AgroParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET INDUSTRIES DU VIVANT ET DE L'ENVIRONNEMENT
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY FOR LIFE, FOOD AND ENVIRONMENTAL SCIENCES

Ecole Doctorale ABIES
Agriculture Agriculture Alimentation Food Biologie Biology Environnement Environment Santé Health

Compréhension et modélisation des phénomènes physiques régissant la libération des stimuli orosensoriels

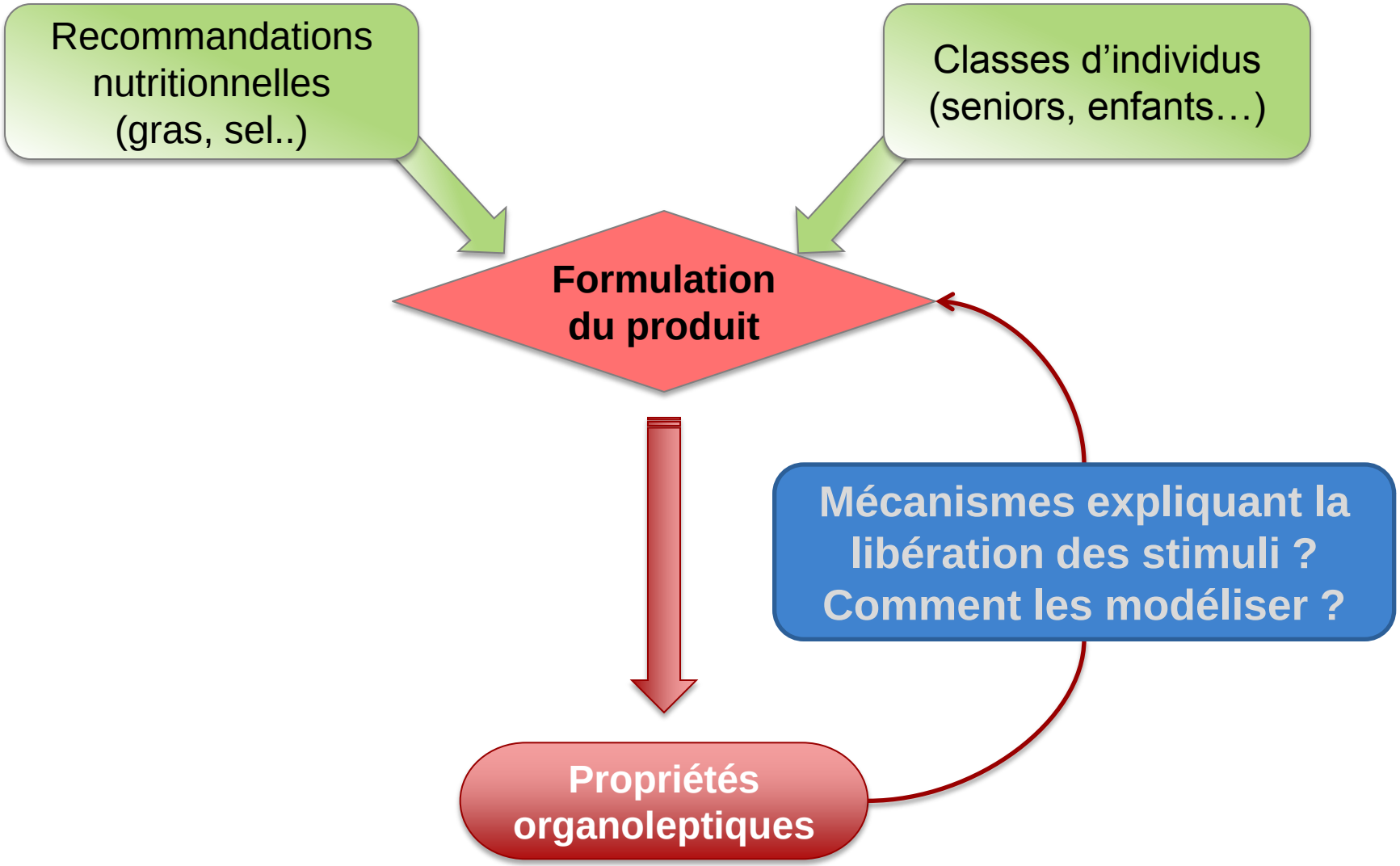
Clément de Loubens

26 novembre 2010

INRA
Génie et Microbiologie des Procédés Alimentaires

Laboratoire de Rhéologie

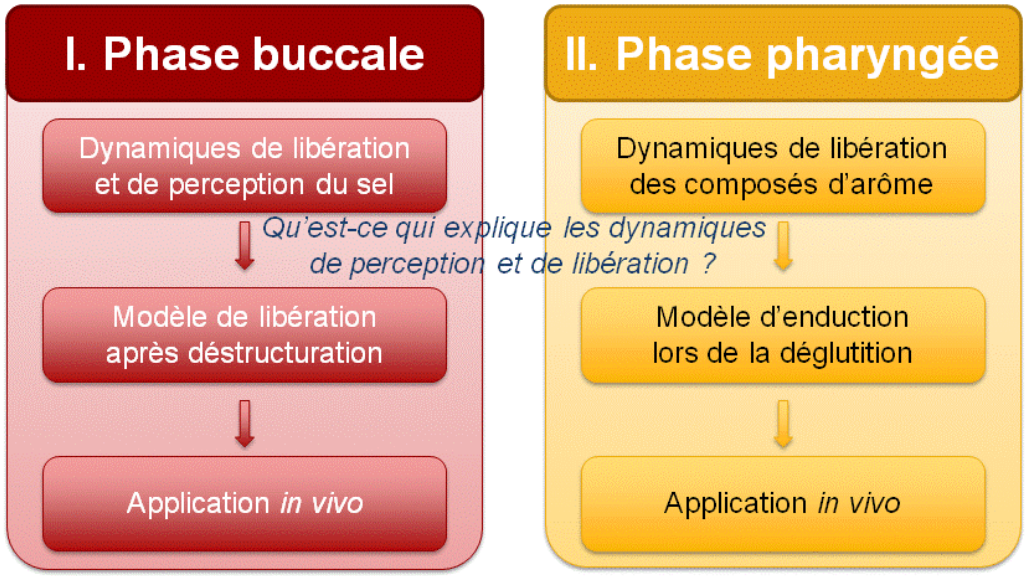
Contexte & Objectifs



Texture, Trigéminales, Saveur, Odeur
Propriétés dynamiques

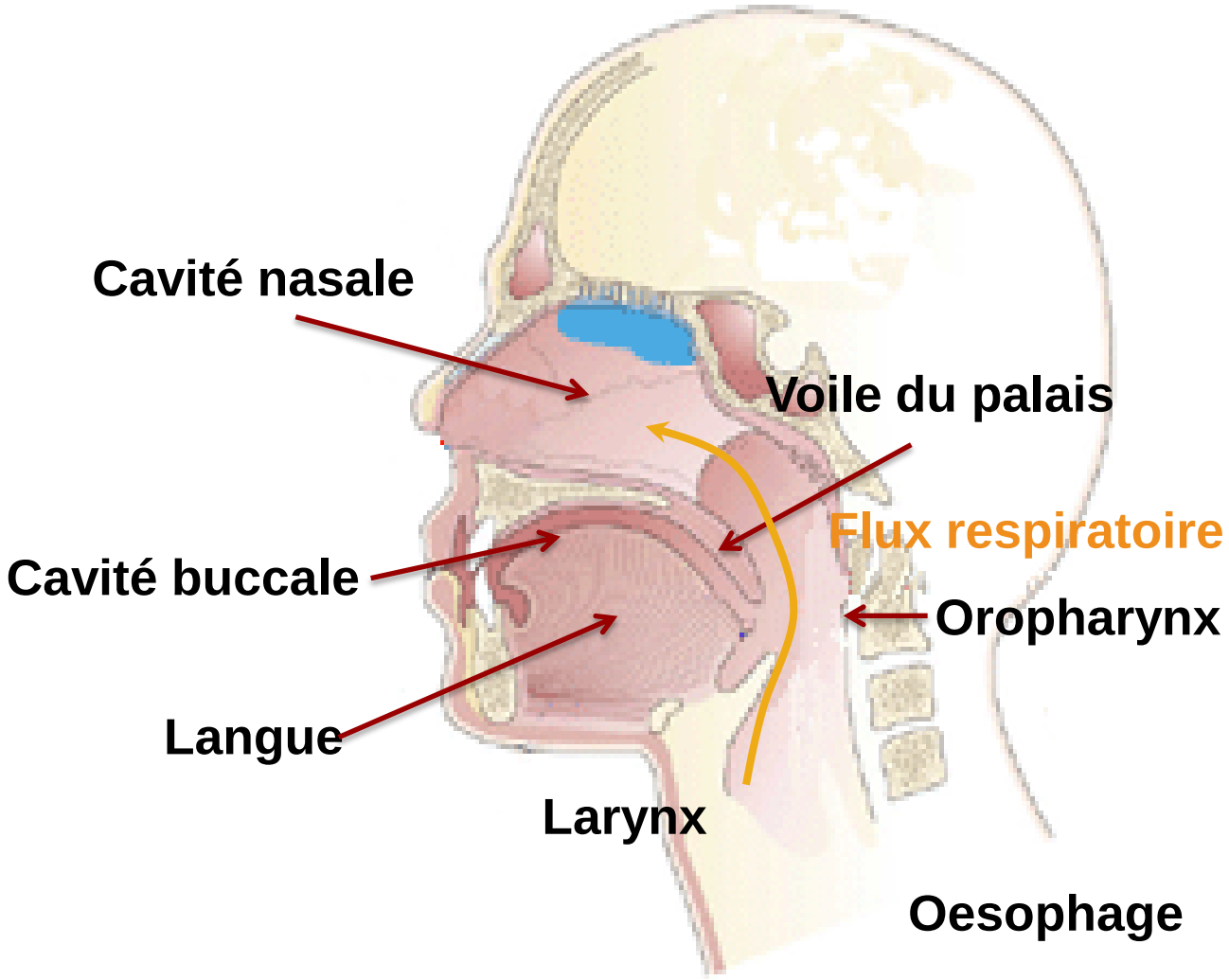
Plan

1. État de l'art
2. Objectifs
3. Résultats



4. Conclusions et Perspectives

Anatomie tête et cou

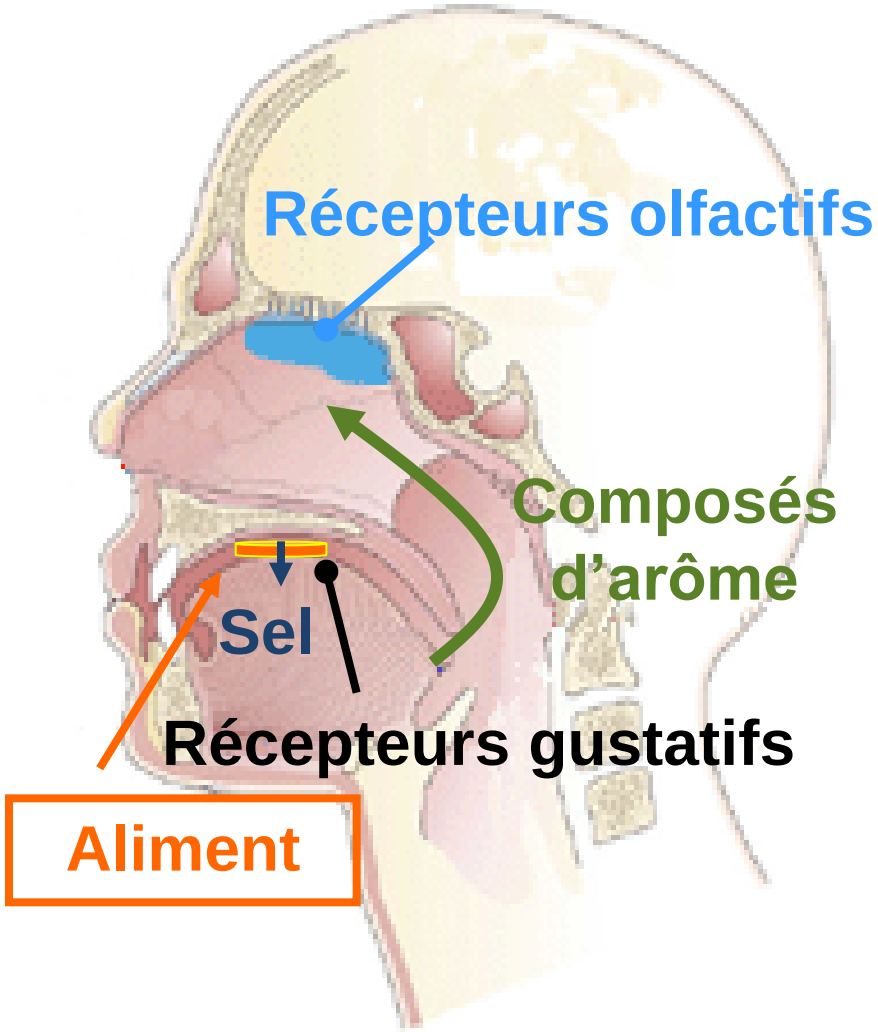


Libération & perception des stimuli

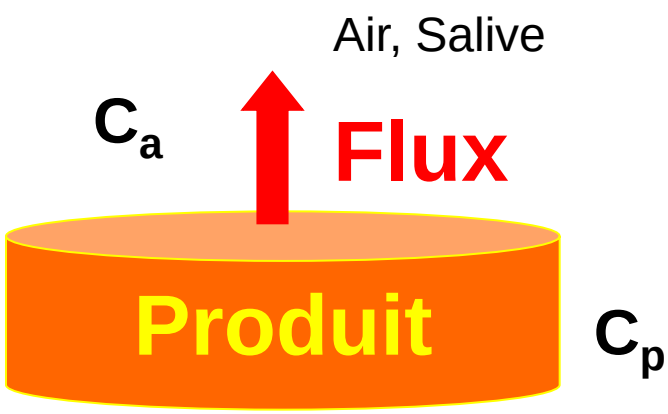
Propriétés des stimuli

Processus oral

Libération et perception



Propriétés des stimuli



$$\text{Flux} = Ak_p(KC_a - C_p)$$

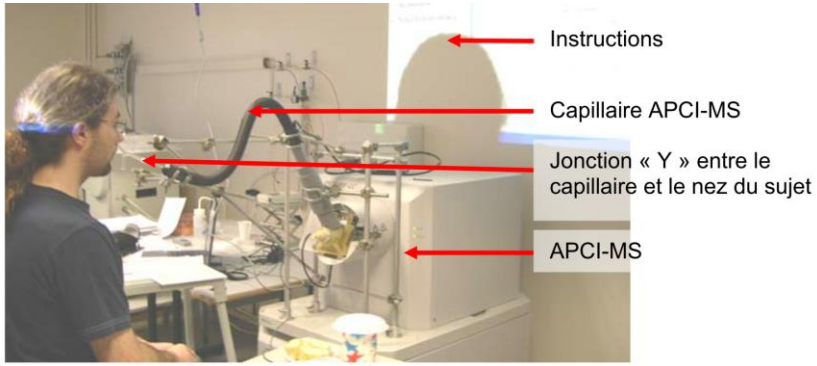
<u>Coef. de transfert de matière</u> (m/s)

