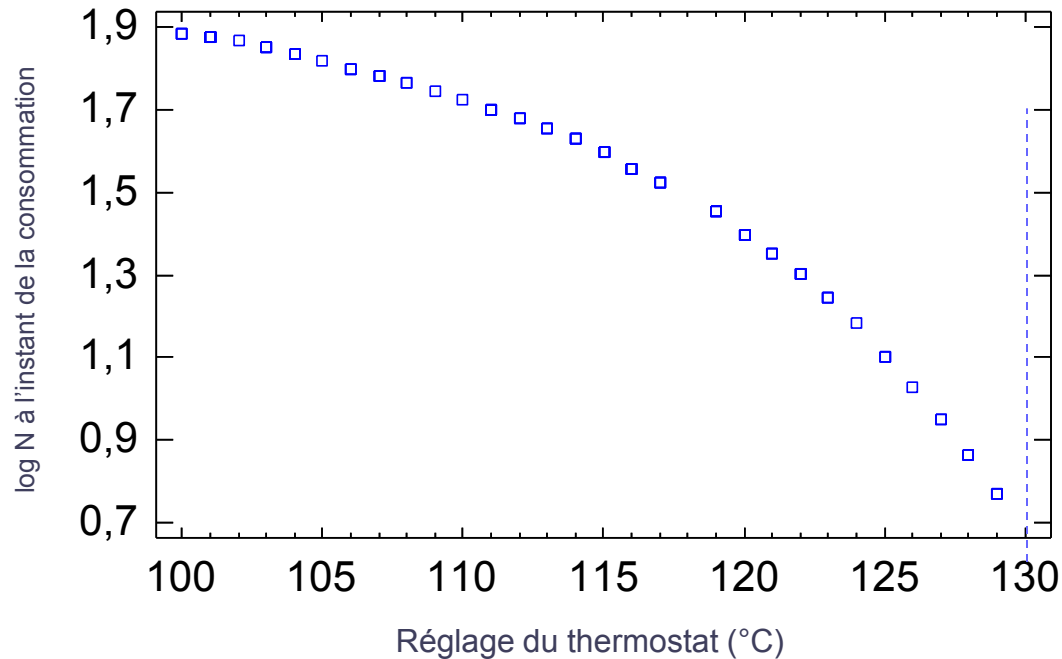
1. Puissance de chauffage installée dans la cellule de remise en température
2. Réglage du thermostat
3. Temps de chauffe
4. Temps de stabilisation



# Etude de sensibilité

## I La cellule de remise en température

1. Puissance de chauffage installée dans la cellule de remise en température
2. Réglage du thermostat
3. Temps de chauffe
4. Temps de stabilisation



