

Des outils mathématiques pour comprendre et prédire l'impact de la structure des aliments et de la physiologie des individus, sur la libération des stimuli responsables des propriétés sensorielles et sur la digestion

► Isabelle SOUCHON

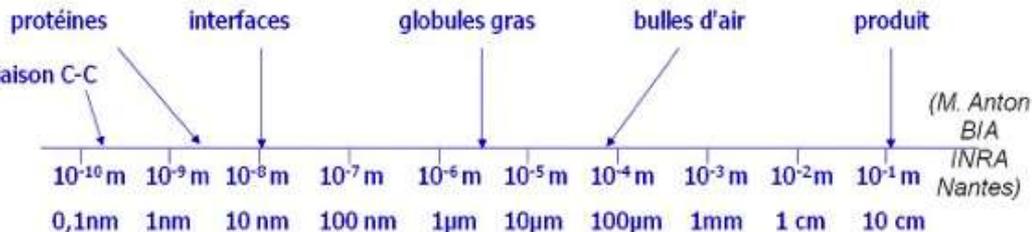
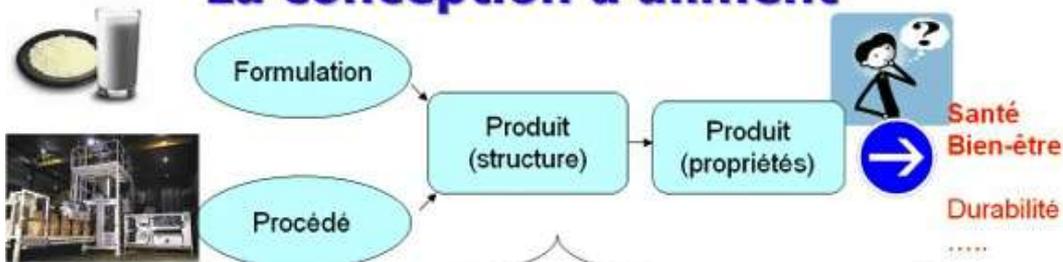
UMR 782 Génie et Microbiologie des Procédés Alimentaires
INRA - AgroParisTech / Thiverval Grignon



13 mai 2014, Rennes



La conception d'aliment



Déconstruction

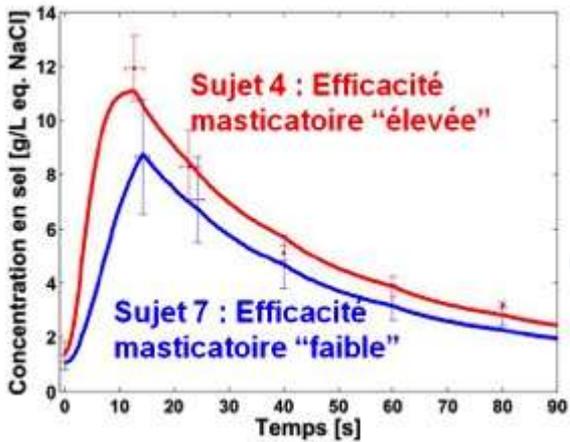


Déstructuration Mécanique (bouche)

Procédé de digestion Réacteur enzymatique transfert échange de matière

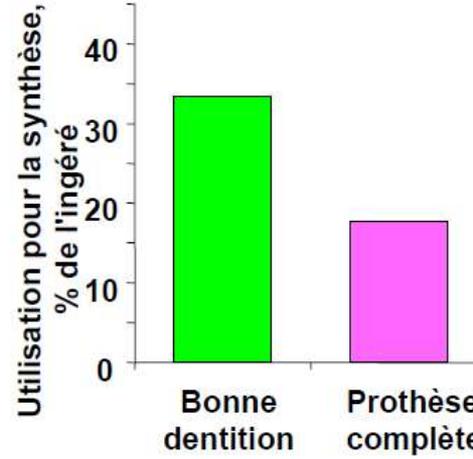
« *Structure design for healthy food* » / *ingénierie inverse*
Comment prendre en compte la structure de
l'aliment et la physiologie de l'individu?

Impact de l'efficacité masticatoire d'un individu sur la libération du sel en bouche

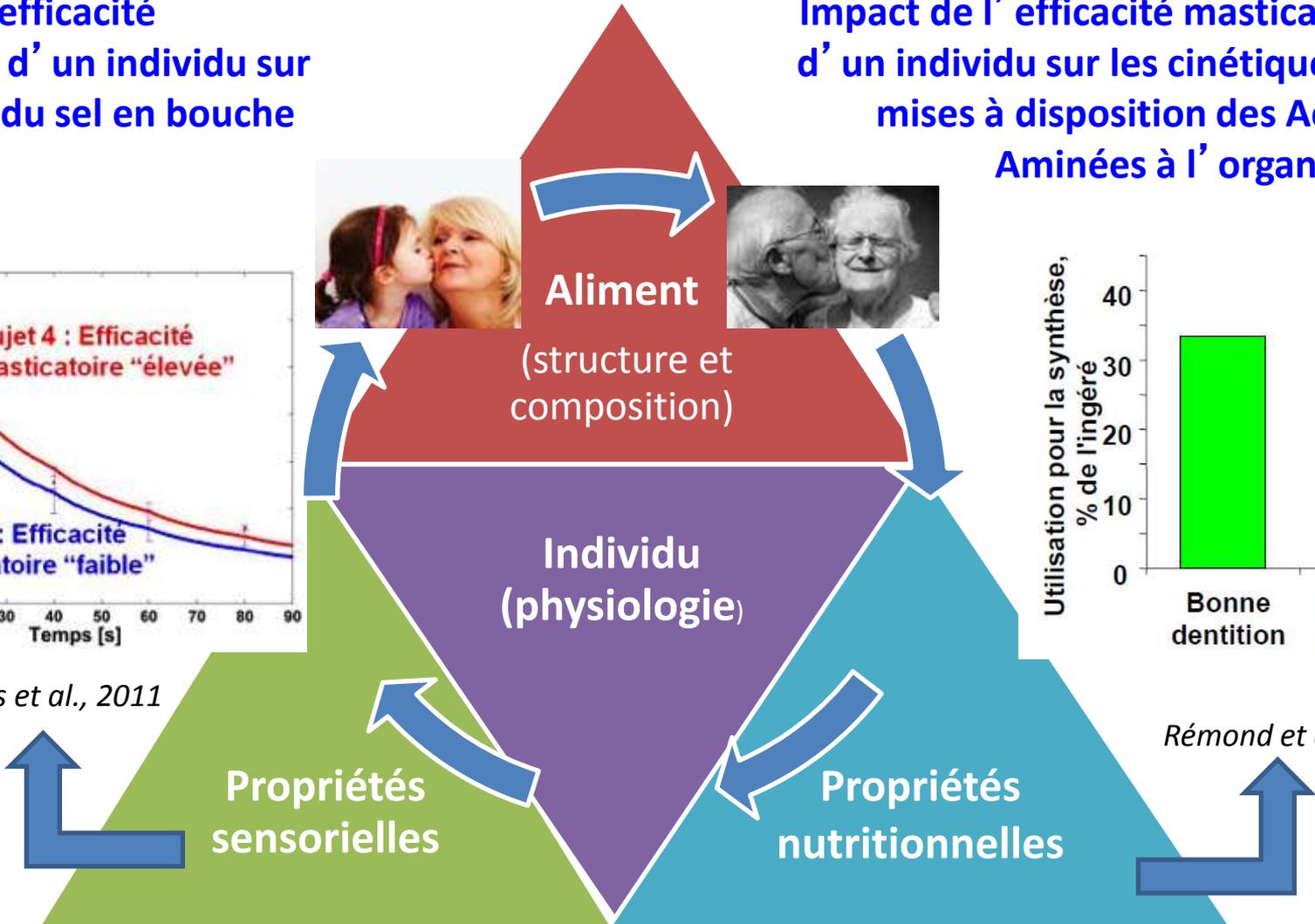


De Loubens et al., 2011

Impact de l'efficacité masticatoire d'un individu sur les cinétiques de mises à disposition des Acides Aminés à l'organisme