<u>Coef. de partage</u> :

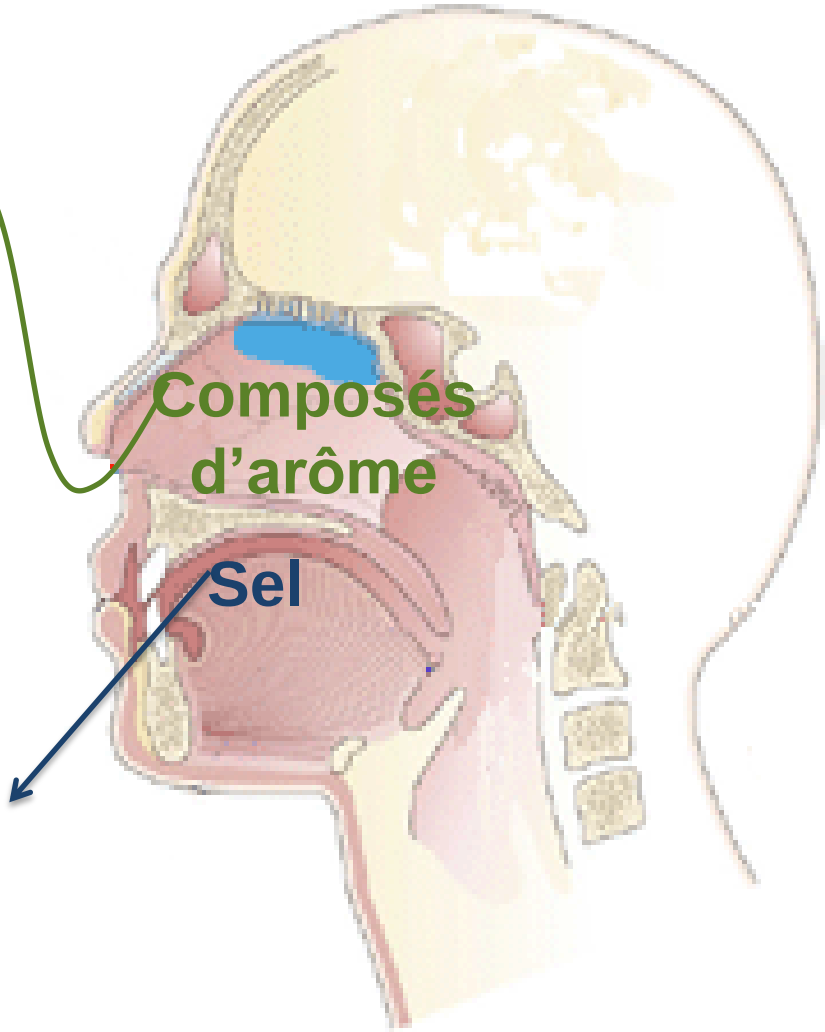
Répartition des concentrations à l'équilibre

Mesures de la libération des stimuli

Spectrométrie de Masse par Réaction de Transfert de Proton
(PTR-MS)
Lindinger et al., 1998



Prélèvements de salive
Davidson et al., 1998, 2000
Electrode in situ
Neyraud et al. 2003

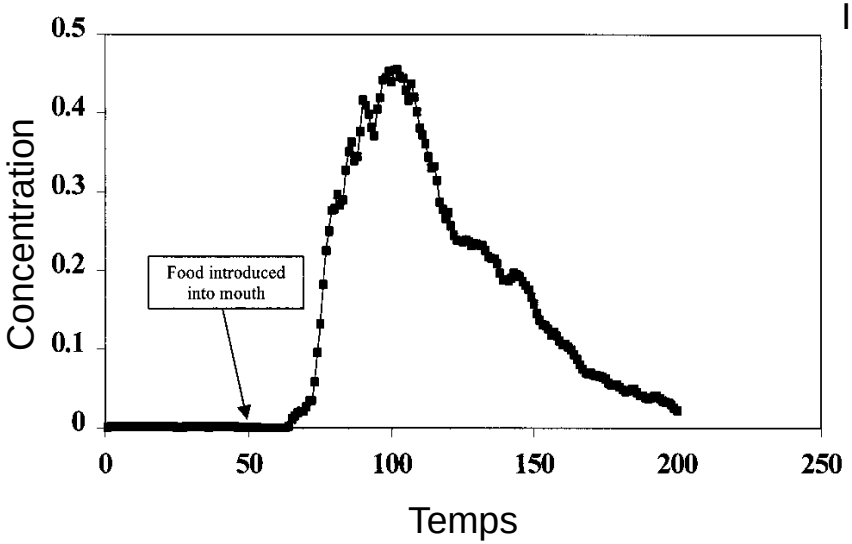


Processus oral

1- Phase buccale

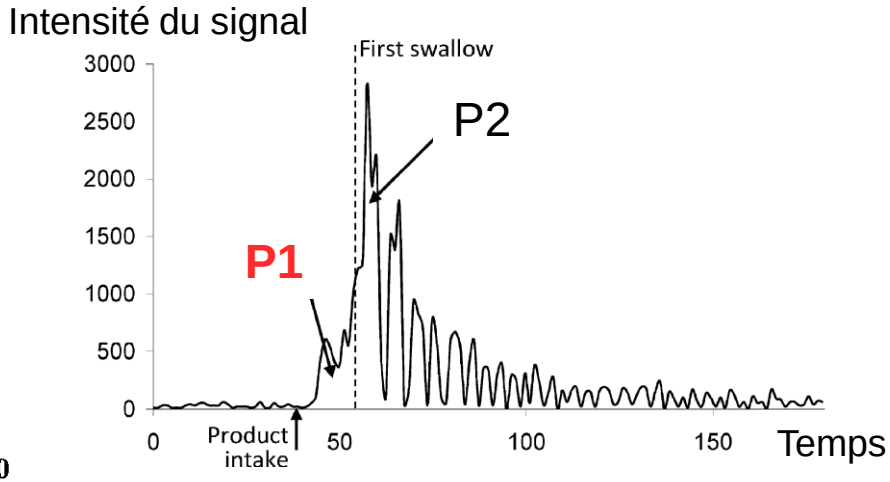
Mastication → Déstructuration du produit
→ Fermeture/Ouverture du voile du palais (Buettner et al., 2002)

Libération du sel dans la salive



Davidson et al., 1998

Libération des composés d'arôme dans la cavité nasale

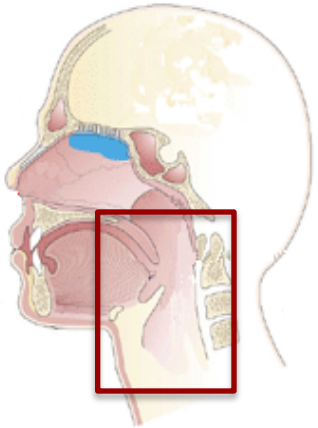


Lauverjat et al., 2009

Processus oral

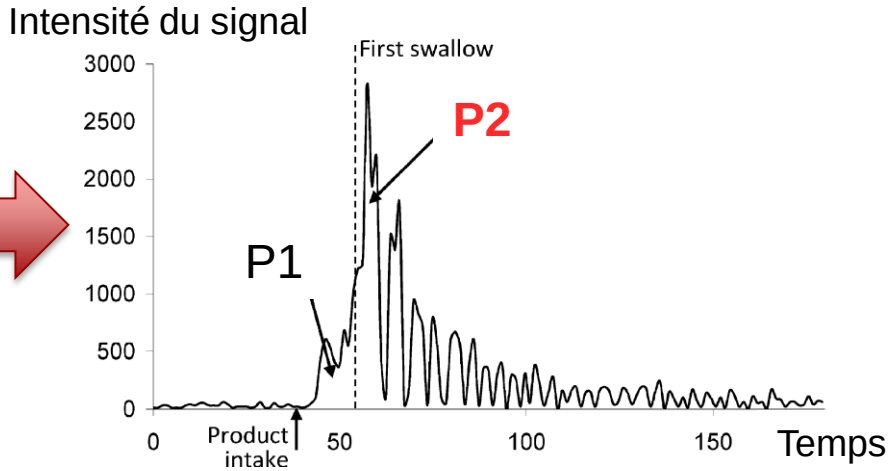
2- Phase pharyngée

Déglutition → Enduction des muqueuses pharyngées (Buettner et al., 2002)



Levine et al., 1989

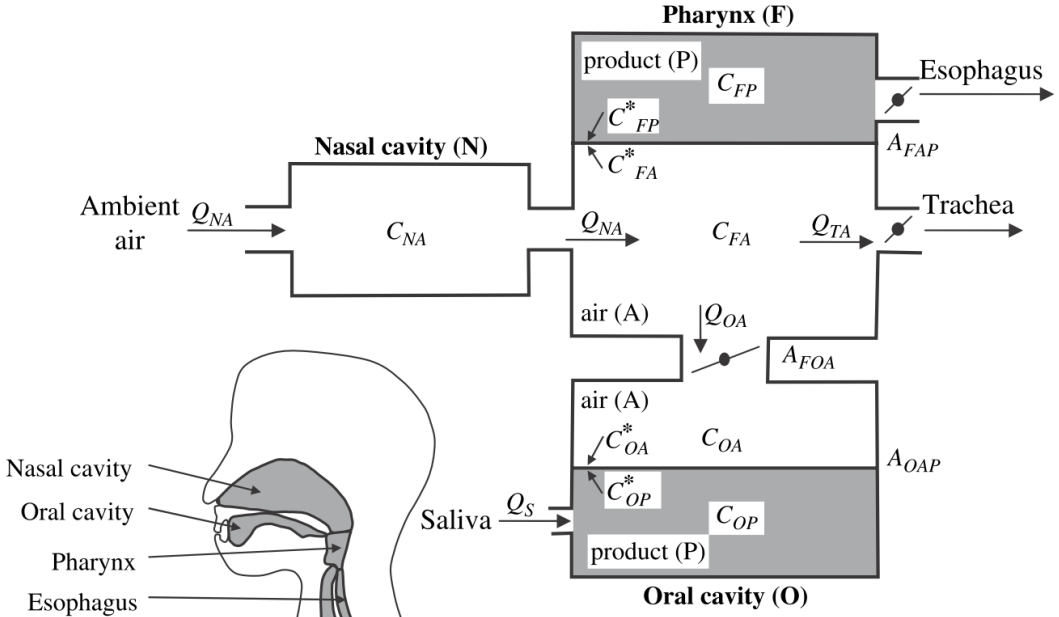
Libération des composés d'arôme dans la cavité nasale



Lauverjat et al., 2009

Modèles mécanistiques et prédictifs

Sphère oro-naso-pharyngée = Compartiments échangeant de la matière
Prise en compte :
1. des transferts de matière
2. de la physiologie (séquences, volumes de cavités)
(Harrisson et al., 1998 ; Wrigth et al., 2003 ; Atlan, 2006 ; Tréléa et al., 2008)



Atlan 2006
Tréléa et al., 2008

Identification des paramètres clef expliquant la libération des stimuli

Paramètres clef

Modèle Atlan (2006) et Tréléa et al. (2008) : 15-20 paramètres

Produit :

Coef. de transfert
Coef. de partage
Concentration

Individu :

Volumes et surfaces des cavités
Flux respiratoire, salivaire

Interactions produit / individu

Rhéologie / Sollicitations mécaniques

Phase buccale

Surface de contact produit / salive

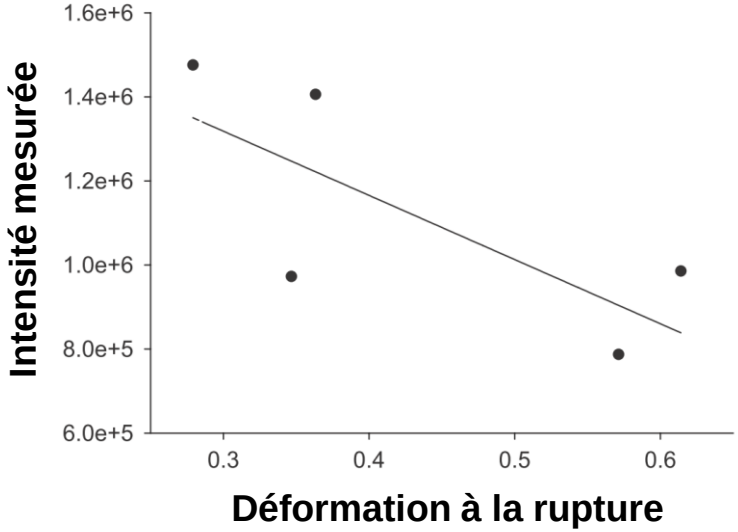
Phase pharyngée

Épaisseur de produit résiduelle

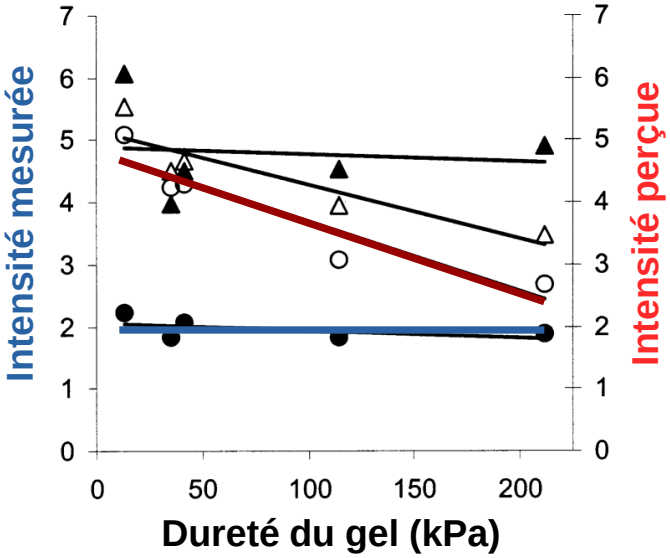
Libération des stimuli

Rôle de la rhéologie sur la libération ?