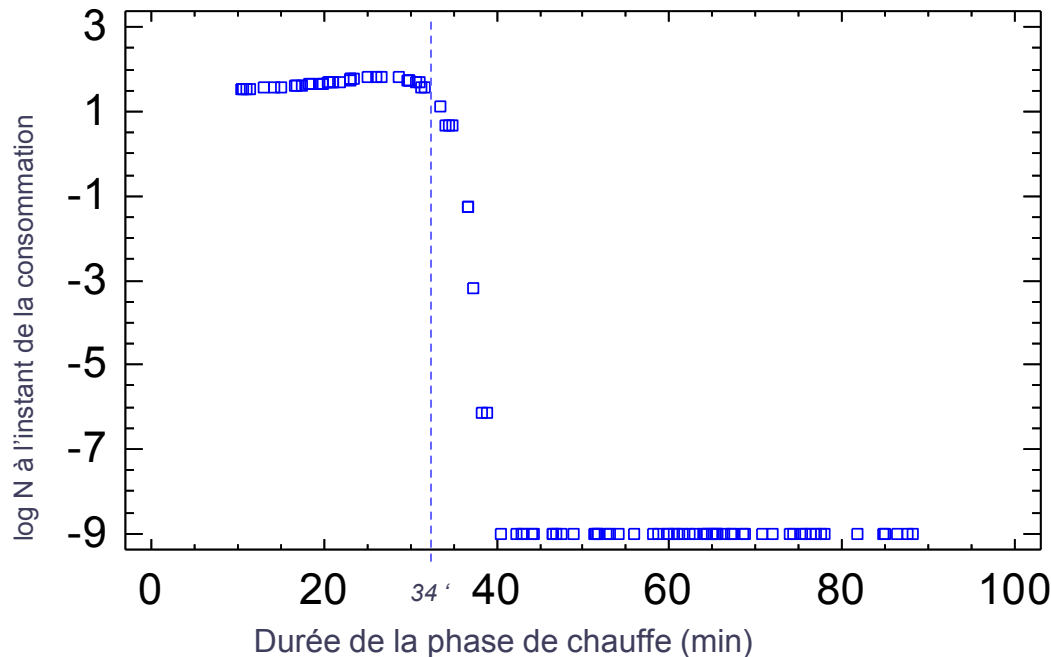
*Par rapport aux pratiques actuelles,*

*Baisser la consigne  
thermostat de 10 °C  
multiplie N par 2*

# Etude de sensibilité

## I La cellule de remise en température

1. Puissance de chauffage installée dans la cellule de remise en température
2. Réglage du thermostat
3. Temps de chauffe
4. Temps de stabilisation



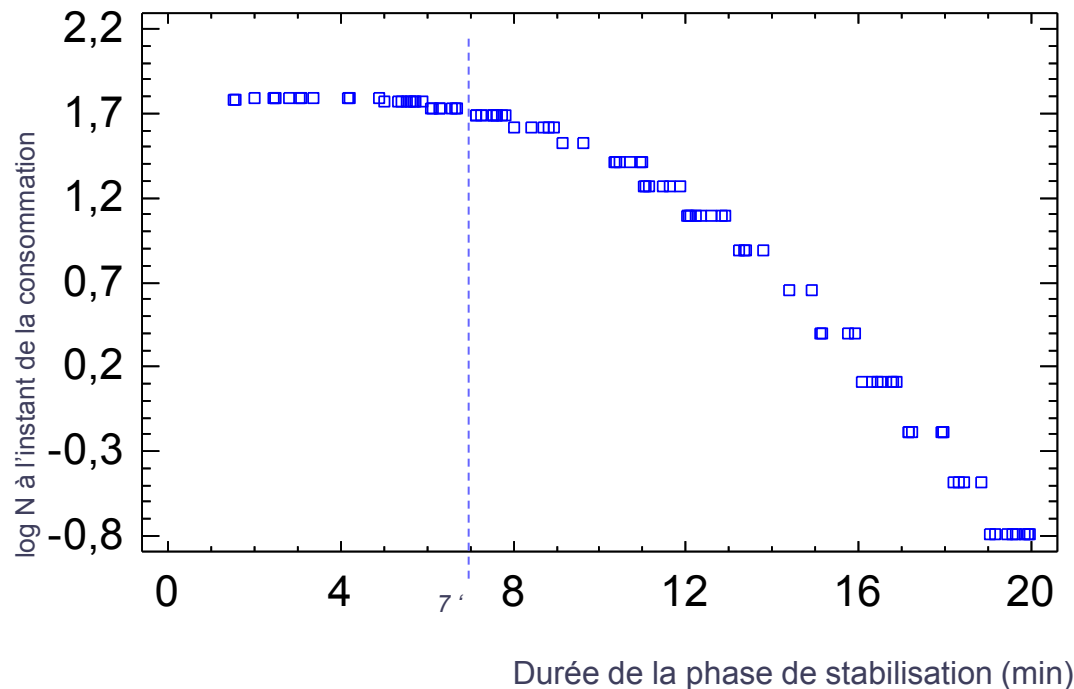
*Par rapport aux pratiques actuelles,*

*Adopter un temps de chauffe suffisamment long (40') permet une très forte réduction du risque*

# Etude de sensibilité

## I La cellule de remise en température

1. Puissance de chauffage installée dans la cellule de remise en température
2. Réglage du thermostat
3. Temps de chauffe
4. Temps de stabilisation