Rémond et al., 2007



Consommation d'un aliment

Aliment

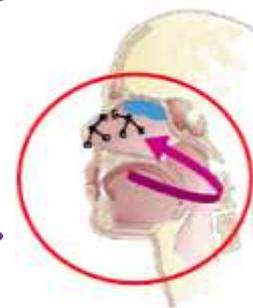
Interaction
produit-individu

Individu



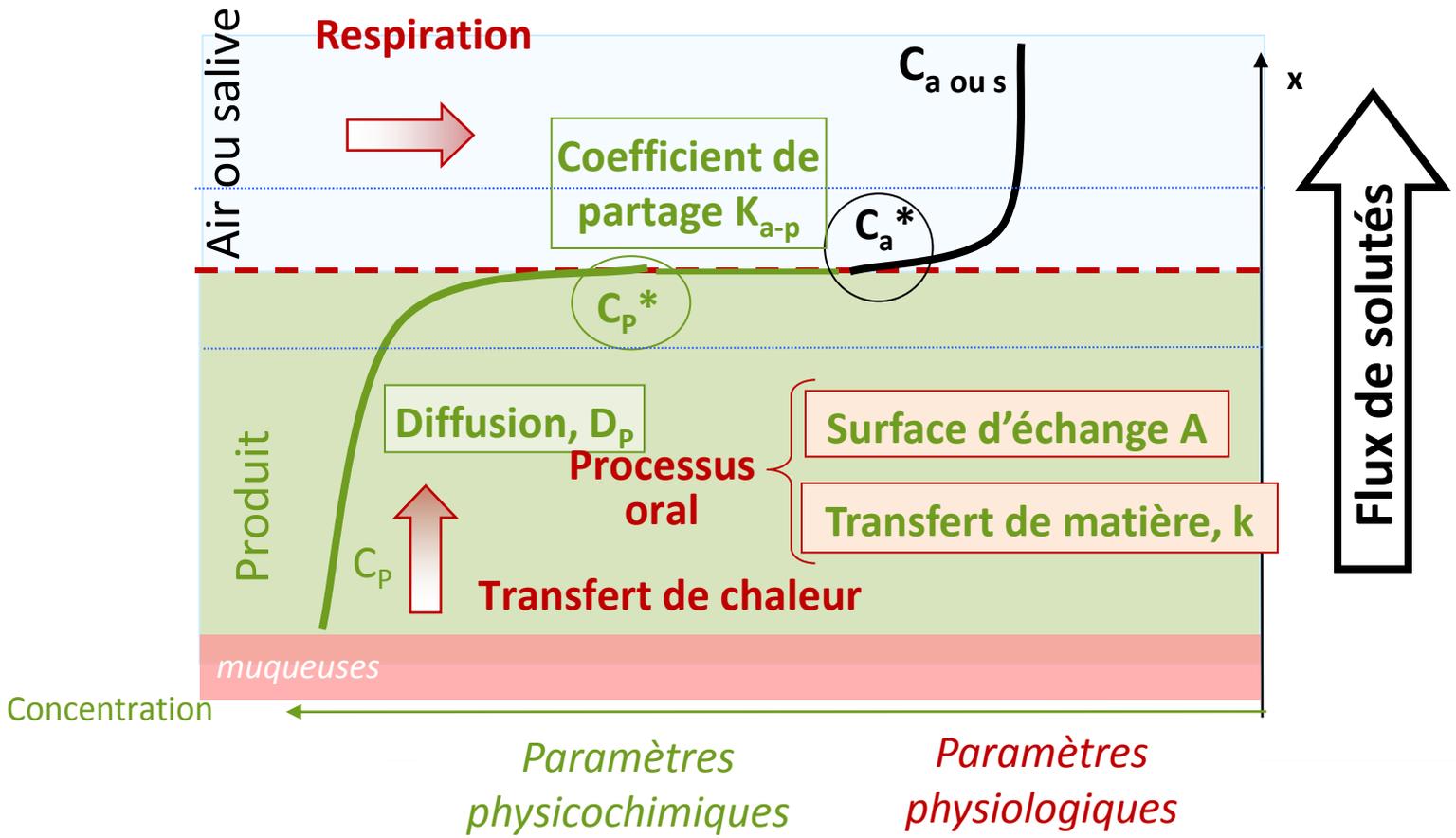
Libération des molécules responsables
de la flaveurs (arôme, saveur)

Libération des nutriments



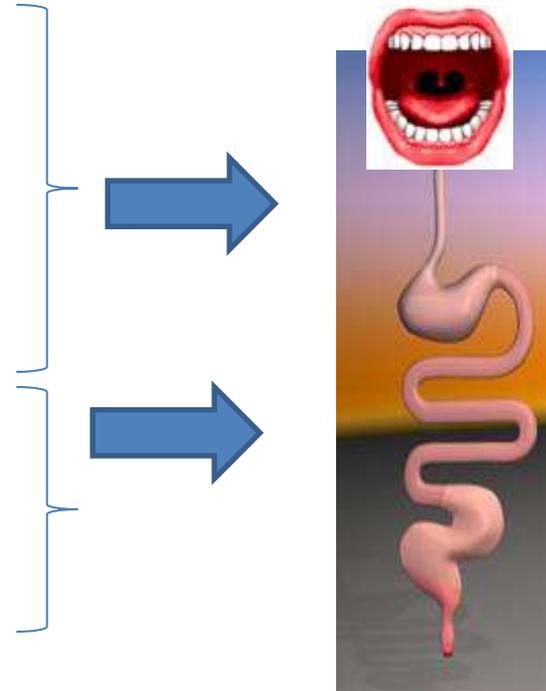
Modélisation mathématique pour identifier les étapes limitantes et découpler les différents facteurs (aliment, individu et leurs interactions)

L'Homme est un réacteur :



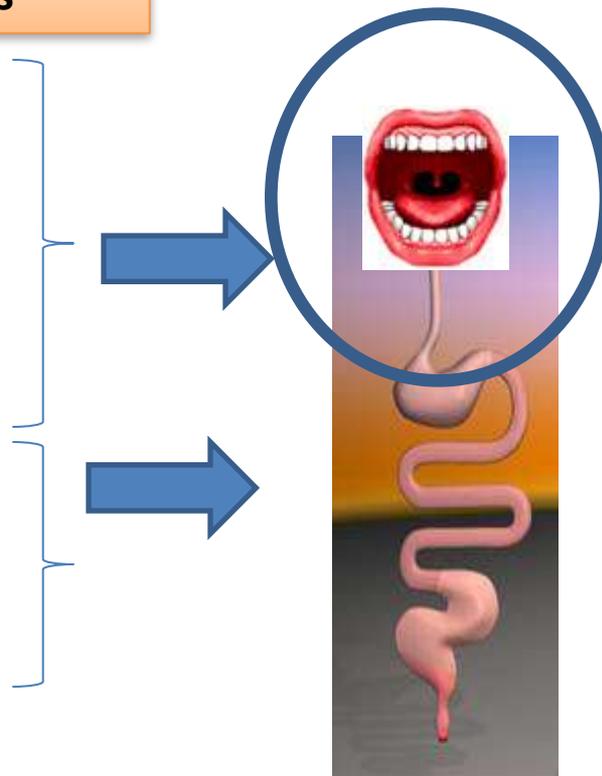
3 exemples pour illustrer l'impact de la structure des aliments sur les propriétés sensorielles et nutritionnelles