Phase buccale : produits « solides »



Gels d'hydrocolloïdes, Koliandris et al. (2008)



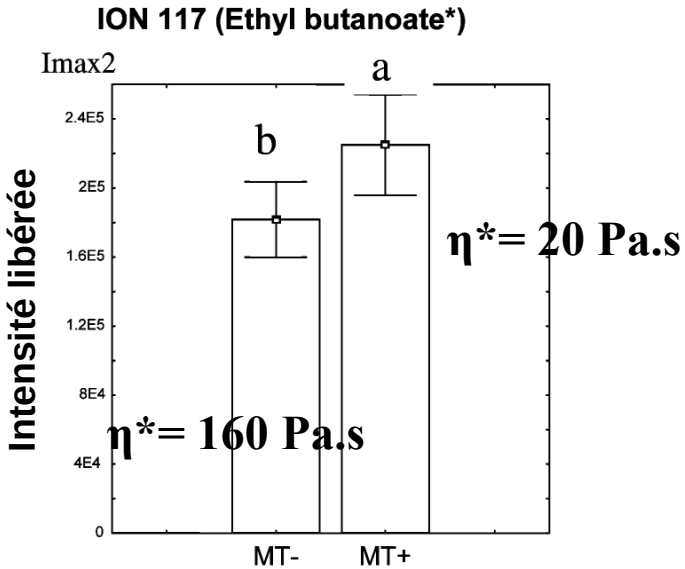
Gels de protéines, Weel et al. (2002)

→ Interactions sensorielles texture / arôme
→ Protocole libre / imposé
→ Adaptation du comportement du sujet à la rhéologie (Boland et al. 2006)

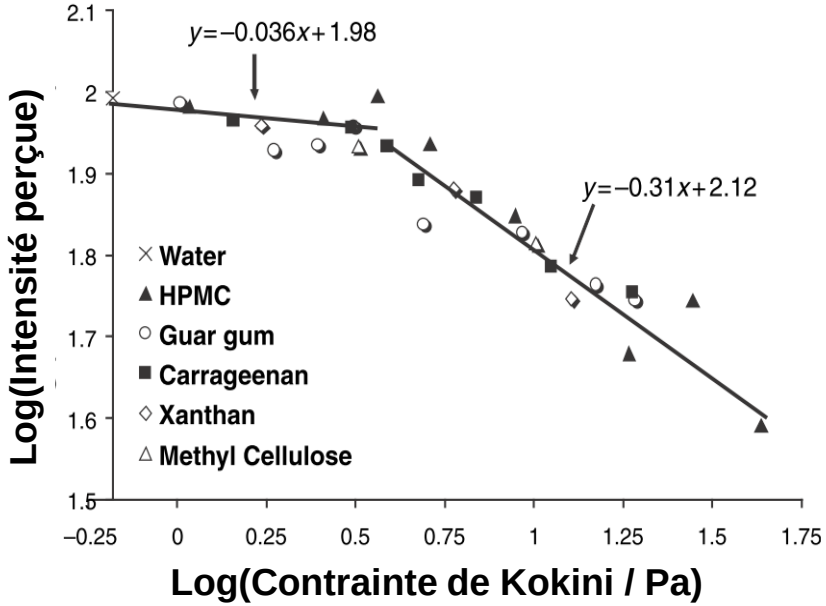
Quelle est la part relative de la physiologie de l'individu et des propriétés du produit sur la déstructuration ?

Rôle de la rhéologie sur la libération ?

Phase pharyngée : **produits « liquides » et « semi-liquides »**



Yaourts, Saint Eve et al. (2006)



Hydrocolloïdes, Cook et al. (2005)

Pas de consensus :

→ Nature variée des propriétés rhéologiques
→ Interactions sensorielles texture / arôme
→ Effets rhéologiques et physico-chimiques couplés

Quel est le rôle de la viscosité newtonienne sur l'enduction des muqueuses et la libération des composés d'arôme ?

Objectif

Bilan de l'état de l'art :

- Paramètres inaccessibles directement.
- Difficulté de découpler les phénomènes physiques et physico-chimiques expérimentalement.
- Connaissances morcelées.
- Pas d'intégration de l'ensemble des aspects liés à l'interaction entre le produit et l'individu.

Quels sont les mécanismes liés à l'interaction entre le produit et l'individu expliquant la libération des stimuli ?

Démarche adoptée

I. Phase buccale

Dynamiques de libération et de perception du sel

↓

Modèle de libération après déstructuration

↓

Application *in vivo*

II. Phase pharyngée

Dynamiques de libération des composés d'arôme

↓

Modèle d'enduction lors de la déglutition

↓

Application *in vivo*

Qu'est-ce qui explique les dynamiques de perception et de libération ?

Mécanismes physiques et paramètres clef expliquant les interactions produit / individu

Résultats

I. Phase buccale

Dynamiques de libération et de perception du sel

↓

Modèle de libération après déstructuration

↓

Application *in vivo*

II. Phase pharyngée

Dynamiques de libération des composés d'arôme

↓

Modèle d'enduction lors de la déglutition

↓

Application *in vivo*

Qu'est-ce qui explique les dynamiques de perception et de libération ?

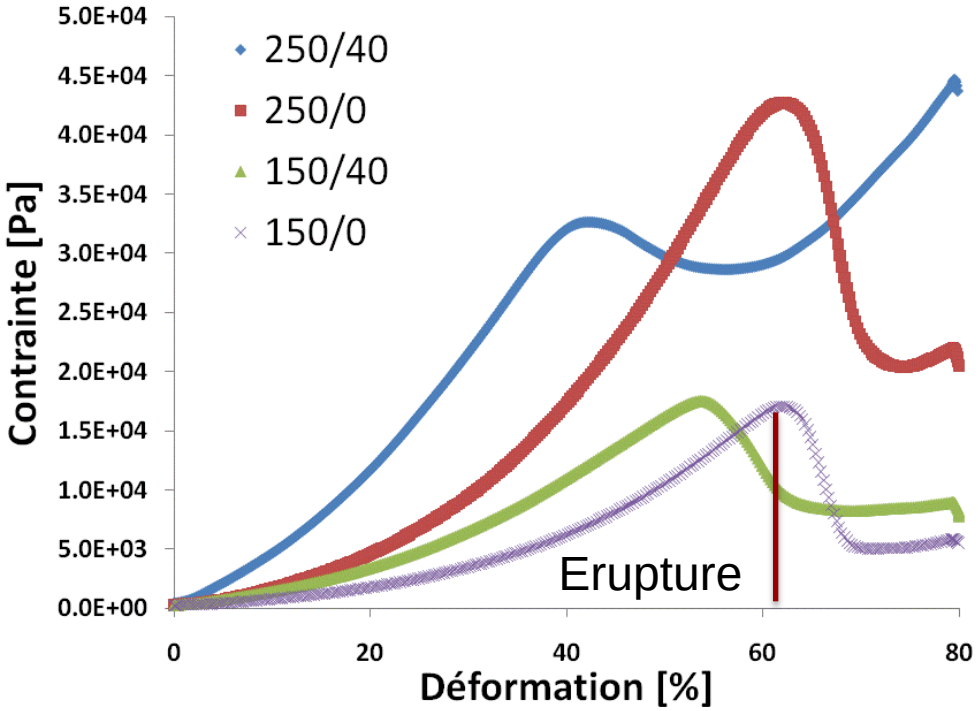
Mécanismes physiques et paramètres clef expliquant les interactions produit / individu

Composition des gels laitiers

4 produits :

- NaCl (1%)
- Poudre de rétentat de lait (150 ou 250 g/kg)
- Gras (0 ou 40 g/100g MS)

Code:
250/40
250/0
150/40
150/0



1 mm/s, Panouillé et al. 2010

Résultats

I. Phase buccale

Dynamiques de libération et de perception du sel

↓

Modèle de libération après déstructuration

↓

Application *in vivo*

II. Phase pharyngée

Dynamiques de libération des composés d'arôme

↓

Modèle d'enduction lors de la déglutition

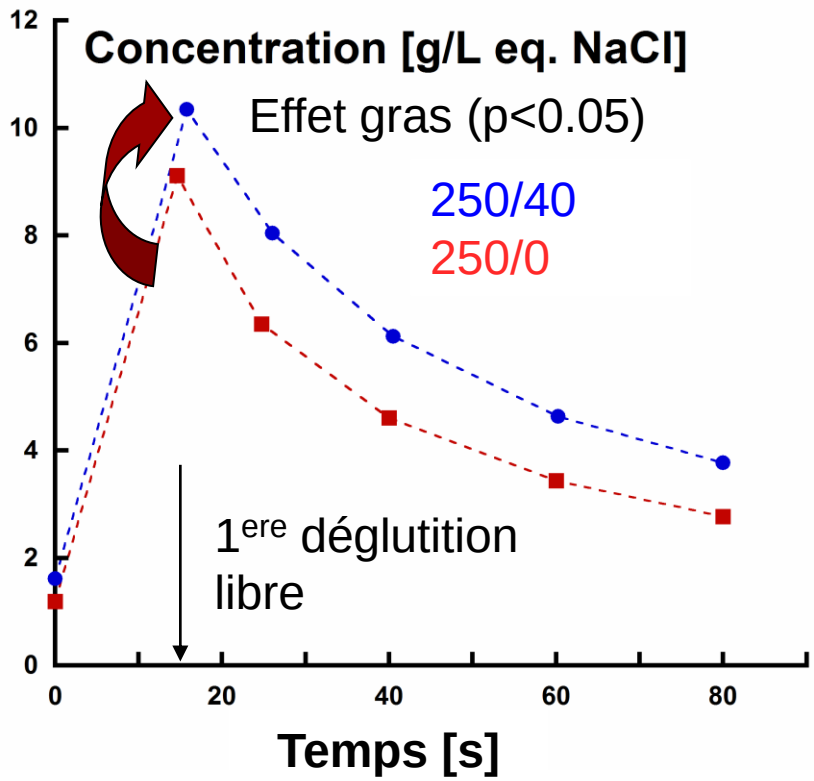
↓

Application *in vivo*

Mécanismes physiques et paramètres clef expliquant les interactions produit / individu

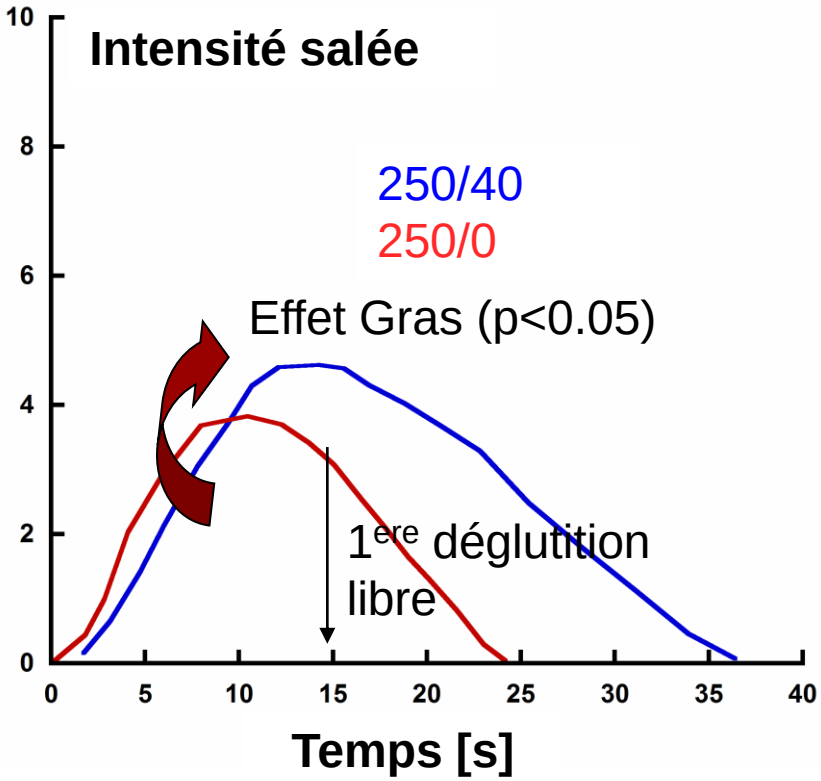
Libération et de perception du sel

Libération du sel dans la salive



Moyennes sur 8 sujets x 4 répétitions

Perception salée



Moyennes sur 16 sujets x 3 répétitions

Quelles propriétés expliquent la libération et la perception ?

Résultats

I. Phase buccale

Dynamiques de libération et de perception du sel

↓

Modèle de libération après déstructuration

↓

Application *in vivo*

II. Phase pharyngée

Dynamiques de libération des composés d'arôme

↓

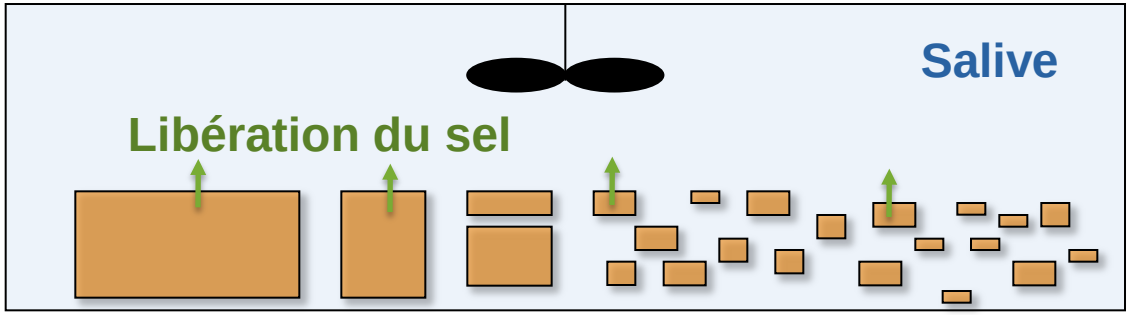
Modèle d'enduction lors de la déglutition

↓

Application *in vivo*

Mécanismes physiques et paramètres clef expliquant les interactions produit / individu

Modèle de libération du sel



Mastication

Temps court en bouche (<1 min) → **Théorie interfaciale**

(Harrison, 1998)

$$\frac{dM_s}{dt} = k_p A \left(K C_p(t) - C_s(t) \right)$$

Flux de sel (g/s)

Coef. de transfert (m/s)

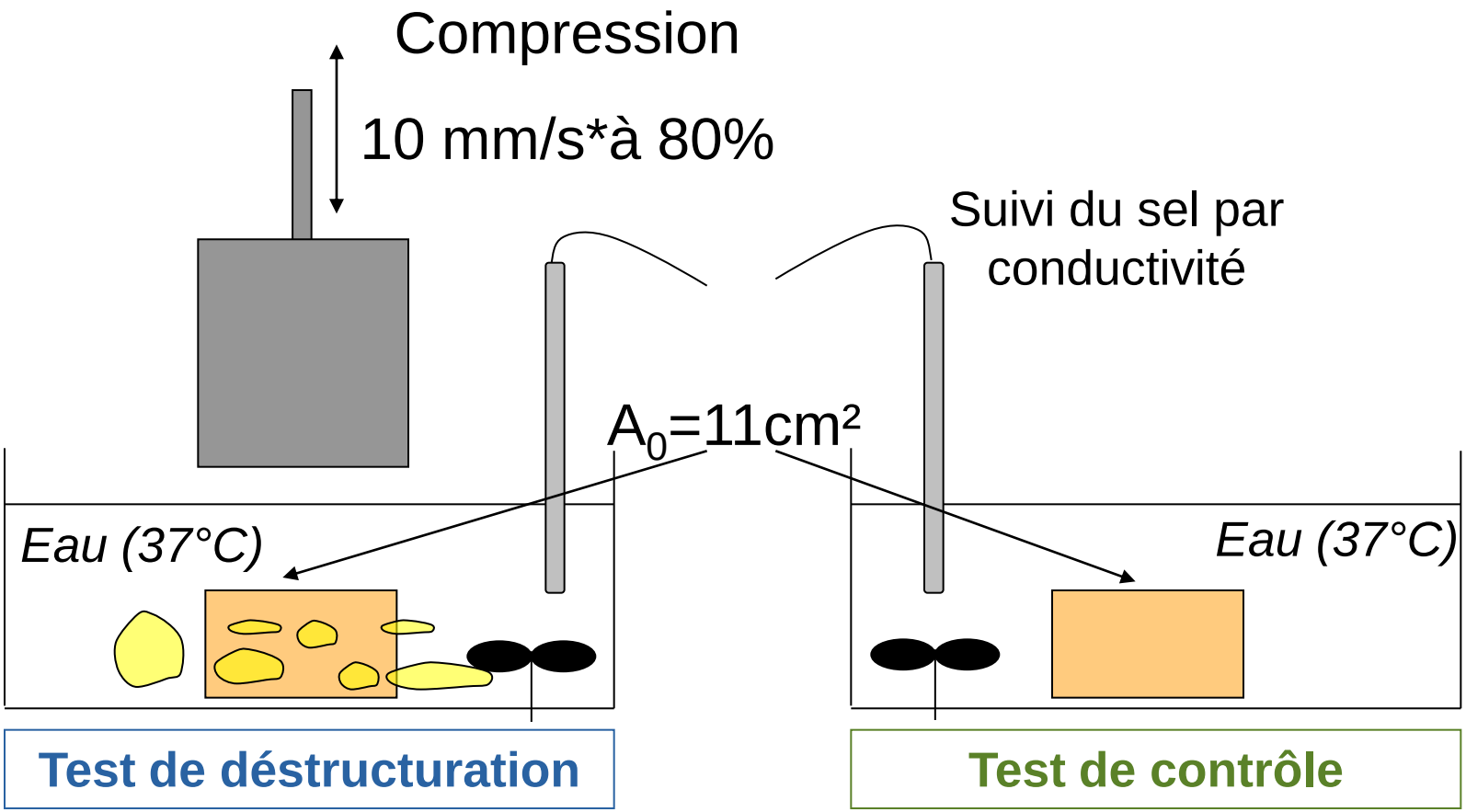
Surface de contact (m²)

Coef. de partage

Pertinence du modèle ?