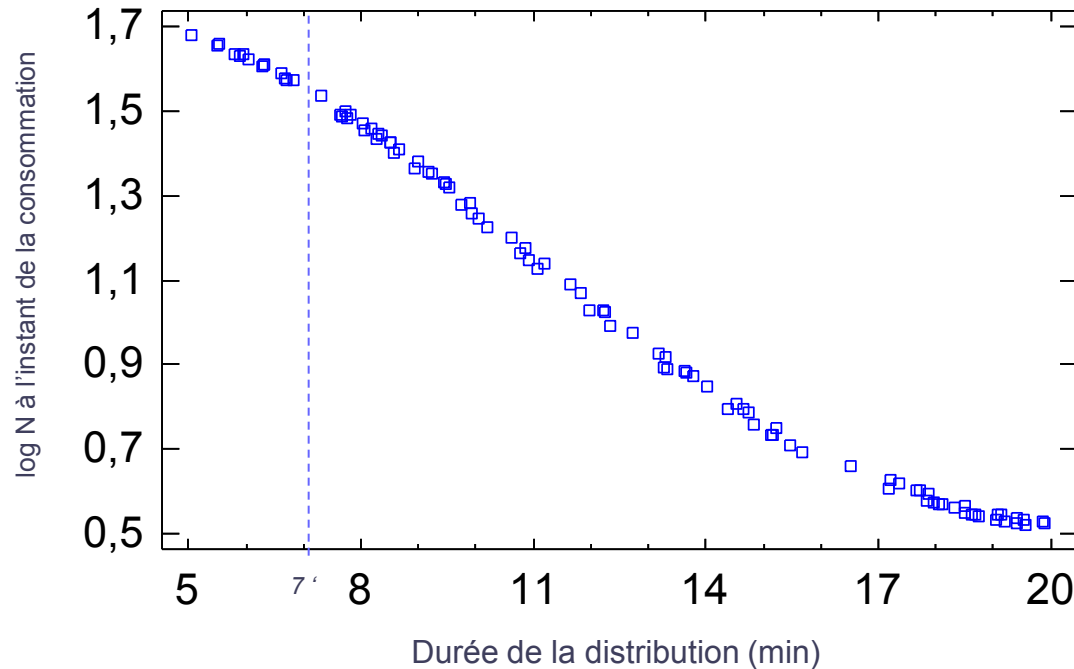
*Par rapport aux pratiques actuelles,*

*Doubler le temps d'attente  
porte fermée permet de  
réduire N d'un facteur 2*

# Etude de sensibilité

## Le temps de distribution

*Autre facteur d'influence :*



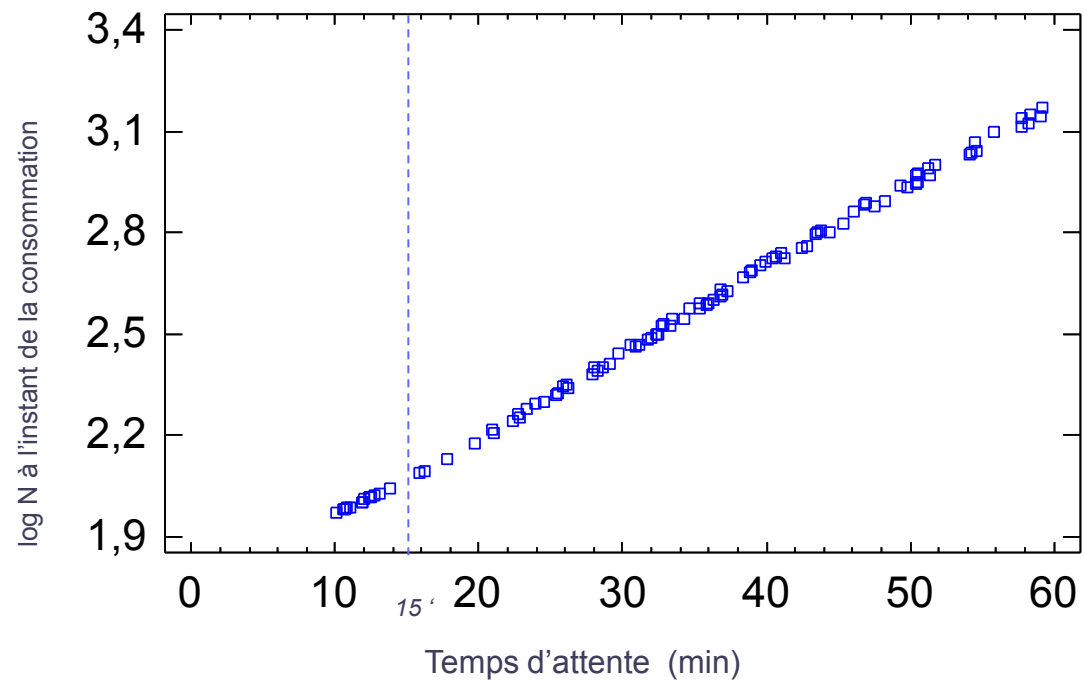
*Par rapport aux pratiques actuelles,*

*Un temps de distribution suffisamment long (mais n'excédant pas 20') a un effet favorable (permet aux températures de continuer à se stabiliser dans la cellule)*