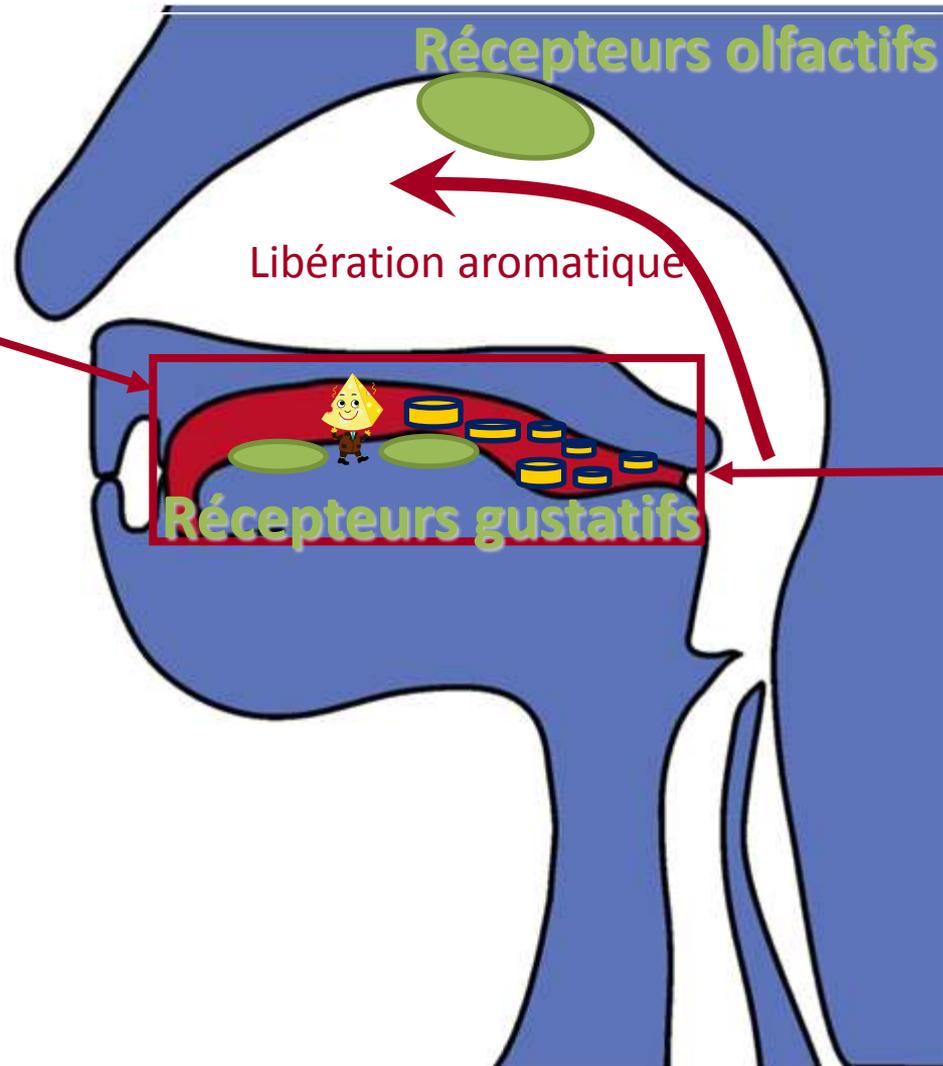
- 1 Prédiction de la libération et de la perception du **sel** en bouche en lien avec la composition et la structure de matrice alimentaire
- 2 Prédiction de la libération de **composés d'arôme** en bouche en lien avec la composition et la structure de matrice alimentaire
- 3 Modélisation des cinétiques de digestion de matrices protéiques de différentes structures



3 exemples pour illustrer l'impact de la structure des aliments sur les propriétés sensorielles et nutritionnelles

- 1 Prédiction de la libération et de la perception du sel en bouche en lien avec la composition et la structure de matrice alimentaire
- 2 Prédiction de la libération de composés d'arôme en bouche en lien avec la composition et la structure de matrice alimentaire
- 3 Modélisation des cinétiques de digestion de matrices protéiques de différentes structures





Etape 1: Phase Buccale

(Mastication, ouverture vélopharyngienne)

Libération des saveurs
(sucre, sel ...)

Libération aromatique

Ouverture vélo-pharyngienne

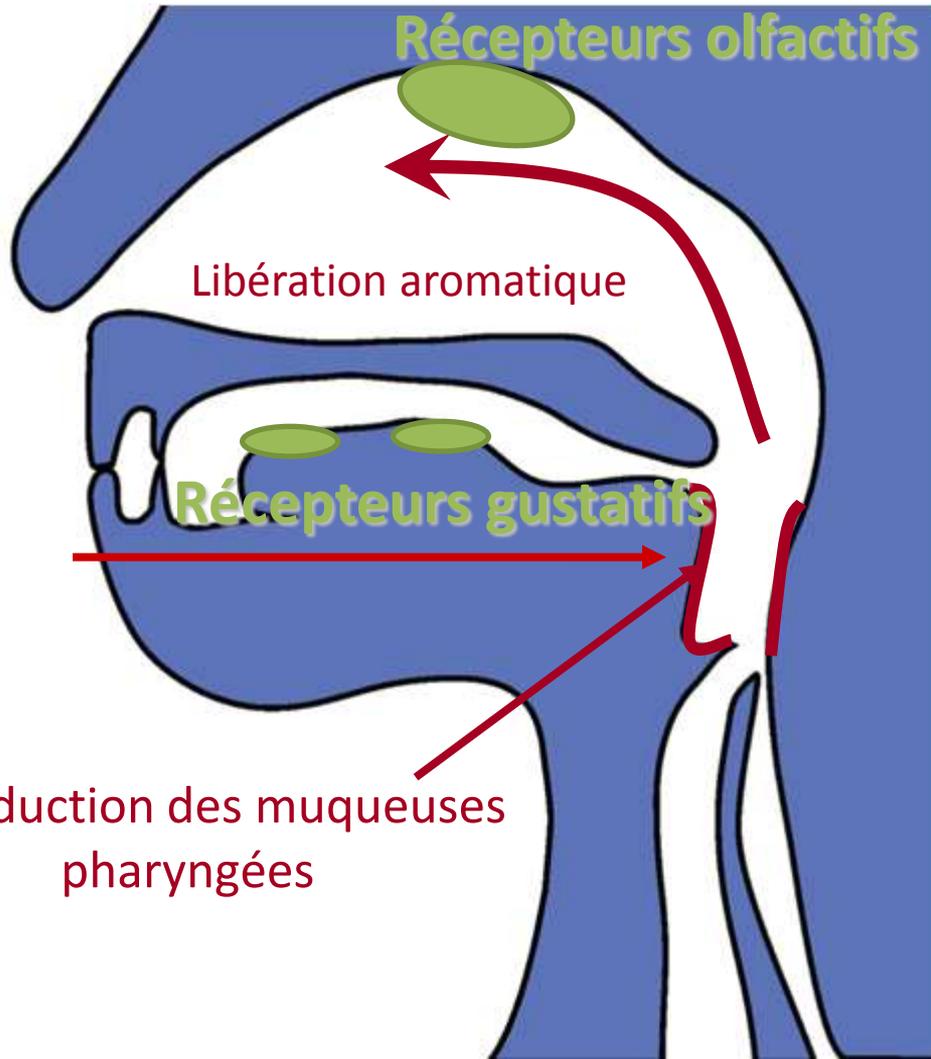


Etape 1: Phase Buccale

(Mastication, ouverture
vélopharyngienne)

Etape 2: Phase pharyngée

=> Enduction des muqueuses
pharyngées



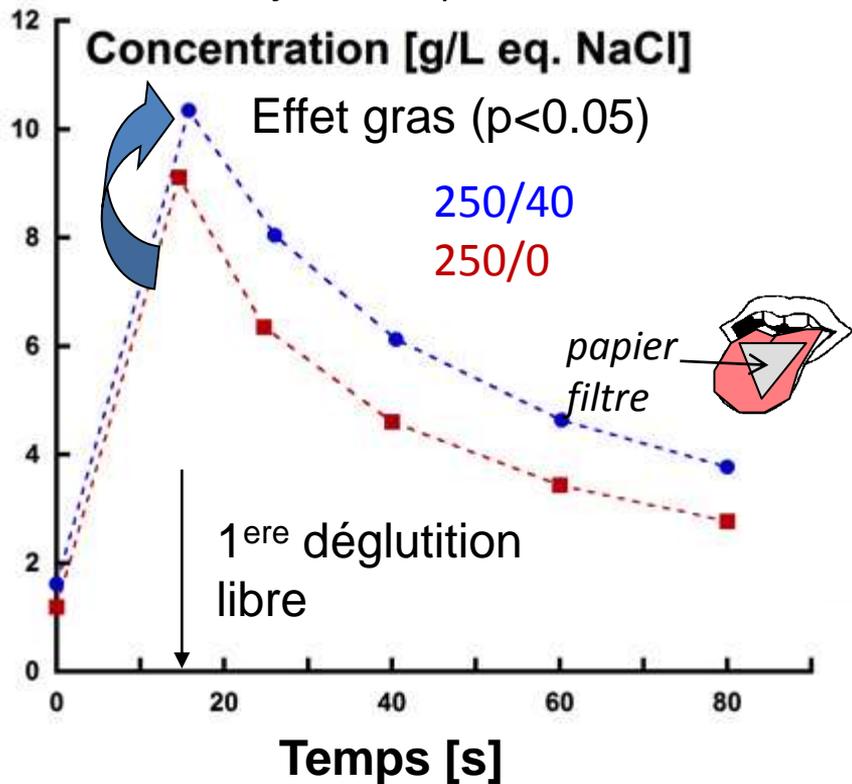


Libération du sel en bouche : Quel impact de la structure de gels laitiers « modèles » sur la libération et la perception ?