→ cinétiques de libération du sel à partir de produits fragmentés

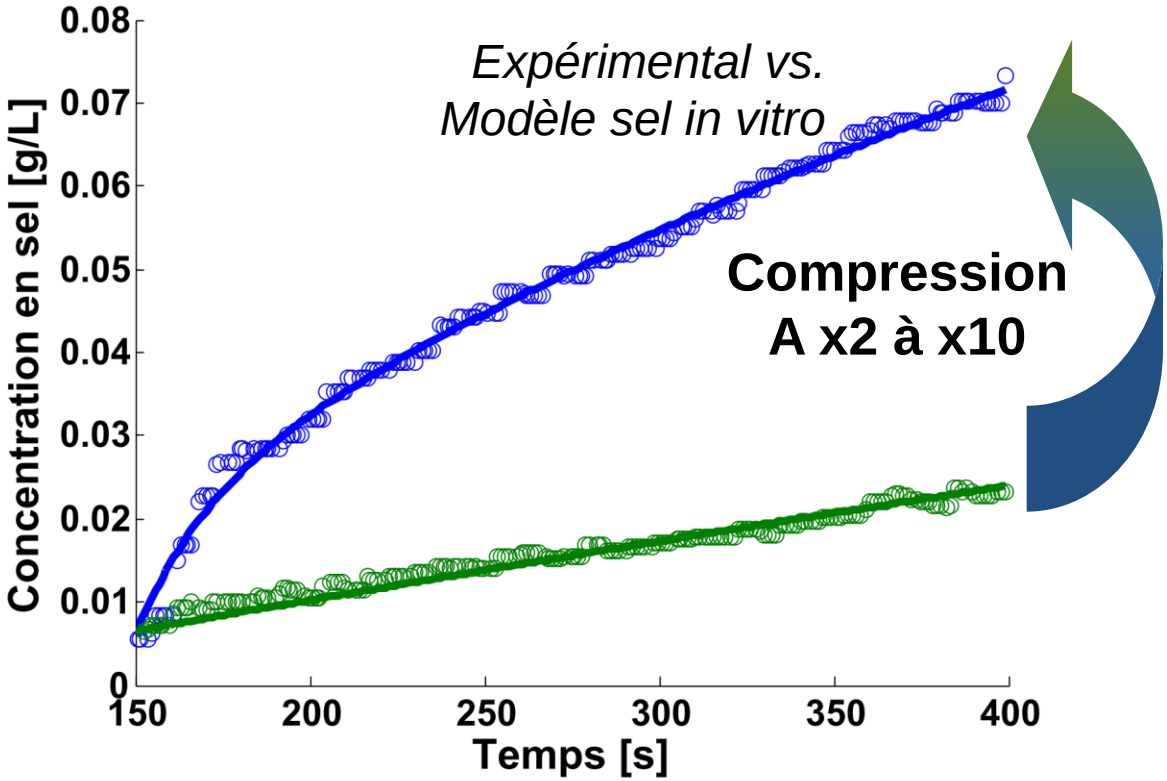
Test de déstructuration



*Foster et al. 2006; Finney et Meullenet, 2005

(Koliandris et al., 2008 ; Mills et al., 2010)

Ajustement du modèle aux données



Coef. de transfert : Test de contrôle ($k_p \approx 2.10^{-6}$ m/s)

Surface de contact : Test de déstructuration ($A \approx 20\text{-}100$ cm²)

Cinétique plus rapide : surface de contact plus grande
Accord avec la théorie interfaciale

Produits après compression

250/0
Surface=36 3 cm²

250/40
Surface=120 30 cm²

Pour des extraits secs élevés, l'ajout de matière grasse augmente la fragmentation

Résultats

I. Phase buccale

Dynamiques de libération et de perception du sel

↓

Modèle de libération après déstructuration

↓

Application *in vivo*

II. Phase pharyngée

Dynamiques de libération des composés d'arôme

↓

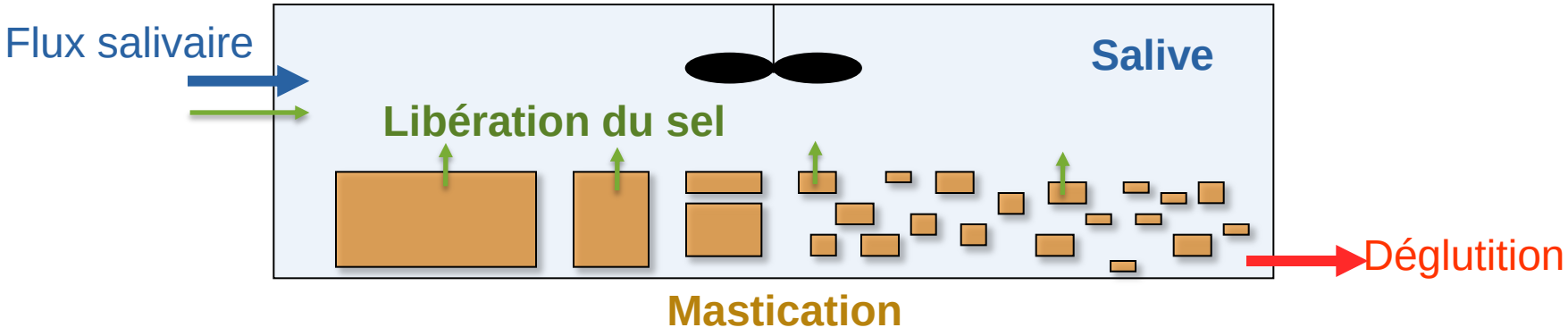
Modèle d'enduction lors de la déglutition

↓

Application *in vivo*

Mécanismes physiques et paramètres clef expliquant les interactions produit / individu

Modèle de libération du sel *in vivo*



$$V_s(t)\frac{dC_s}{dt} = k_p A(t)\left(KC_p(t) - C_s(t)\right) + \boxed{Q_s\left(C_Q - C_s(t)\right)}$$

Volume de salive (m^3)

Coef. de transfert (m/s)

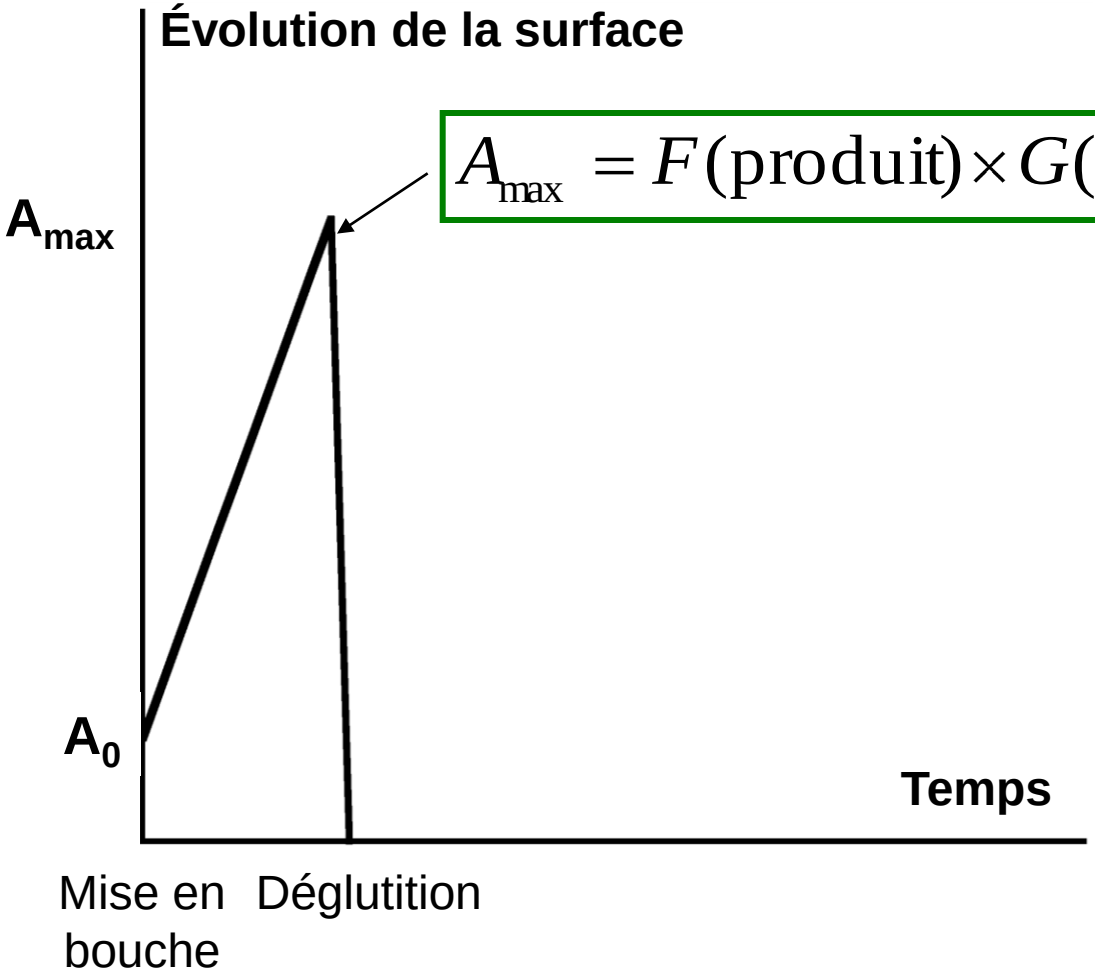
Coef. de partage

Flux salivaire (m^3/s)

Sel apporté par la salive (g/m^3)

Évolution de la surface ?

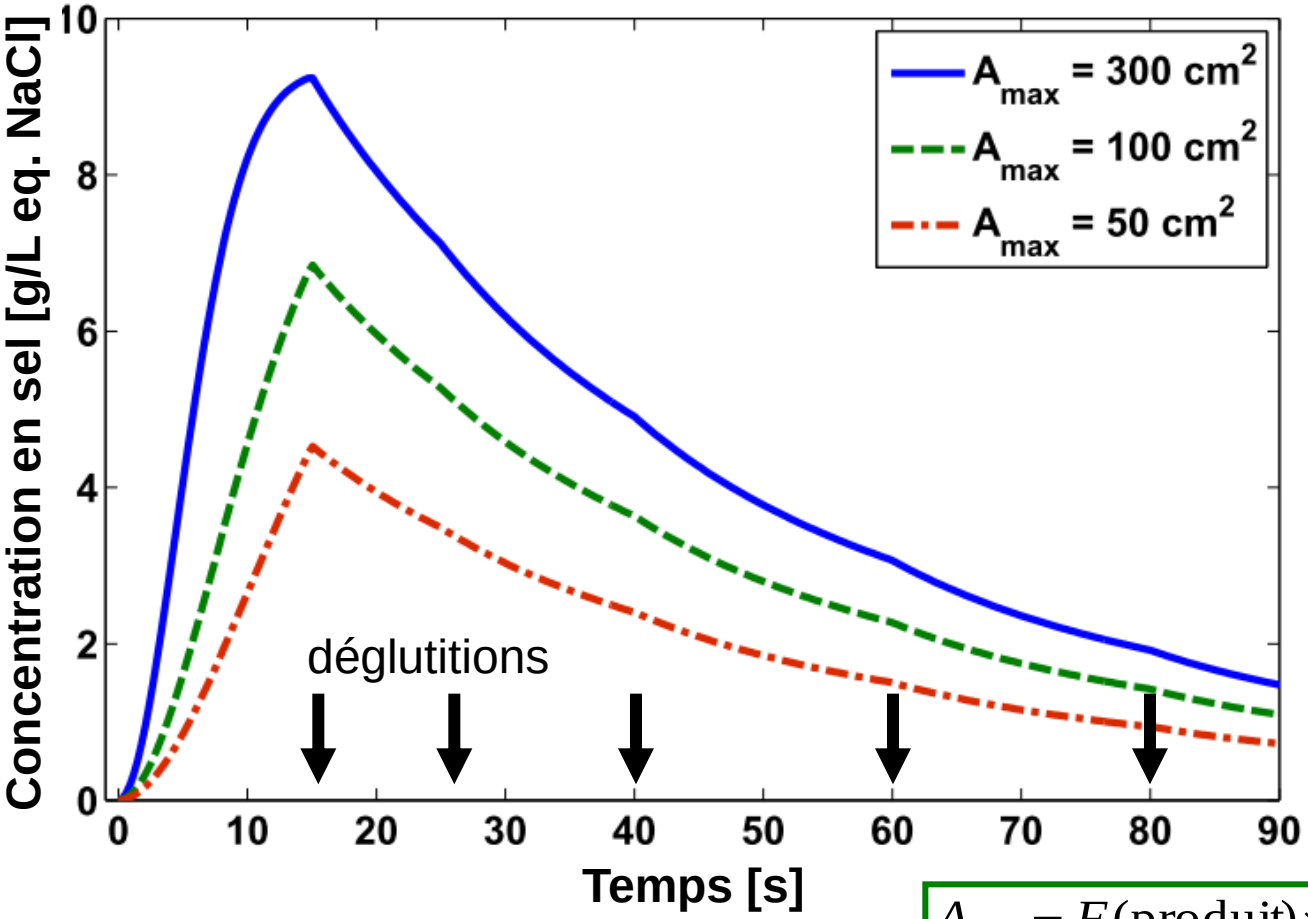
Hypothèses sur l'évolution de la surface