# Etude de sensibilité

Le temps d'attente sur la table du patient

*Autre facteur d'influence :*

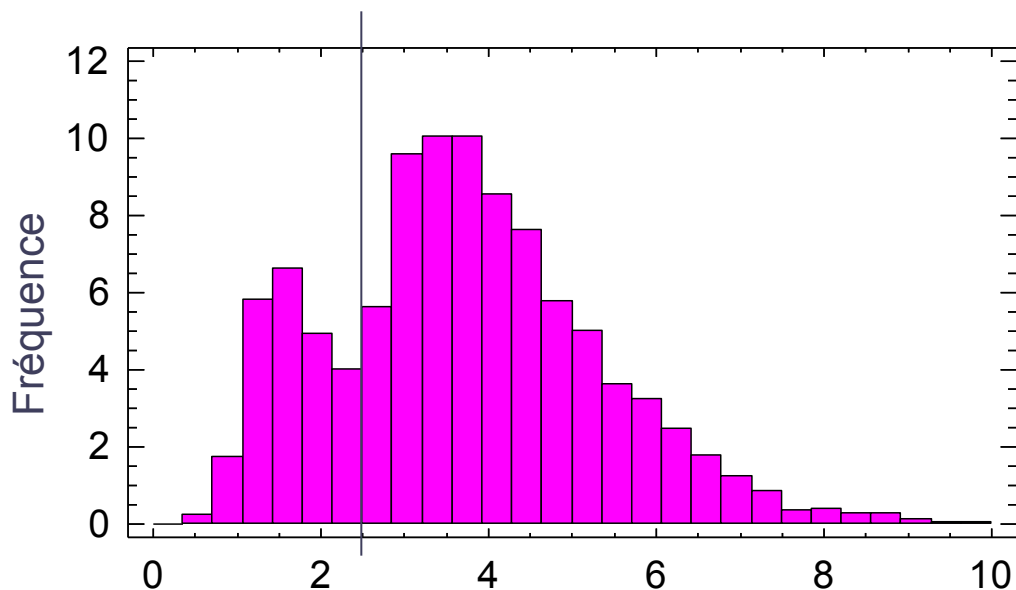


*Sur la table du patient, N augmente de 10% toutes les 10 minutes*

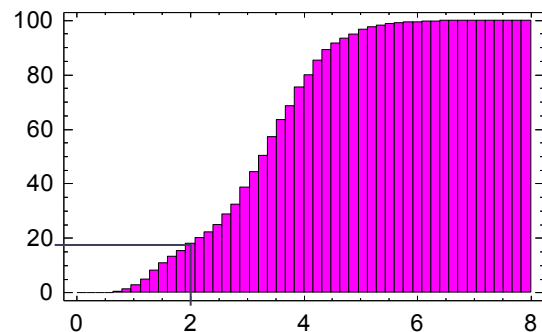
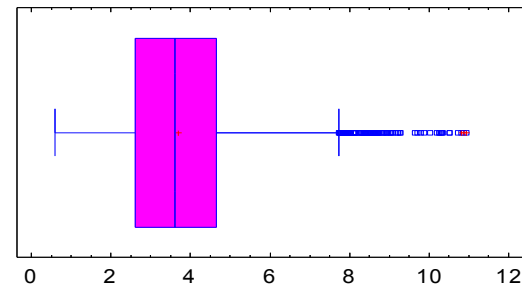
# Etude de sensibilité

## La cellule de refroidissement rapide

Temps de séjour en cellule :  
2 h 20' maxi



Temps de passage de 63°C à 10°C (heures)