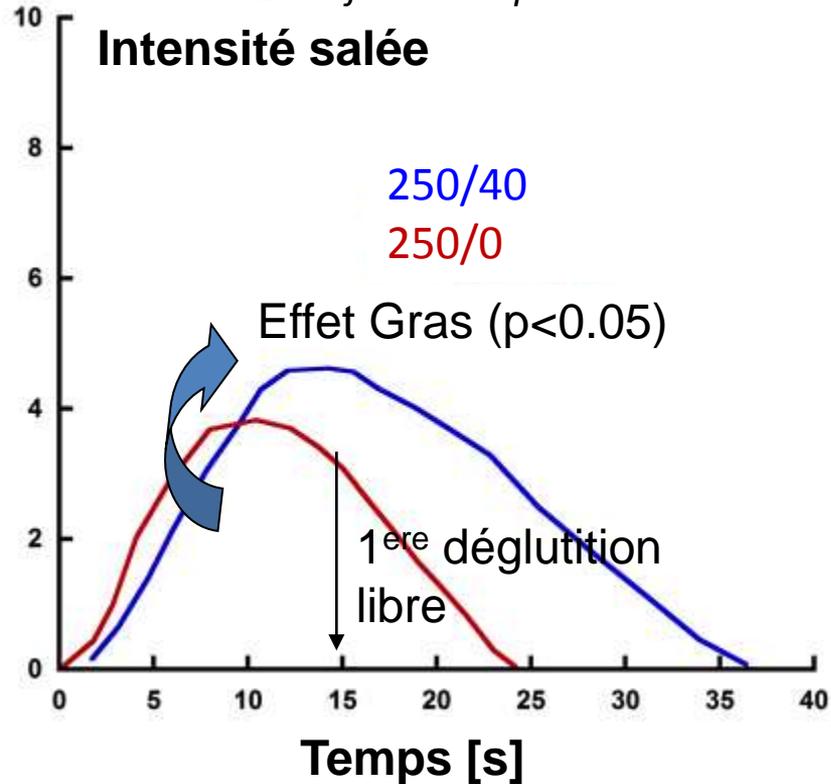
Libération du sel dans la salive

8 sujets x 4 répétitions



Perception salée

16 sujets x 3 répétitions

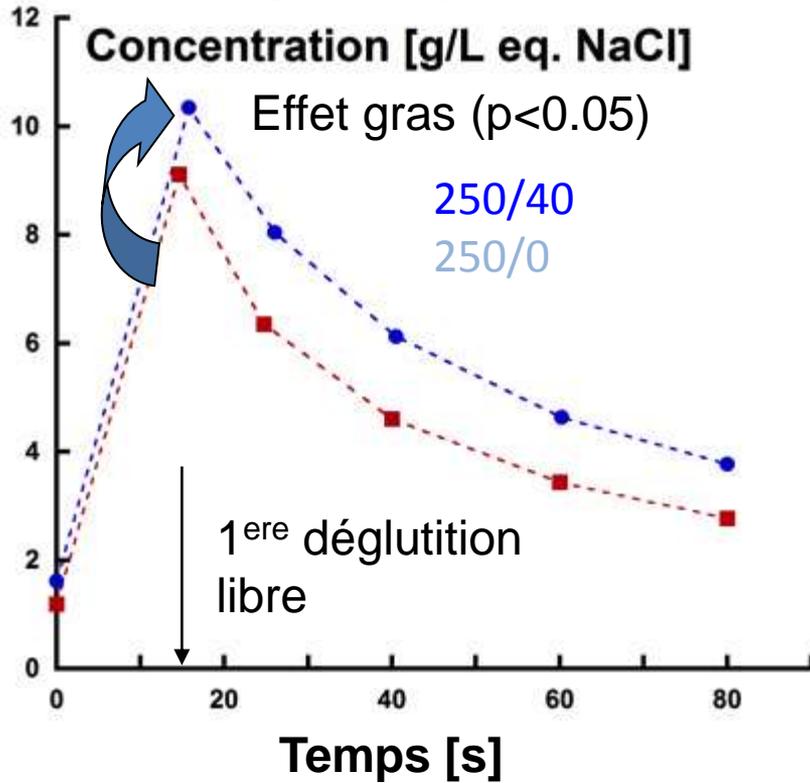




Libération du sel en bouche : Quel impact de la structure de gels laitiers « modèles » sur la libération et la perception ?

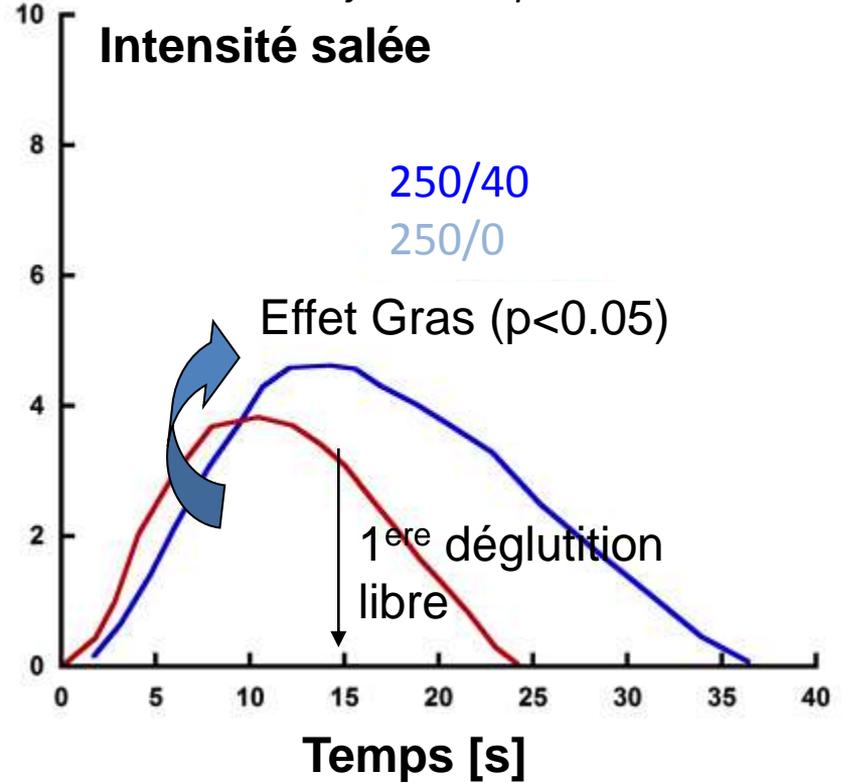
Libération du sel dans la salive

8 sujets x 4 répétitions



Perception salée

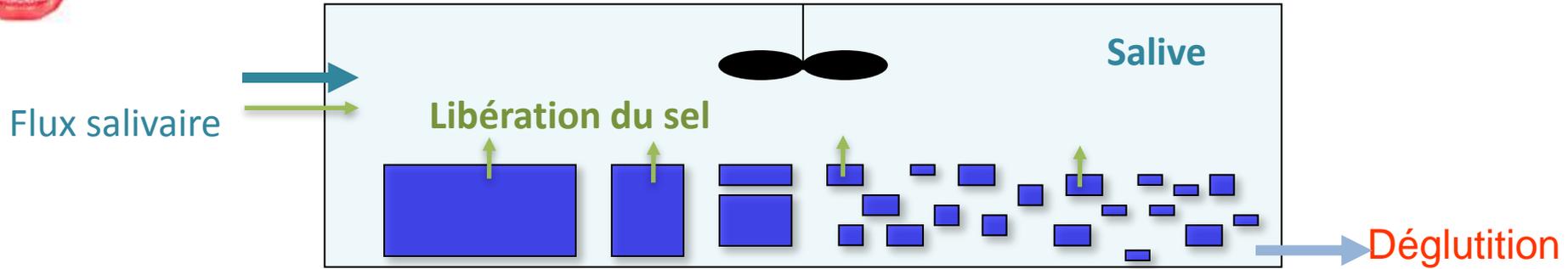
16 sujets x 3 répétitions



Quels mécanismes expliquent les différences de libération et perception ?