La surface maximale dépend du produit et du sujet

Rôle de la surface sur la libération

Modèle sel in vivo



$$A_{max} = F(\text{produit}) \times G(\text{sujet})$$

F et G : paramètres libres du modèle ajustés aux données expérimentales

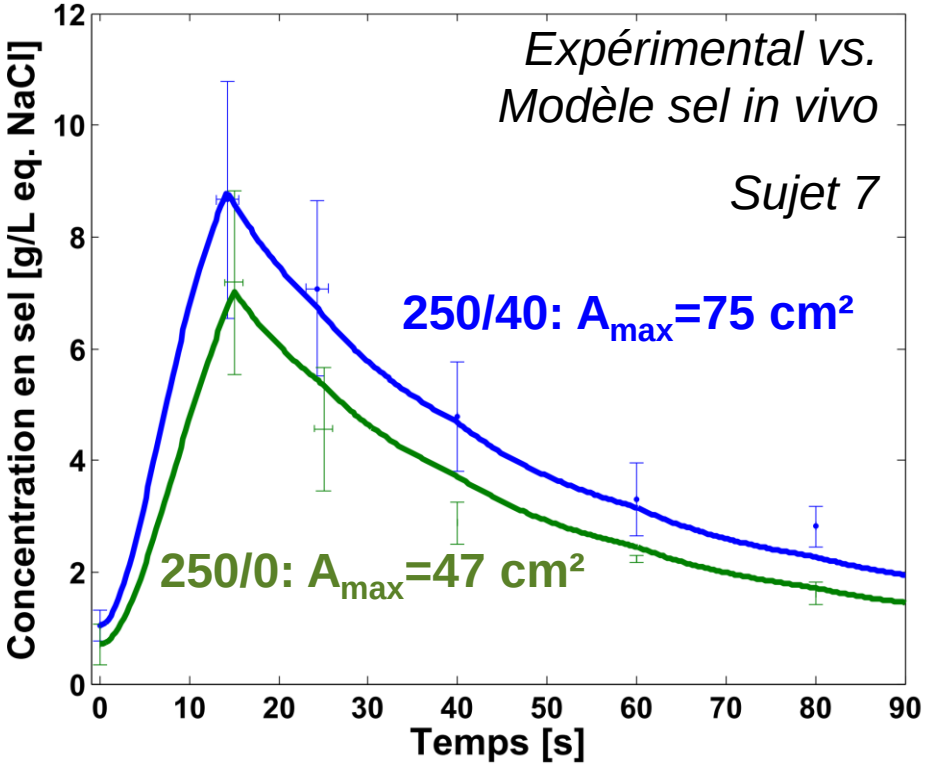
Influence du produit

$$A_{max} = \boxed{F(\text{produit})} \times G(\text{sujet})$$

In vivo F x1.5

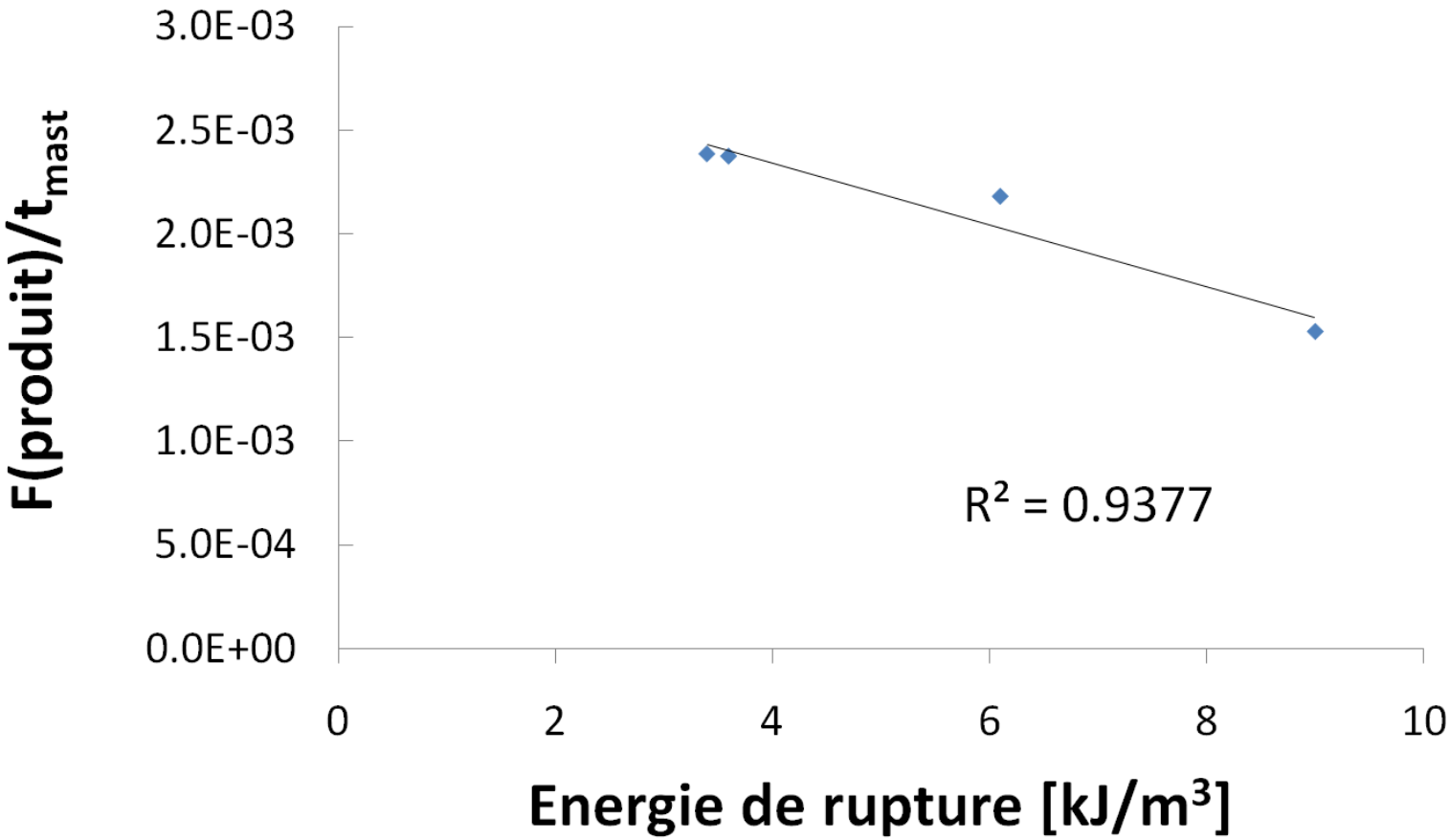
250/0 **250/40**

In vitro A x3



État de déstructuration avant déglutition :
adaptation de la durée de la mastication selon le produit

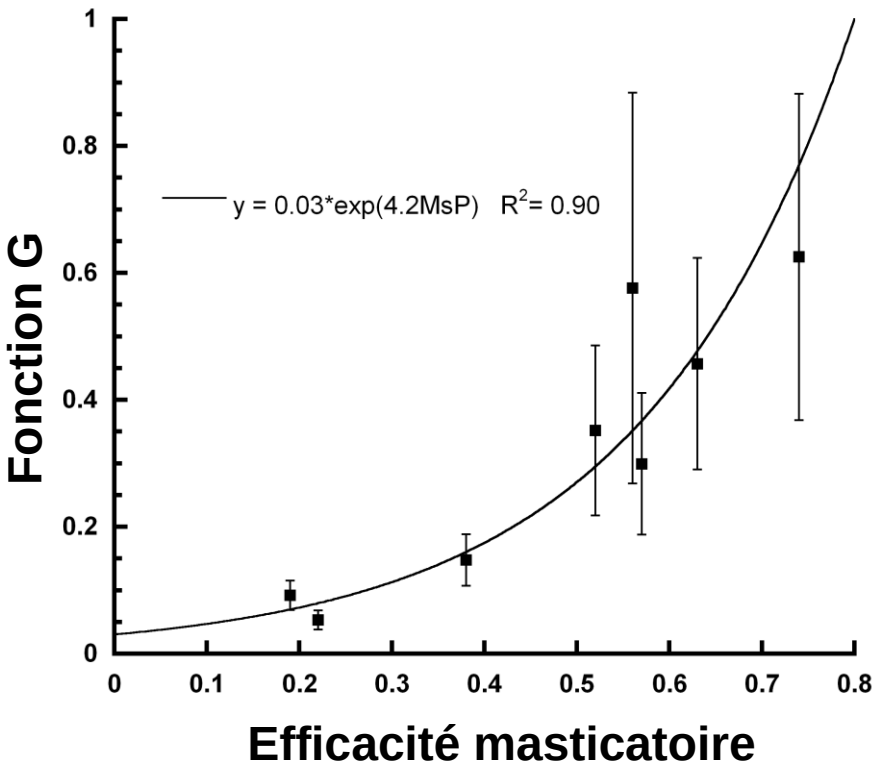
Influence du produit



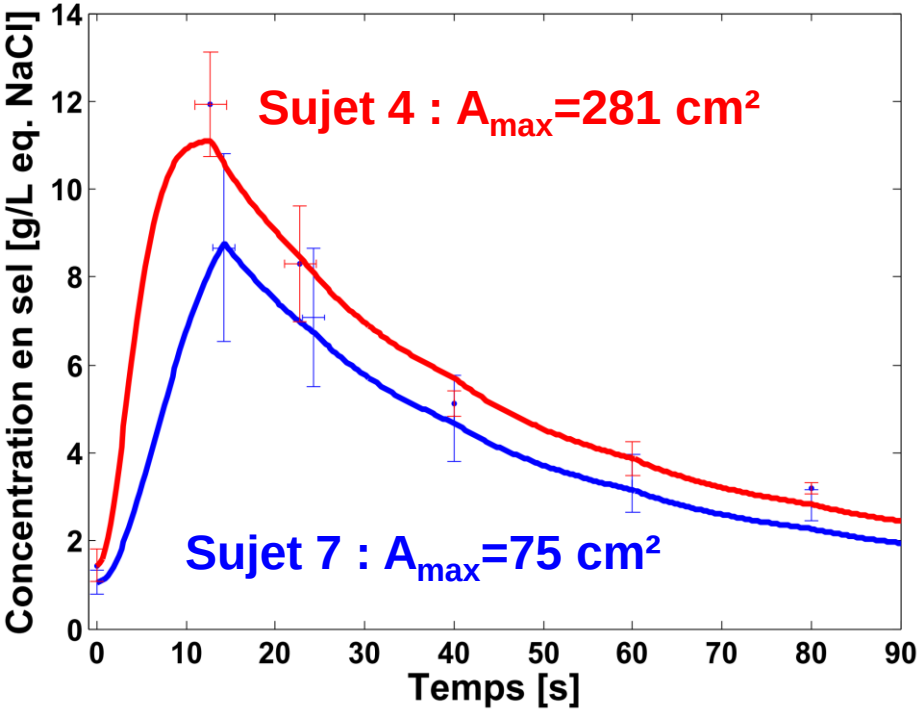
La dynamique de génération de surface s'explique par l'énergie à la rupture du gel.

Influence du sujet

$$A_{max} = F(\text{produit}) \times \boxed{G(\text{sujet})}$$



Expérimental vs. Modèle sel in vivo



A_{max} évolue avec l'efficacité masticatoire du sujet

Mécanismes et paramètres clefs

Modèle *in vivo* de libération du sel :

→Différences de dynamiques de libération : **déstructuration du produit appréhendable par un test *in vitro***

→Rôle prépondérant de **l'efficacité masticatoire**

Démarche adoptée

I. Phase buccale

Dynamiques de libération et de perception du sel

↓

Modèle de libération après déstructuration

↓

Application *in vivo*

II. Phase pharyngée

Dynamiques de libération des composés d'arôme

↓

Modèle d'enduction lors de la déglutition

↓

Application *in vivo*

Mécanismes physiques et paramètres clef expliquant les interactions produit / individu

Solutions de sirop de glucose

- ✓ Fluide alimentaire
- ✓ Fluides newtoniens

  effets visqueux sur l'enduction
- ✓ 2 composés d'arôme

Diacétyle

LogP = -1.34

$K_{air\text{-}eau}$=1,2.10^{-3} (35°C)

Hexanoate d'éthyle

LogP = 2.83

$K_{air\text{-}eau}$=8,2.10^{-2} (35°C)

Matière sèche : 0% → 70%

G0 G40 G60 G70

Viscosité (35°C) : 0,7 mPa.s → 400 mPa.s

Coef. de transfert (35°C) : 1.10^{-6} m/s → 3.10^{-8} m/s

Démarche adoptée

I. Phase buccale

Dynamiques de libération et de perception du sel

↓

Modèle de libération après déstructuration

↓

Application *in vivo*

II. Phase pharyngée

Dynamiques de libération des composés d'arôme

↓

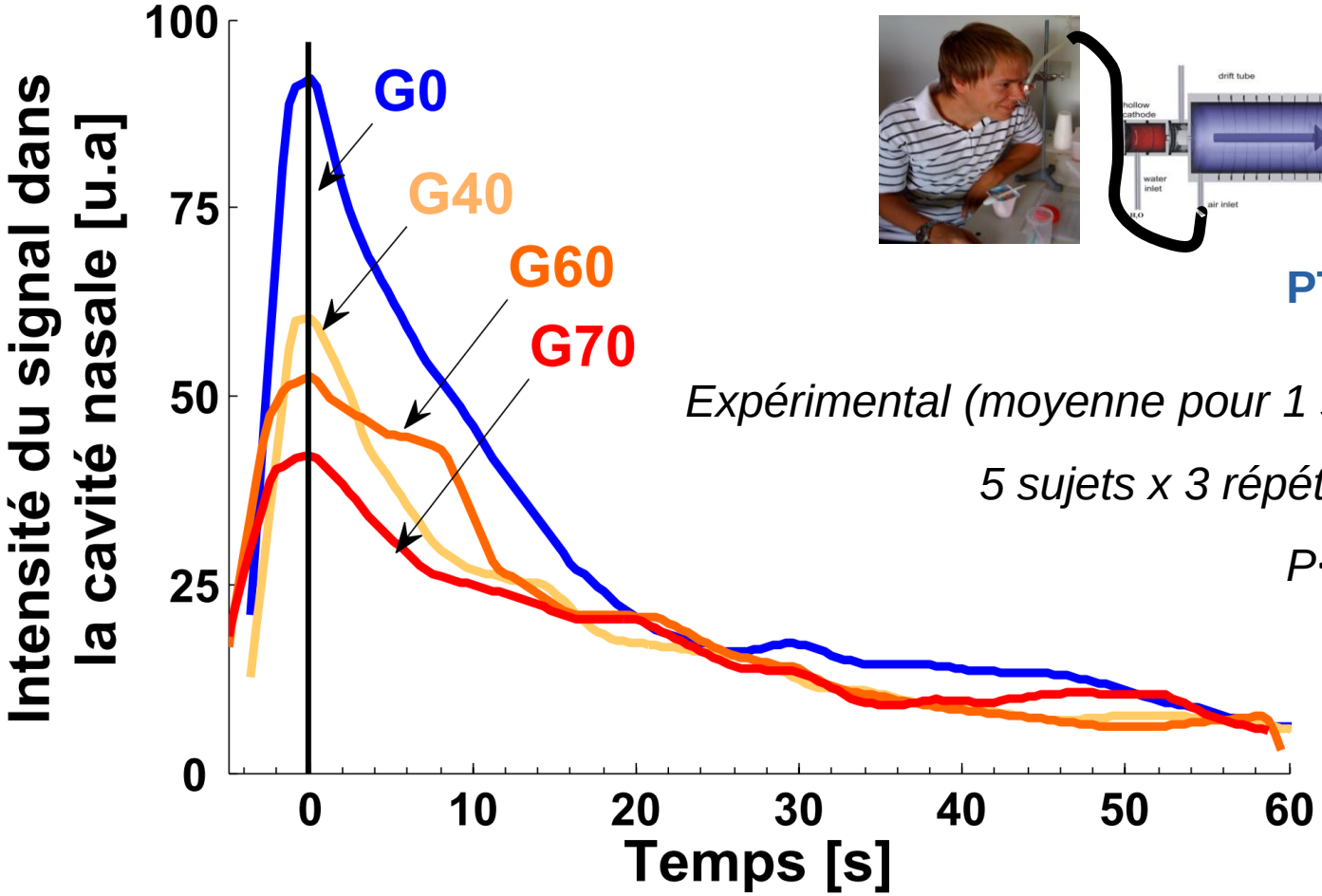
Modèle d'enduction lors de la déglutition