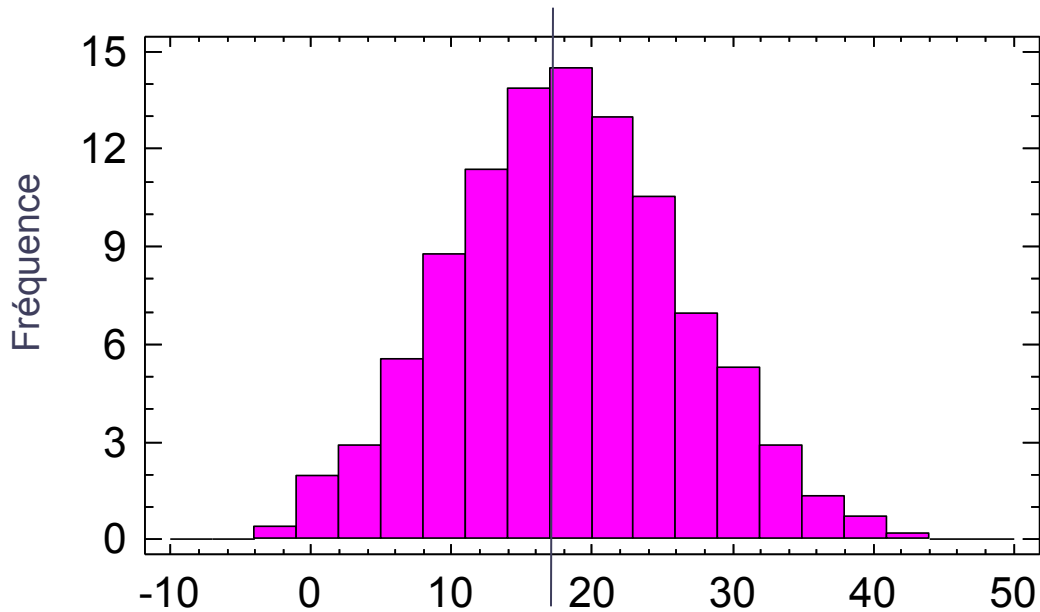


Moins de 20% des produits passent de 63°C à 10°C en moins de 2 heures

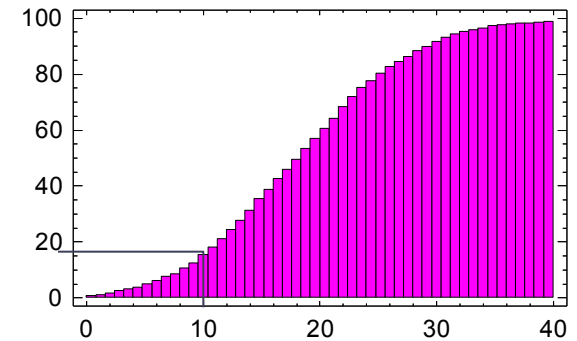
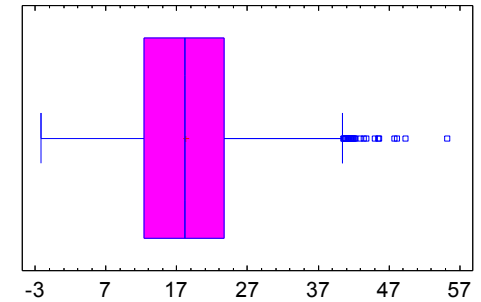
# Etude de sensibilité

## La cellule de refroidissement rapide

Moyenne observée : 17.5°C



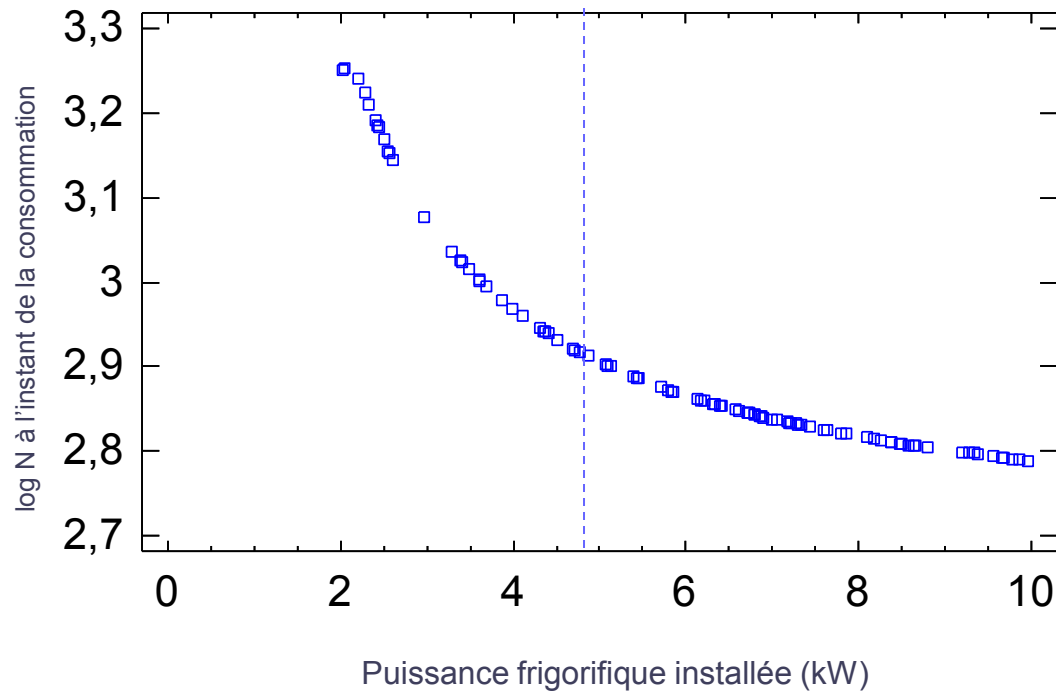
Température en sortie de cellule de refroidissement (°C)