Libération du sel en bouche : Quel impact de la structure de gels laitiers « modèles » sur la libération et la perception ?



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

Labels for the equation components:

- $V_s(t)$: Volume de salive (m³)
- $\frac{dC_s}{dt}$: Coef. de transfert (m/s)
- k_p : Coef. de partage
- $A(t)$: Surface d'échange (m²)
- $K C_p(t) - C_s(t)$: Mastication
- Q_s : Flux salivaire (m³/s)
- $C_Q - C_s(t)$: Sel apporté par la salive (g/m³)



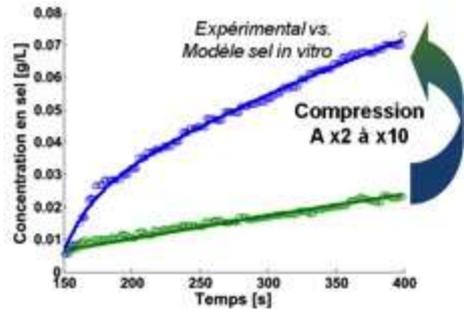
Libération du sel en bouche : Quel impact de la structure de gels laitiers « modèles » sur la libération et la perception ?

Validation du modèle en condition *in vitro*

Compression rapide à 80%

Suivi du sel par conductivité

$$A_0 = 11 \text{ cm}^2$$



250/0

Surface = $36 \pm 3 \text{ cm}^2$



250/40

Surface = $120 \pm 30 \text{ cm}^2$

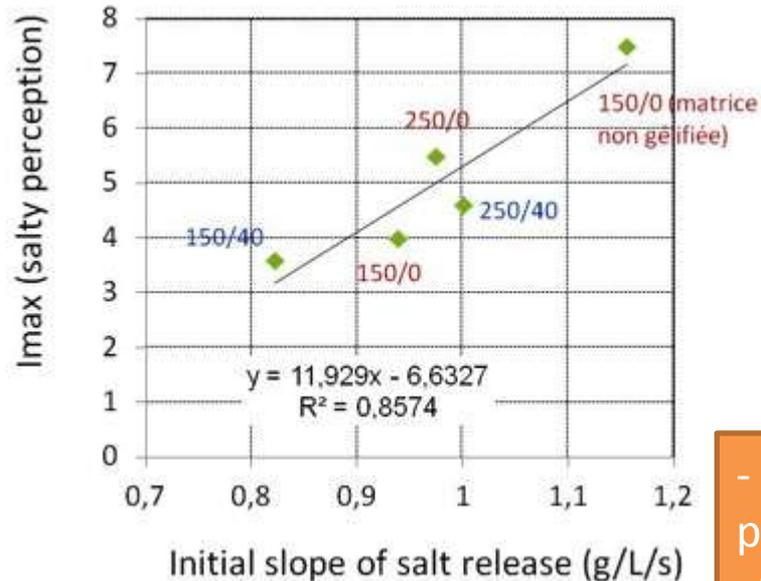
Eau (37° C)

Test de déstructuration

Test de contrôle



Libération du sel en bouche : Quel impact de la structure de gels laitiers « modèles » sur la libération et la perception ?



250/0
Surface=36±3 cm²

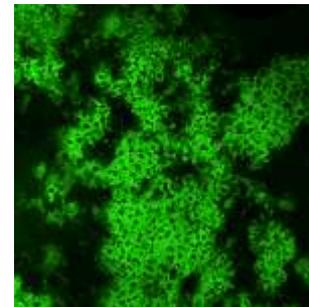


250/40
Surface=120±30 cm²

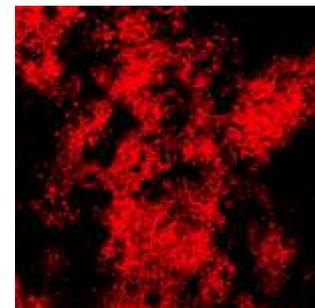


- Augmentation de la surface d'échange produit/salive
- Augmentation de la vitesse de transfert
- Augmentation de la perception salée

Protéines



Matière grasse

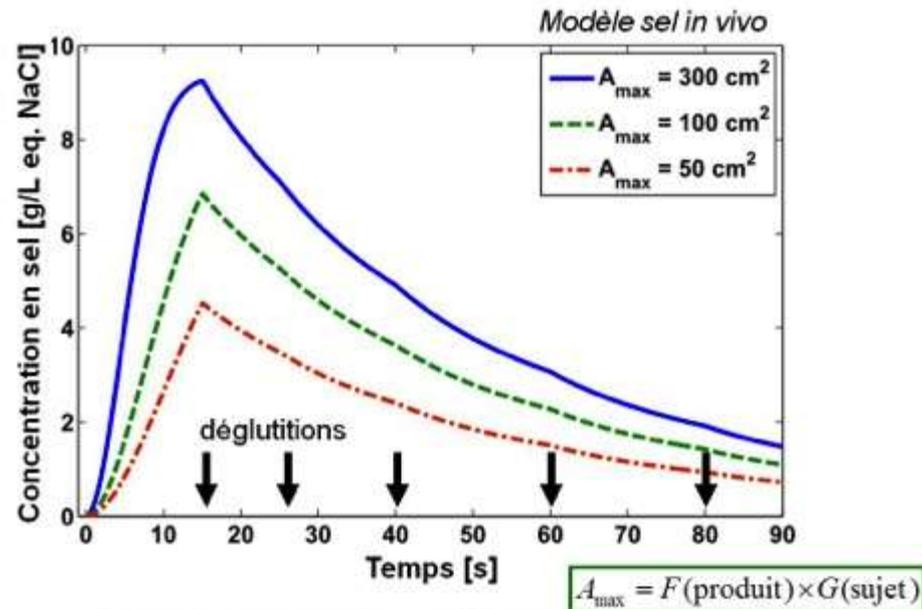
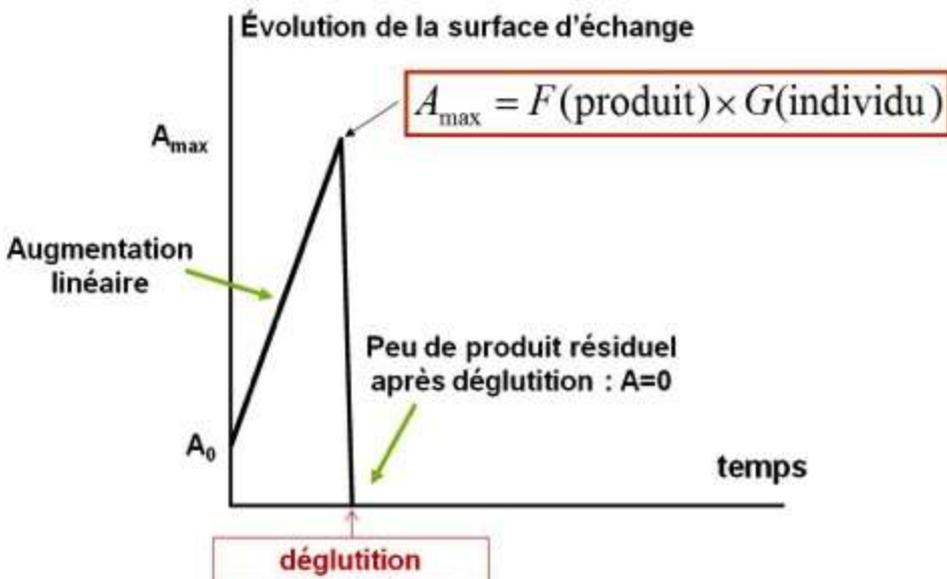




Libération du sel en bouche : Quel impact de la structure de gels laitiers « modèles » sur la libération et la perception ?