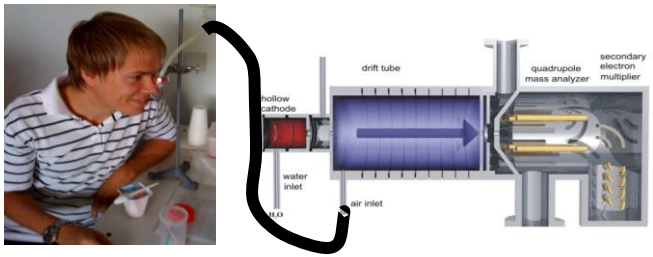
↓

Application *in vivo*

Mécanismes physiques et paramètres clef expliquant les interactions produit / individu

Libération des composés d'arôme





PTR-MS

Expérimental (moyenne pour 1 sujet)

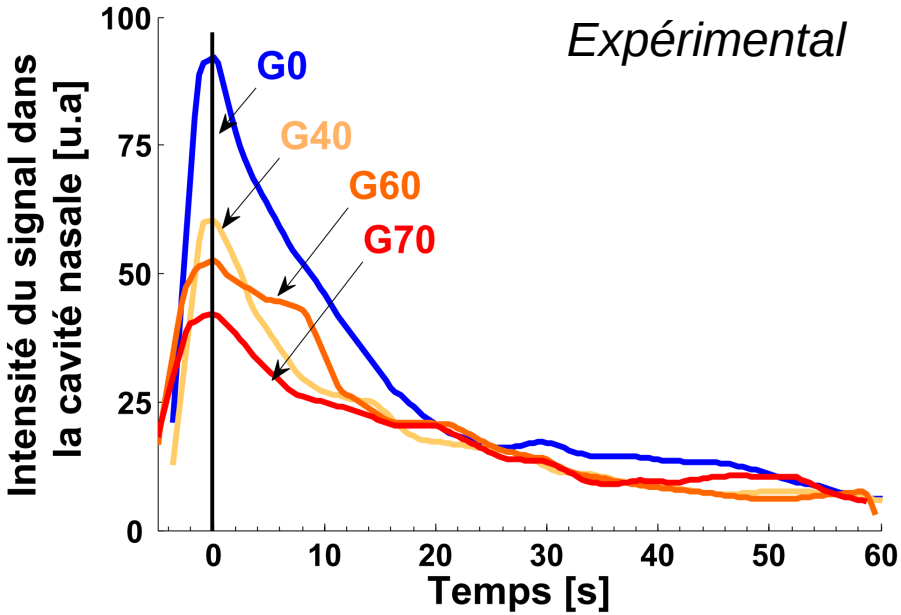
5 sujets x 3 répétitions

P<0,05

Rôle de la viscosité sur l'enduction des muqueuses ?

Comparaison modèle / expériences

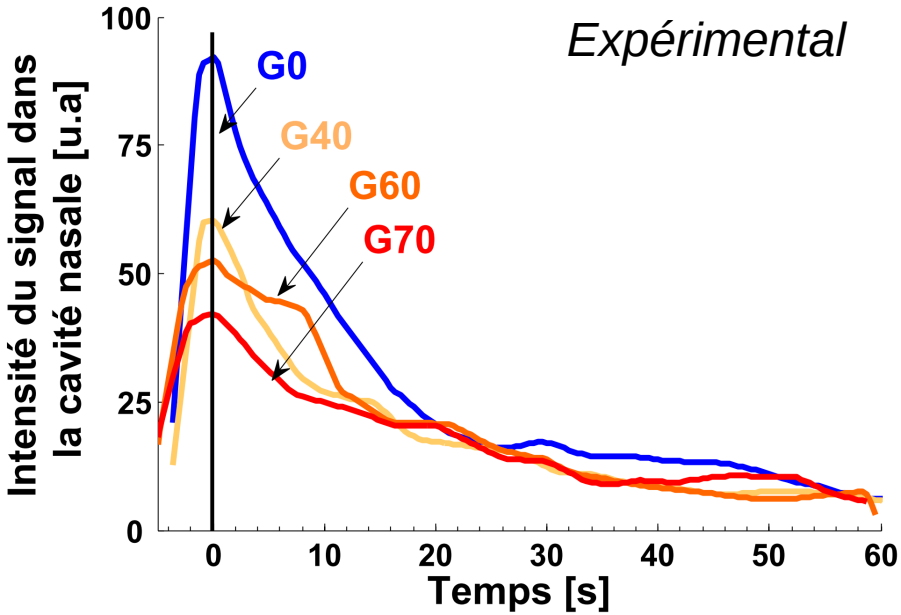
- Propriétés des solutions de glucose et des composés d'arôme prises en compte dans le modèle
- Epaisseur résiduelle dans le pharynx ajustée à la décroissance

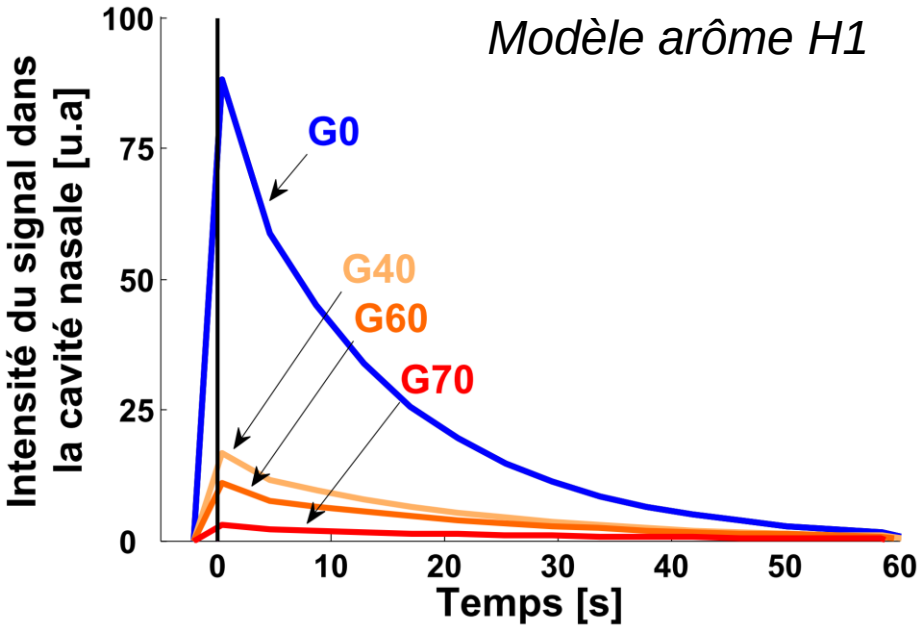


Doyennette et al., soumis

Comparaison modèle / expériences

- Propriétés des solutions de glucose et des composés d'arôme prises en compte dans le modèle
- Epaisseur résiduelle dans le pharynx ajustée à la décroissance

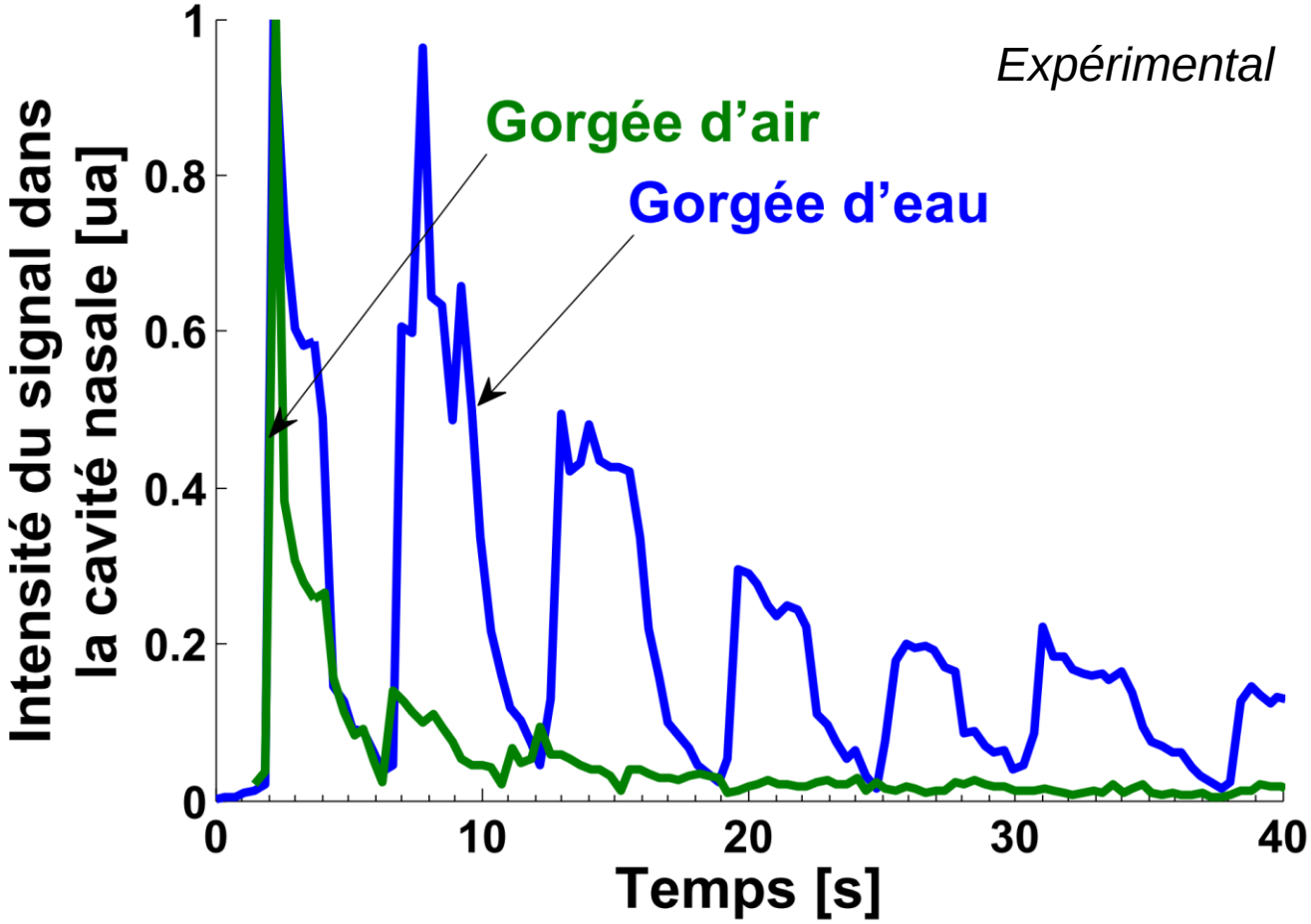




Autres phénomènes ?

Doyennette et al., soumis

Autres phénomènes ?



Phénomènes observés issus de l'enduction des muqueuses pharyngées

Résultats

I. Phase buccale

Dynamiques de libération et de perception du sel

↓

Modèle de libération après déstructuration

↓

Application *in vivo*

II. Phase pharyngée

Dynamiques de libération des composés d'arôme

↓

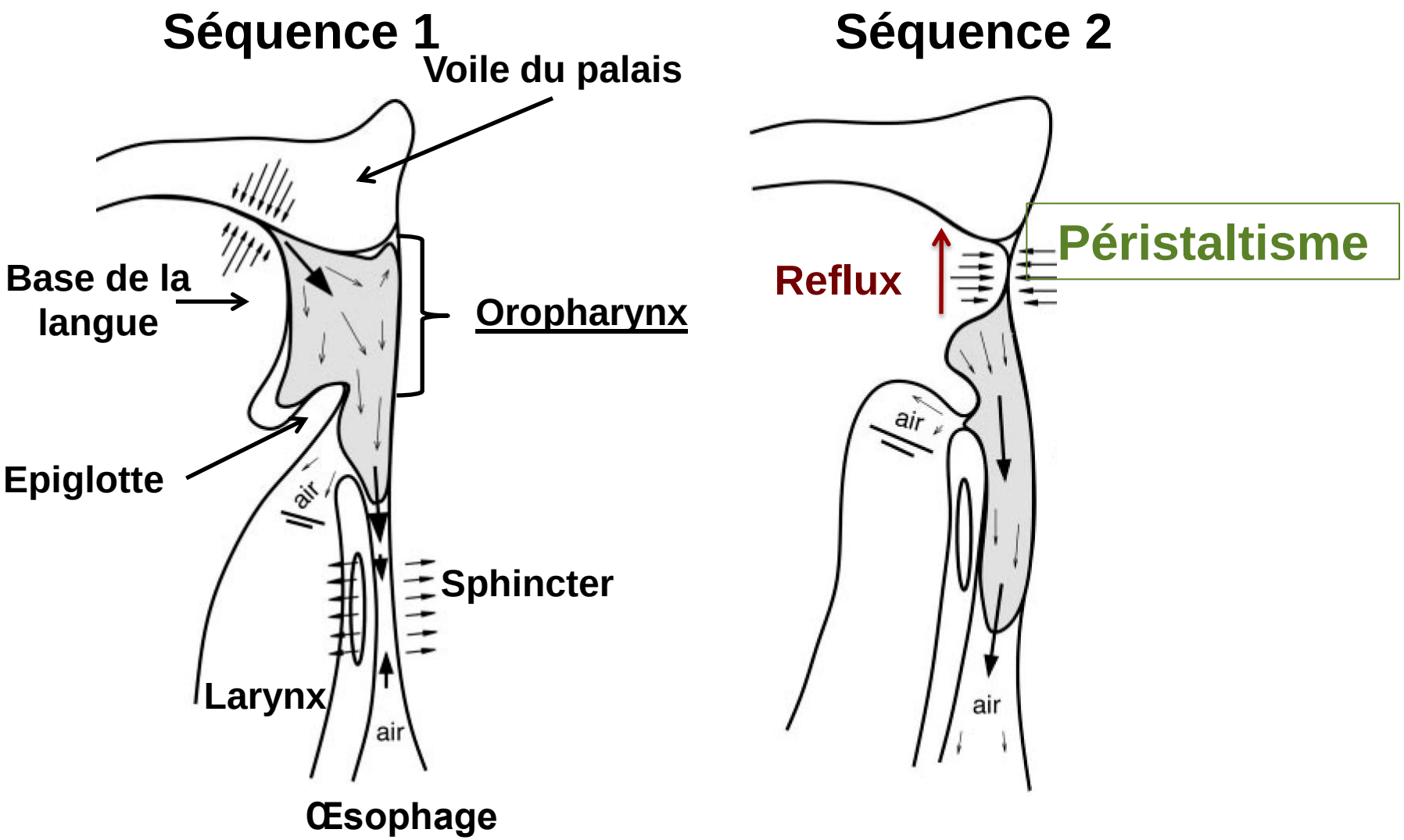
Modèle d'enduction lors de la déglutition