*Moins de 20% des produits sortent de la cellule de refroidissement à une température inférieure à 10°C*

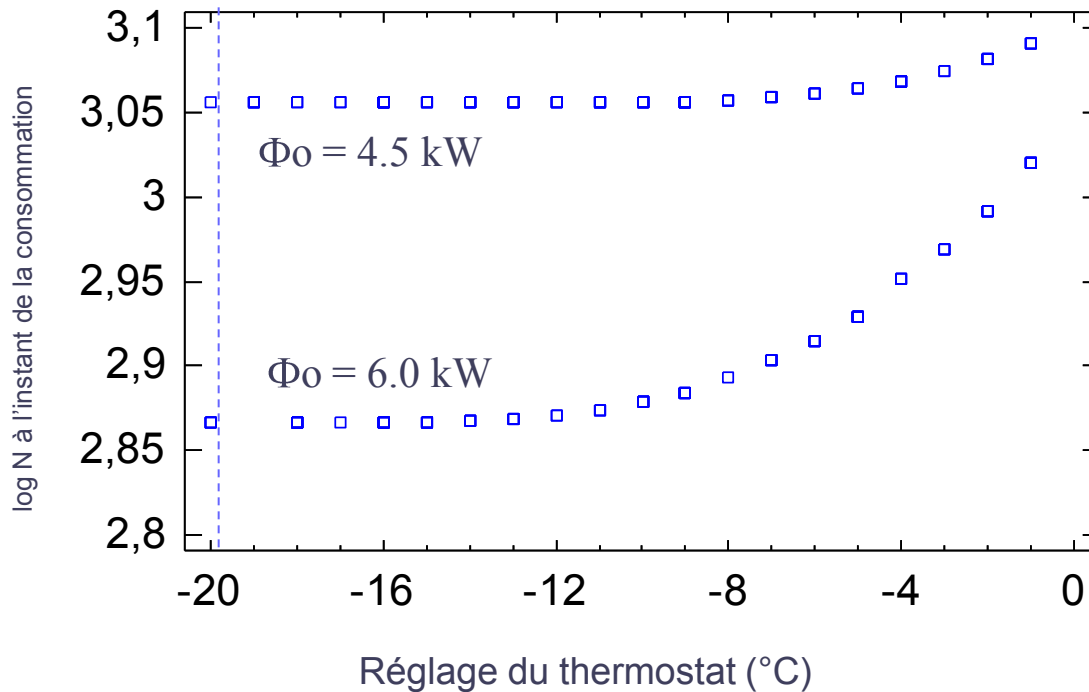
# Etude de sensibilité

## La cellule de refroidissement rapide



# Etude de sensibilité

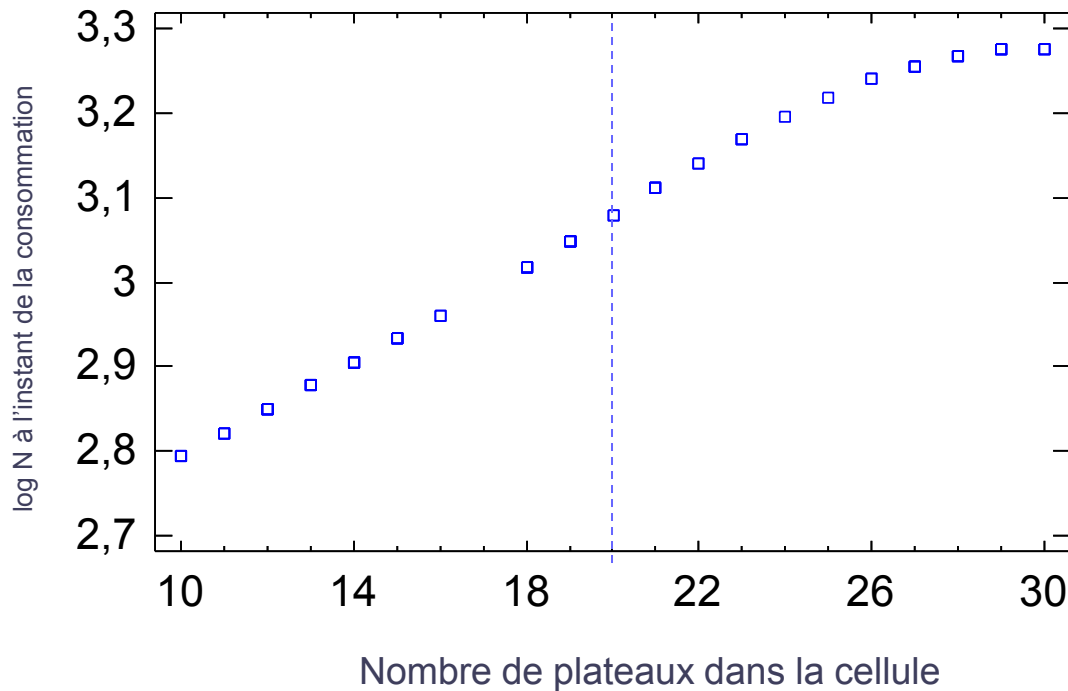