Application du modèle en condition *in vivo*

Hypothèses sur la surface d'échange générée en bouche



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



Libération du sel en bouche : Quel impact de la structure de gels laitiers « modèles » sur la libération et la perception ?

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

F(produit)

Influence de la structure du produit : la surface d'échange est expliquée par la force à la rupture des gels.



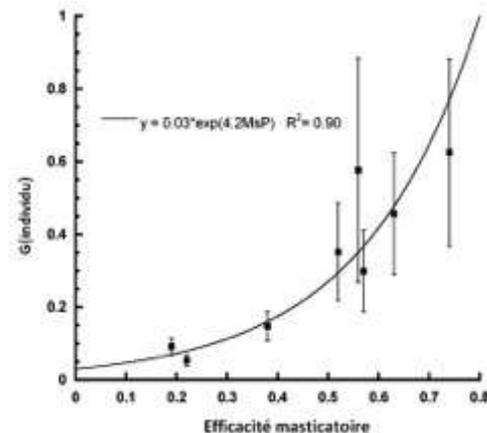
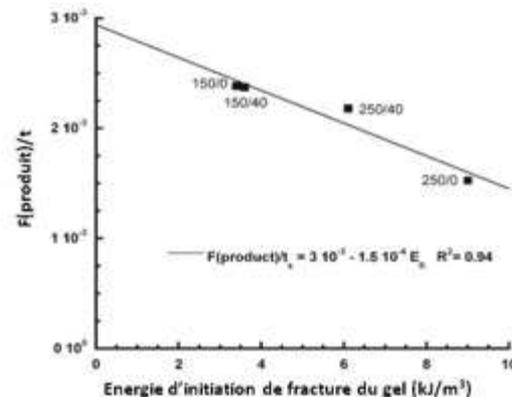
Plus la force à la rupture est grande, plus faible est la surface maximale produit – salive à déglutition

F(individu)

Influence de l'individu : la surface d'échange est expliquée par l'efficacité masticatoire des individus



Plus l'efficacité masticatoire de l'individu est élevée, plus la surface maximale générée est grande



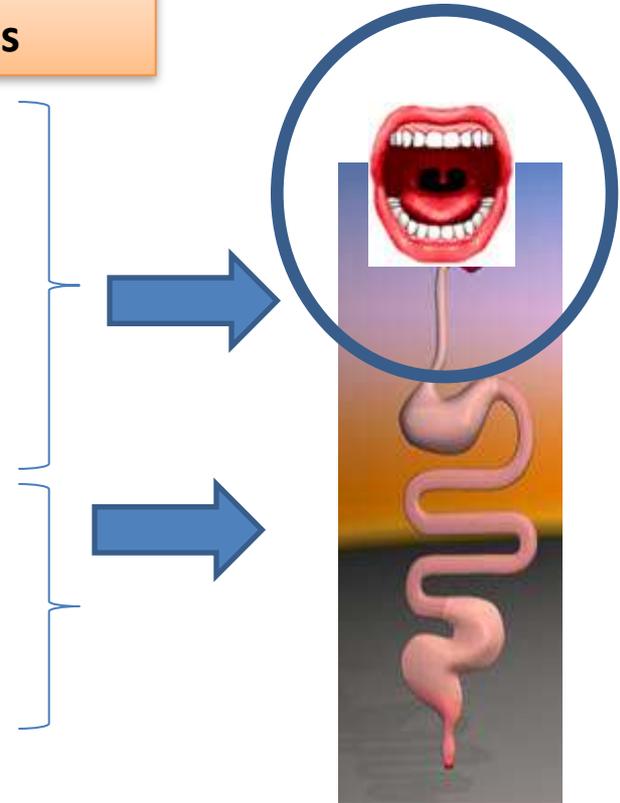


Libération du sel en bouche : Quel impact de la structure de gels laitiers « modèles » sur la libération et la perception ?

- Plus la vitesse de libération du sel en bouche est élevée plus l'intensité salée perçue est intense.
- La présence de matière grasse améliore la capacité de fragmentation de la matrice
- **La modélisation des transferts du sel en bouche a permis d'identifier :**
 - ***Paramètre clé = surface d'échange entre le produit et la salive générée pendant la mastication du produit***
 - ***Ce paramètre est lié à deux propriétés qui peuvent être facilement déterminées:***
 - *l'énergie nécessaire à la rupture du produit,*
 - *l'efficacité masticatoire de l'individu*

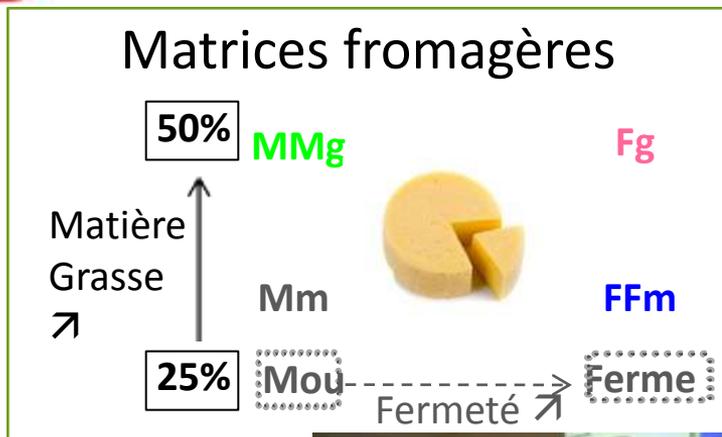
3 exemples pour illustrer l'impact de la structure des aliments sur les propriétés sensorielles et nutritionnelles

- 1 Prédiction de la libération et de la perception du sel en bouche en lien avec la composition et la structure de matrice alimentaire
- 2 Prédiction de la libération de composés d'arôme en bouche en lien avec la composition et la structure de matrice alimentaire
- 3 Modélisation des cinétiques de digestion de matrices protéiques de différentes structures



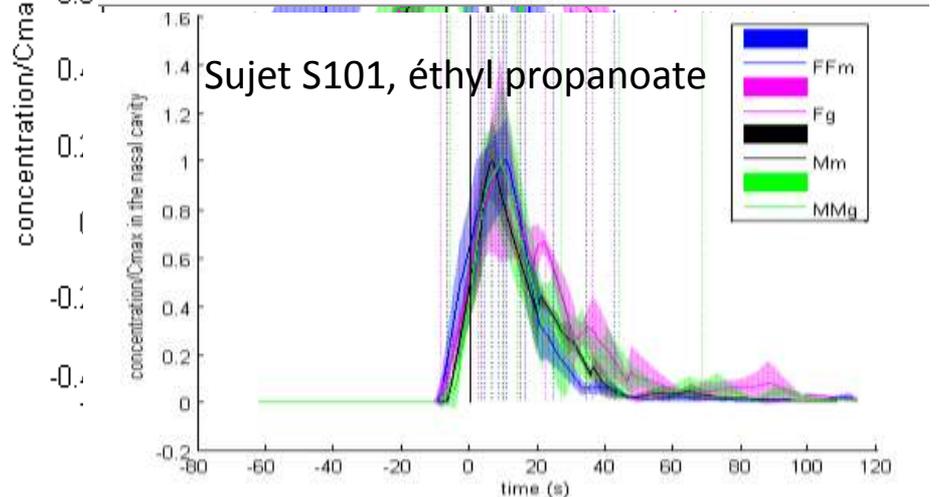
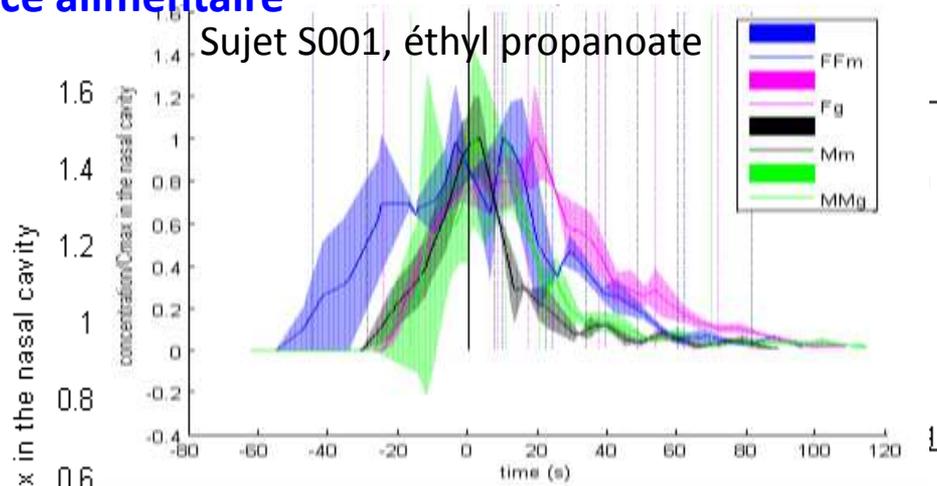