↓

Application *in vivo*

Mécanismes physiques et paramètres clef expliquant les interactions produit / individu

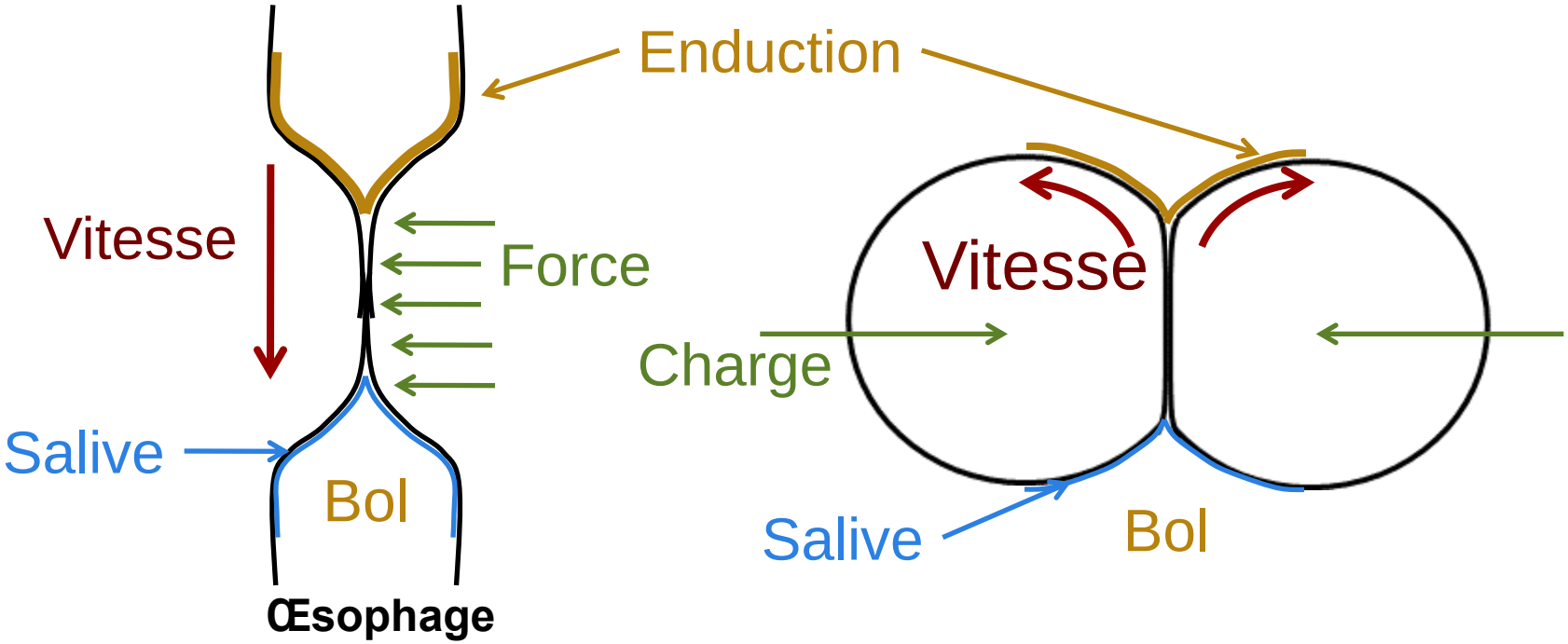
Séquences de la déglutition



Pal et al. 2003

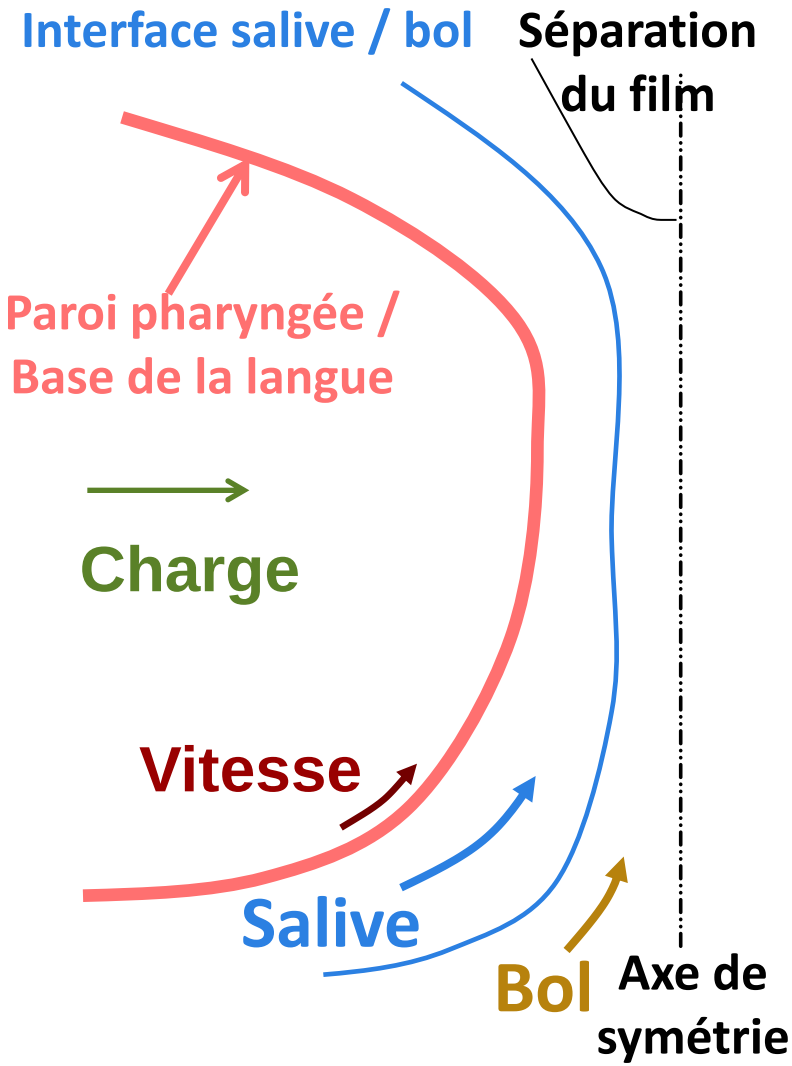
Représentation du péristaltisme

Péristaltisme ⟷ **Cylindres contrarotatifs**



- Lubrification par un film de salive
- Déformabilité des muqueuses
- Charge appliquée

Formulation du modèle



- ✓ Th. de la lubrification :

(Hamrock, 2004)

$$Re \ll \frac{\text{Longueur contact}}{\text{Jeu}}$$

- ✓ Stationnaire

$$T_{flow} \ll T_{deglu}$$

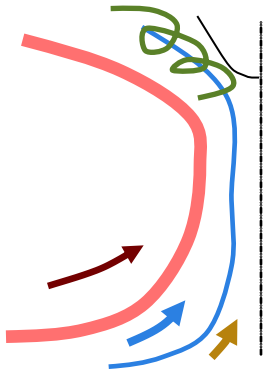
- ✓ Fluides newtoniens

- ✓ Déformabilité :

Modèle 1D CCM (Skotheim 2005)

$$p(x) \propto \Delta H(x)$$

Paramètres adimensionnels du modèle



Sortie de contact : instabilités de surface
(Chong et al., 2007)

Mélange du bol avec la salive

Entrée :

$$e_1 = \text{épaisseur de salive}$$

$$\alpha = \frac{\text{Viscosité bol}}{\text{Viscosité salive}}$$

$$E_s = \frac{\text{Effets visqueux}}{\text{Effets élastiques}}$$

$$F = \frac{\text{Effets de charge}}{\text{Effets élastiques}}$$

Sortie :

$$e = \text{épaisseur totale}$$

$$r = \text{tx de dilution}$$

Résultats

I. Phase buccale

Dynamiques de libération et de perception du sel

↓

Modèle de libération après déstructuration

↓

Application *in vivo*

II. Phase pharyngée

Dynamiques de libération des composés d'arôme

↓

Modèle d'enduction lors de la déglutition

↓

Application *in vivo*

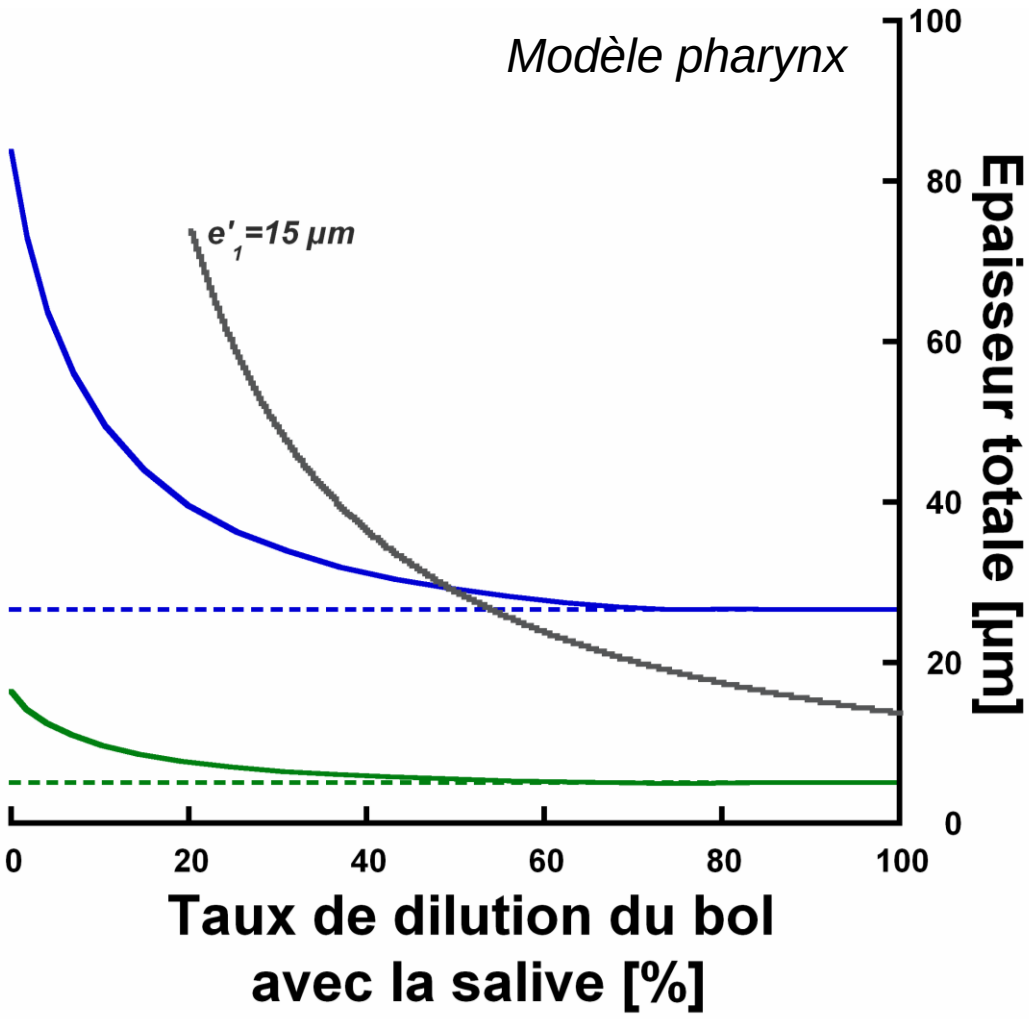
Mécanismes physiques et paramètres clef expliquant les interactions produit / individu

Paramètres physiologiques

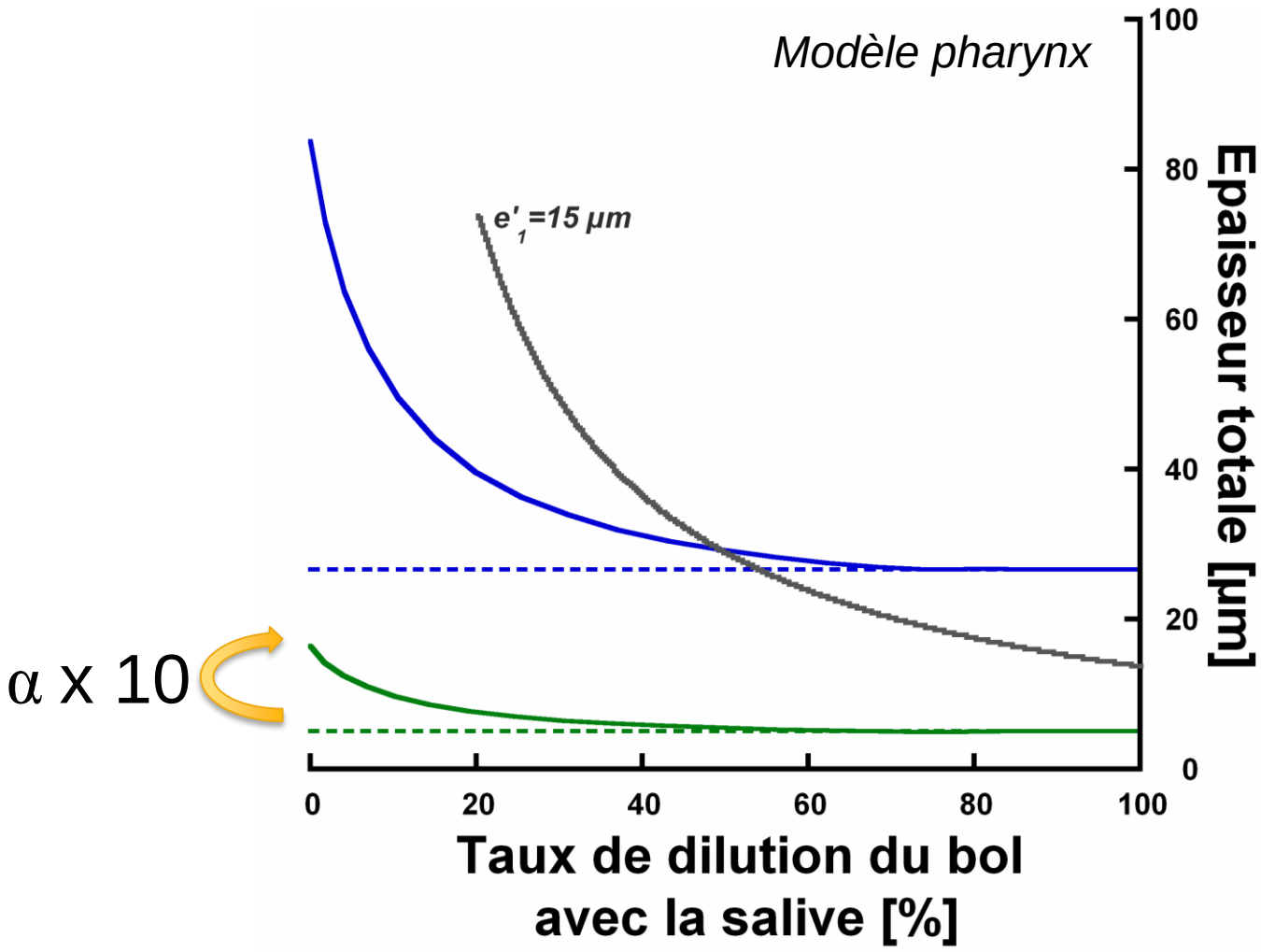
Données de la littérature nécessaires aux prédictions :