## La cellule de refroidissement rapide



*Ne pas adopter de consigne thermostat supérieure à -10 °C*

# Etude de sensibilité

## La cellule de refroidissement rapide



*Par rapport aux pratiques actuelles,*

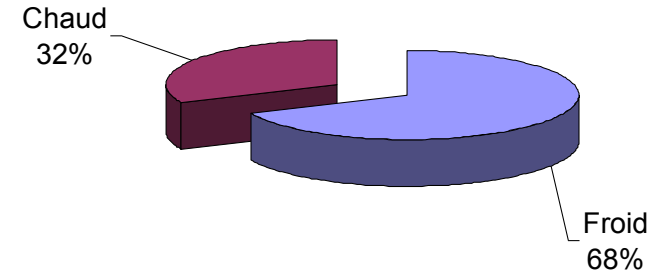
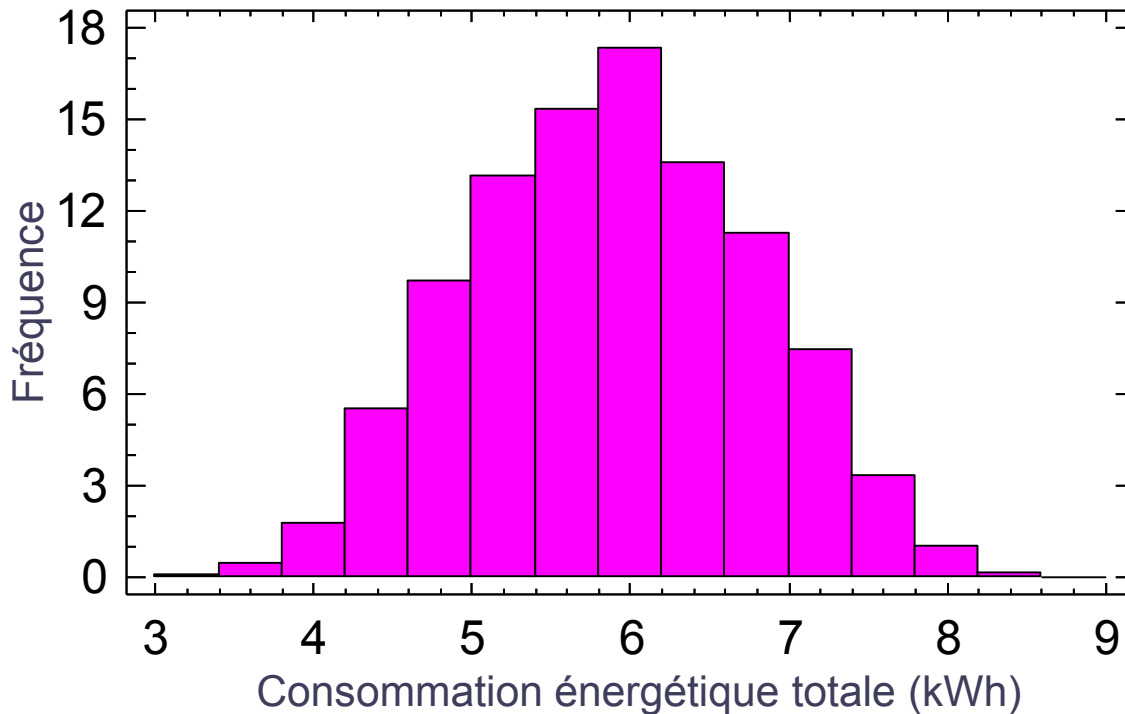
*Mettre 10 plateaux de plus dans la cellule augmente N de 10%*