Prédiction de la libération de composés d'arôme en bouche en lien avec la composition et la structure de matrice alimentaire



coll. UMR CSGA
(ANR SensInMouth)

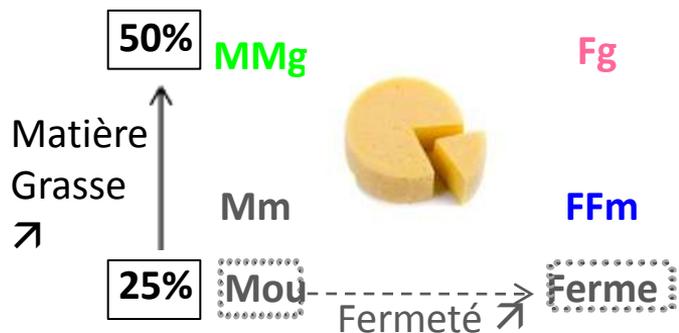
Mesure expérimentale par APCI-MS de la libération *in vivo* des composés d'arôme (50 individus)





Prédiction de la libération de composés d'arôme en bouche en lien avec la composition et la structure de matrice alimentaire

Matrices fromagères



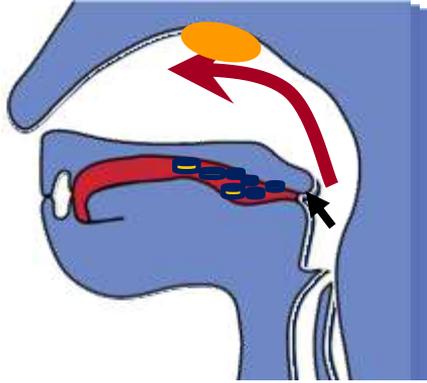
Défi : prendre en compte les effets liés à la fois aux produits et aux individus

Mesure expérimentale par APCI-MS de la libération *in vivo* des composés d'arôme (50 individus)



Modélisation des mécanismes
Simulation des cinétiques

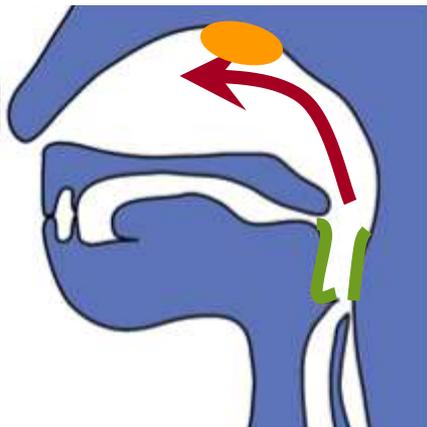
Etape buccale



Ouverture
vélopharyngée

Récepteurs
olfactifs

Etape pharyngée

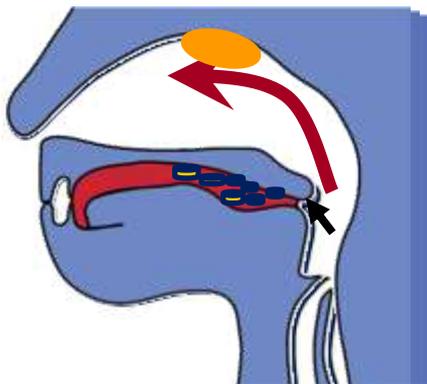


**Libération de
composés d'arôme**

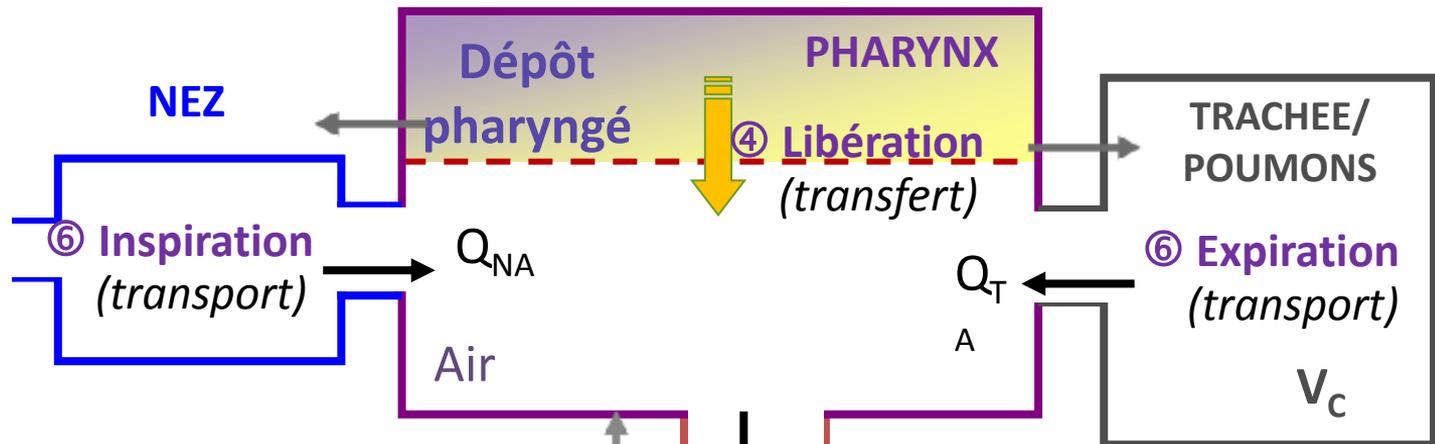
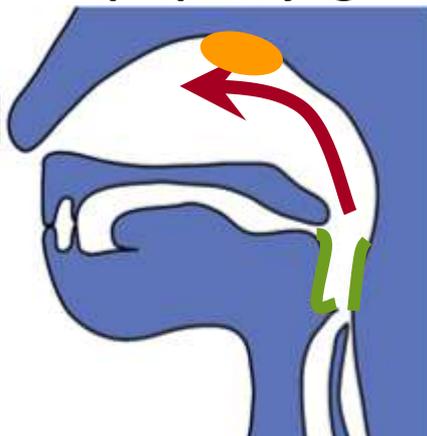
Dépôt résiduel
sur les parois
pharyngées

Représentation des mécanismes dans la sphère
naso-oro-pharyngée

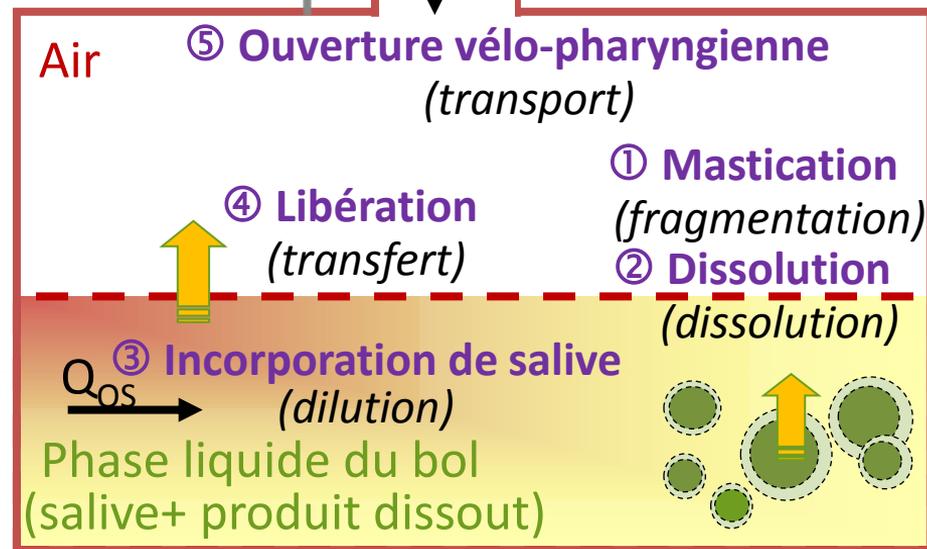
Etape buccale



Etape pharyngée



CAVITE ORALE



Paramètres du modèle (20)