Variable	Valeur typique	Références
Viscosité de la salive	1-10 mPa.s	Schipper et al., 2007
Viscosité du bol	0,7- 400 mPa.s	Solutions de glucose
Vitesse	0,1 à 0,5 m/s	Dantas et al., 1990
Élasticité des muqueuses	20-200 kPa	Diridollou et al., 2000 Kim et al., 1998
Épaisseur des muqueuses	1-4 mm	Diridollou et al., 2000
Charge	10-60 N/m	**Estimé** de Williams et al., 2001
Rayon de courbure	40 mm	**Estimé** de Chang et al., 1998
Épaisseur de salive	Pas de données	
Paramètre de force F	3.10^{-5}	Grandes déflections, Johnson 1970
Paramètre élastique Es	8.10^{-9}	

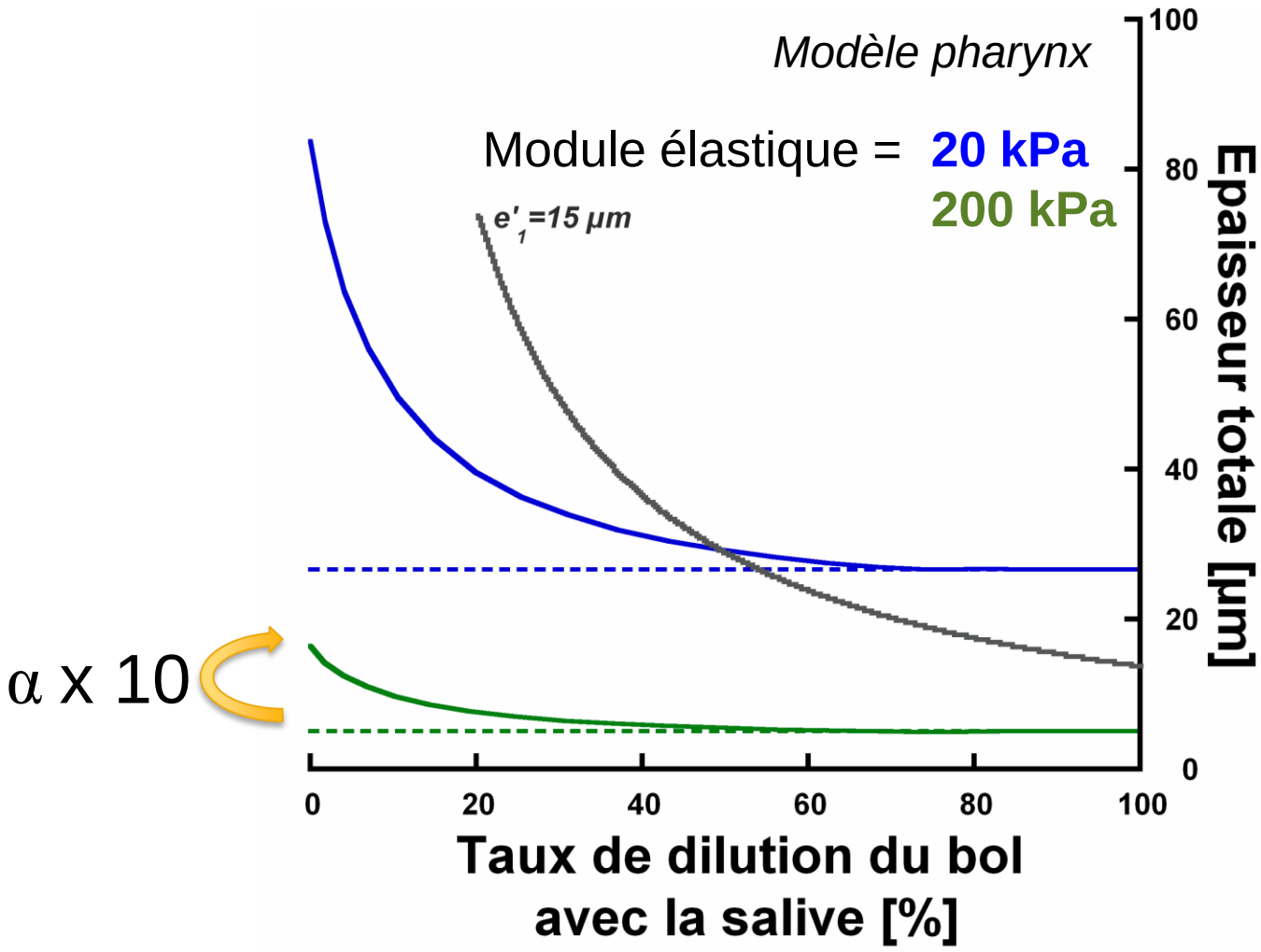
Influence de la viscosité sur l'enduction



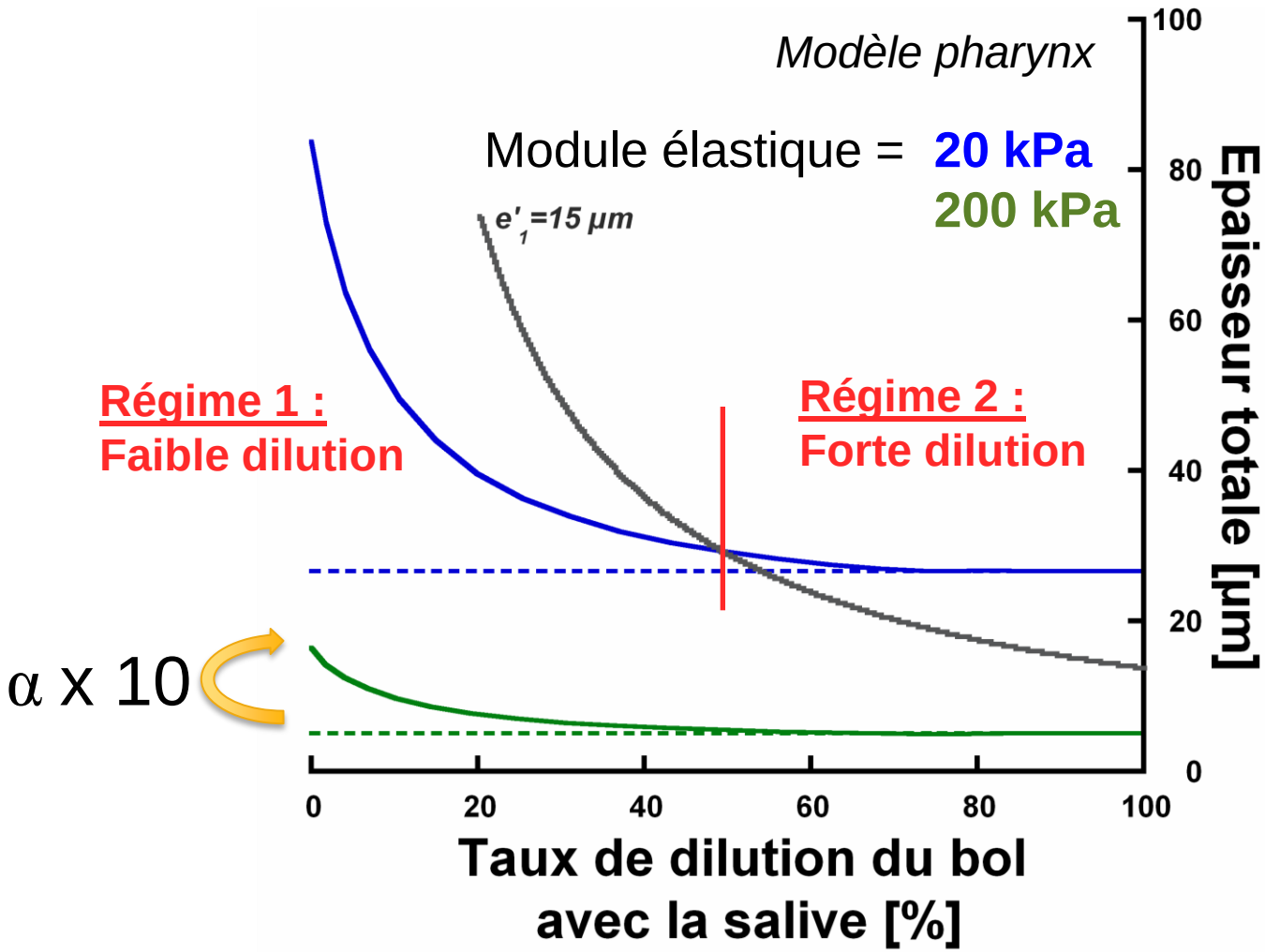
Influence de la viscosité sur l'enduction



Influence de la viscosité sur l'enduction



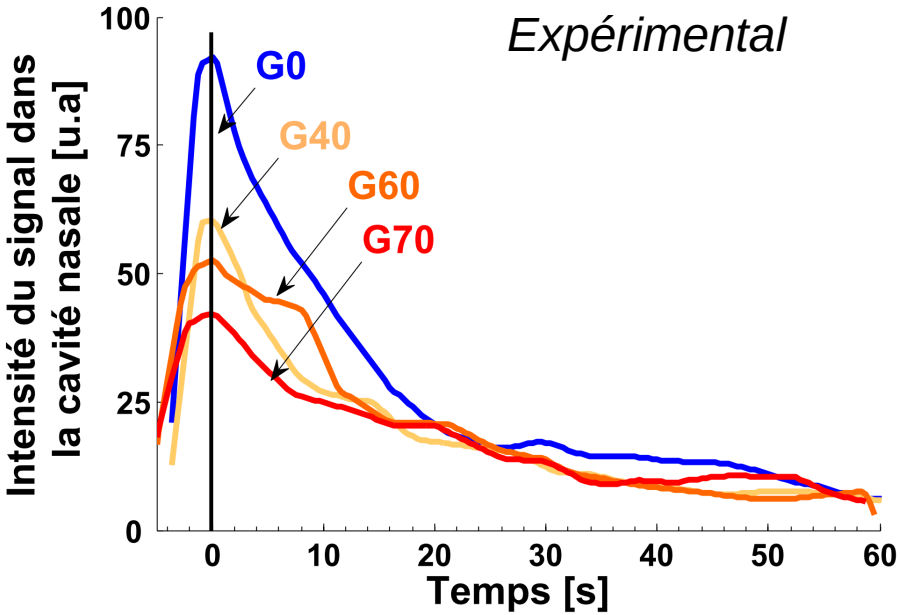
Influence de la viscosité sur l'enduction

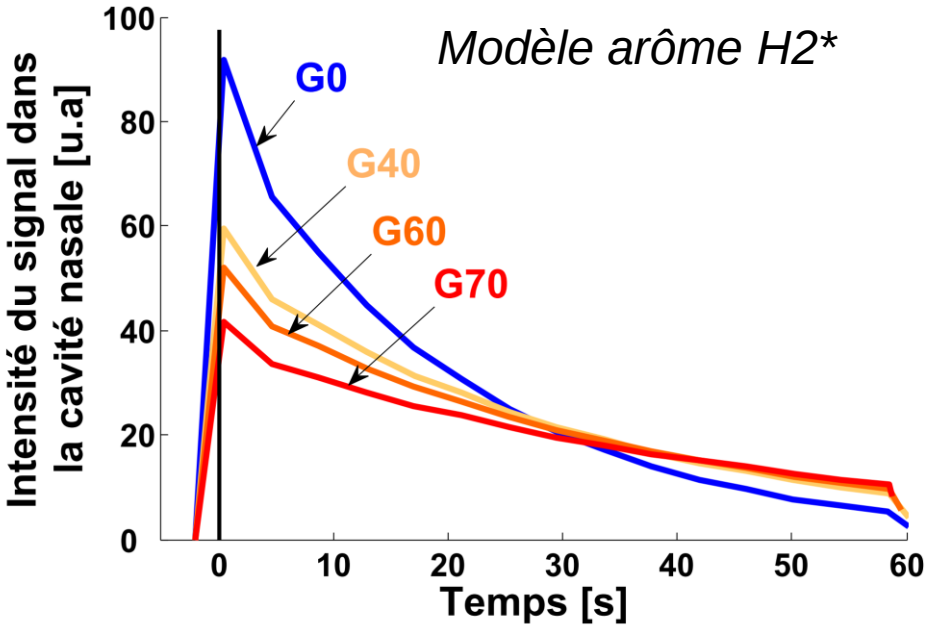


Le régime de forte dilution peut-il expliquer les observations *in vivo* ?

Applications *in vivo* : forte dilution

Simulation avec un taux de dilution du produit avec la salive de 85%





Épaisseur totale de 15 µm

Le modèle du péristaltisme pharyngé permet d'expliquer les observations *in vivo.*

*Doyennette et al., soumis

Phénomènes clefs

Enduction des muqueuses pharyngées :

- ✓ Écoulement en film mince
- ✓ Stationnaire
- ✓ Élasto-hydrodynamique mou
- ✓ Cylindres contrarotatifs
- ✓ Muqueuses lubrifiées par la salive

2 régimes d'écoulement :

1. faible dilution : impact de la viscosité important
2. **forte dilution :** impact de la viscosité faible

Le modèle explique les observations *in vivo*

Conclusions générales

Modèles de compréhension :

1. étude de mécanismes fondamentaux
2. évaluation de paramètres inaccessibles
3. découplage des phénomènes

Parts relatives de l'individu et du produit quantifiées :

- ✓ Efficacité masticatoire +++
- ✓ Structure du produit +
- ✓ Salive aux interfaces +++
- ✓ Viscosité du produit +

Applications :

- ✓ Classes d'individus
- ✓ Troubles de la déglutition

Perspectives

1. Consolider les modèles :
   - ✓ Suivi de la libération du sel *in situ*
     (évolution de la surface de contact)
   - ✓ Physiologie / Hyp. Simplificatrices
     (salive, sollicitations mécaniques, propriétés des muqueuses)

2. Approfondir les modèles :
   - ✓ Lien structure du produit / déstructuration
   - ✓ Déclenchement de la déglutition
   - ✓ Propriétés rhéologiques bols / aliments

3. Formalisation mathématique des liens entre libération et perception

Je tiens à remercier particulièrement
pour leurs apports scientifiques :

Franck Chardin, Isabelle Déléris, Marion Doyennette,
Maud Panouillé et Anne Saint-Eve

Ainsi que le projet ANR SensInMouth

Merci pour votre attention !