# Conclusion

- ↳ L'application de la méthode au cas étudié permet de quantifier le poids de certaines préconisations en vue de réduire les risques sanitaires
  - ↳ Une démarche identique peut être adoptée pour (re)définir des paramètres techniques des équipements utilisés
- ! Rappel
- Les résultats et valeurs présentés ici sont applicables au cas étudié, leur généralisation n'est pas raisonnable sans une étude préalable.

# ... Les questions d'€nergie ...

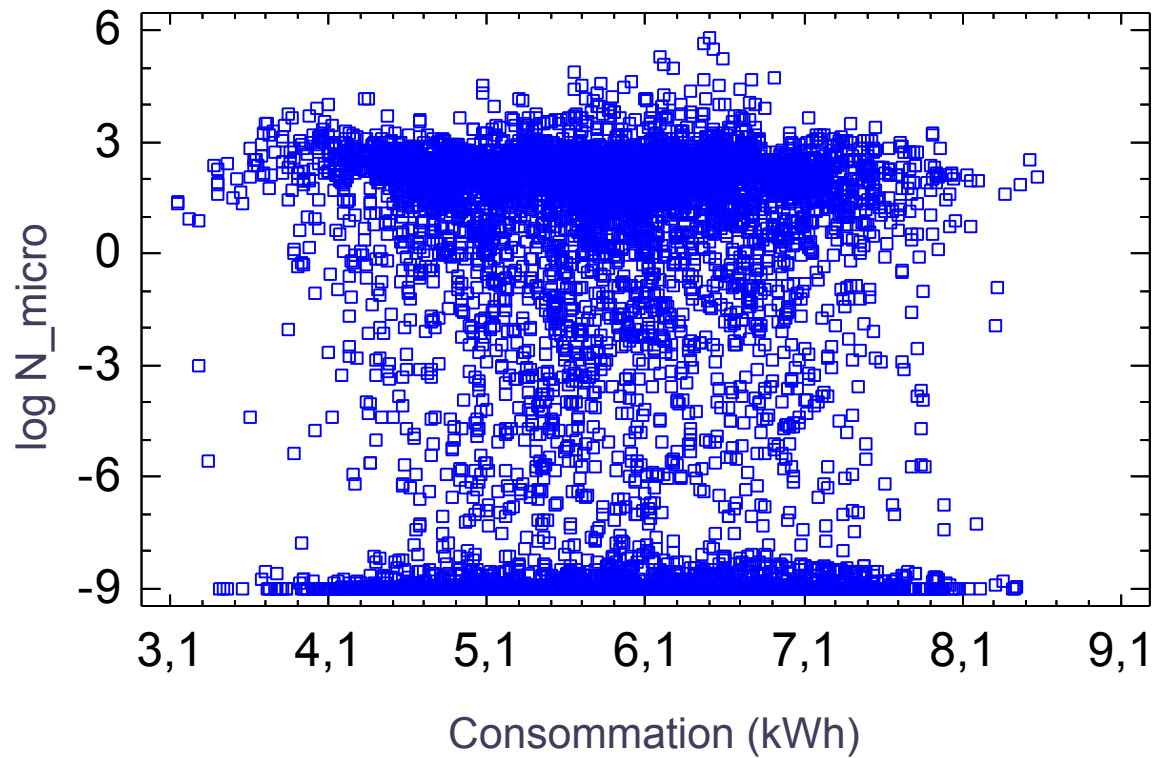


Coût du kWh : 0.05 €

Coût moyen : 30 cts d'€ pour 250 portions (en moyenne)

Coût maximal : 54 cts

# ... Les questions d'Énergie ...



Le lien entre énergie et maîtrise du risque étant difficile ...

(intervention de nombreux paramètres interagissant entre eux)



# Modélisation des traitements thermiques : application à la réingénierie des procédés

J. Guilpart, E. Derens-Bertheau, Cemagref  
I. Trezzani -Harbelot, Agroparistech  
E. Morelli, V. Noël, S. Jaloustre, ANSES