Paramètres physicochimiques (6)

Coef. de transfert de matière dans le bol
(*bouche, pharynx*)
Coef. de partage air/bol (*bouche, pharynx*)
Vitesse de dissolution du produit
Volume initial de produit

Méthodes *in vitro* :

- Phase Ratio Variation
- VASK



Paramètres physiologiques (8)

Volumes des cavités (*bouche, nez, pharynx*)
Aire de contact entre air et bol (*bouche, pharynx*)
Fréquence respiratoire,

Spiromètre

Rhinopharyngometre



**MODÈLE
MÉCANISTIQUE**

Paramètres du modèle (20)

Paramètres physicochimiques (6)

Paramètres physiologiques (8)

MODÈLE
MÉCANISTIQUE

Paramètres liés au processus oral(6)

Aire de contact entre produit et bol

Quantité résiduelle de produit en bouche

Ouverture du vélopharynx (fréquence, amplitude)

Vitesse d'incorporation de salive

Temps de séjour en bouche



Méthodes in vitro :

- *pharynx artificiel*

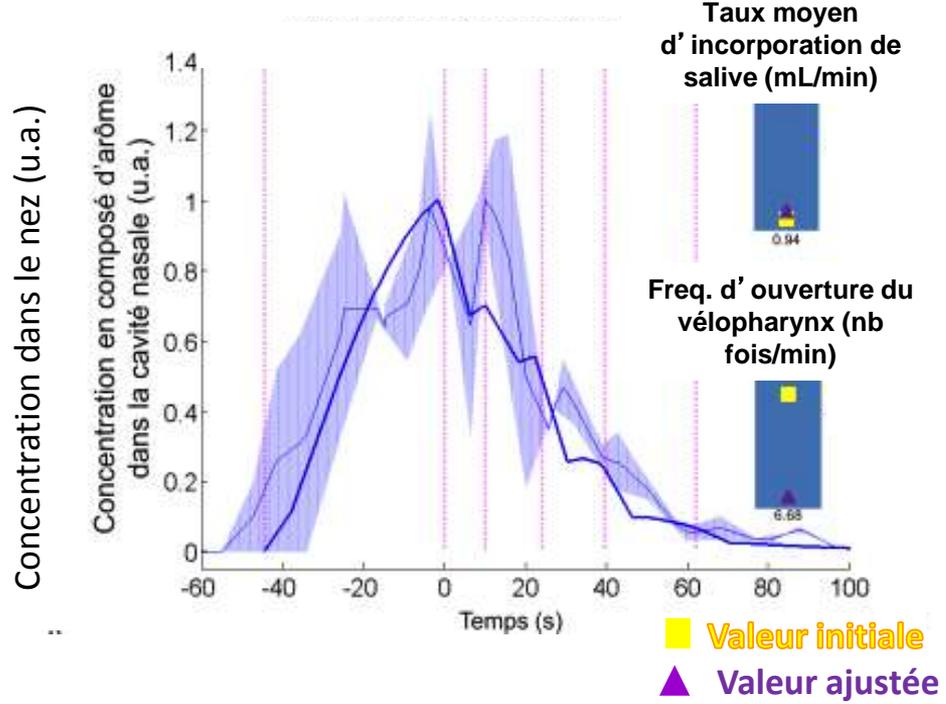
- *dessication*

- *test de compression*

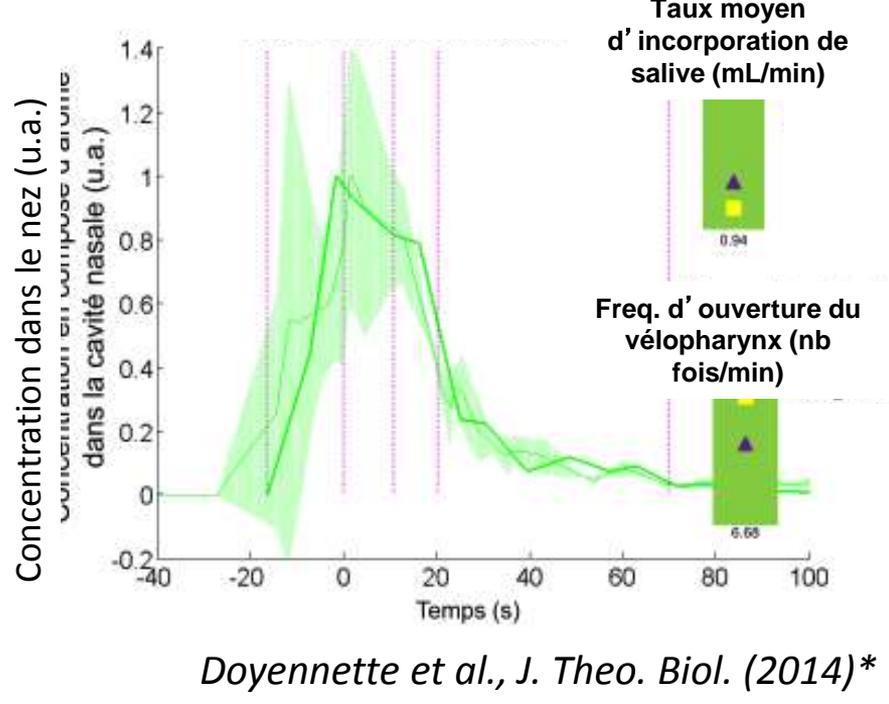


Degrés de liberté du modèle

Produit FFm (très ferme)



Produit Mg (mou)

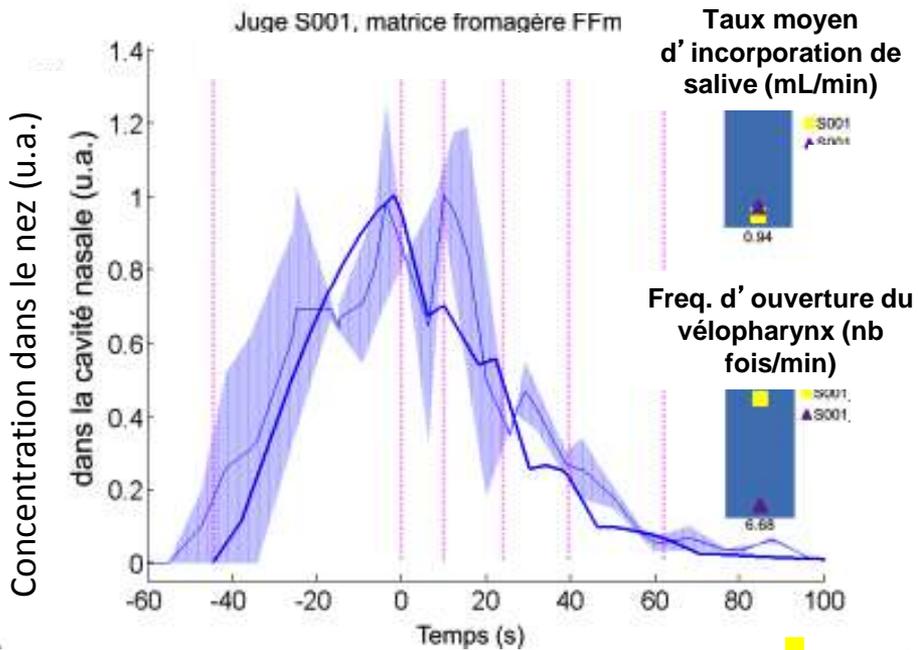


Doyennette et al., J. Theo. Biol. (2014)*

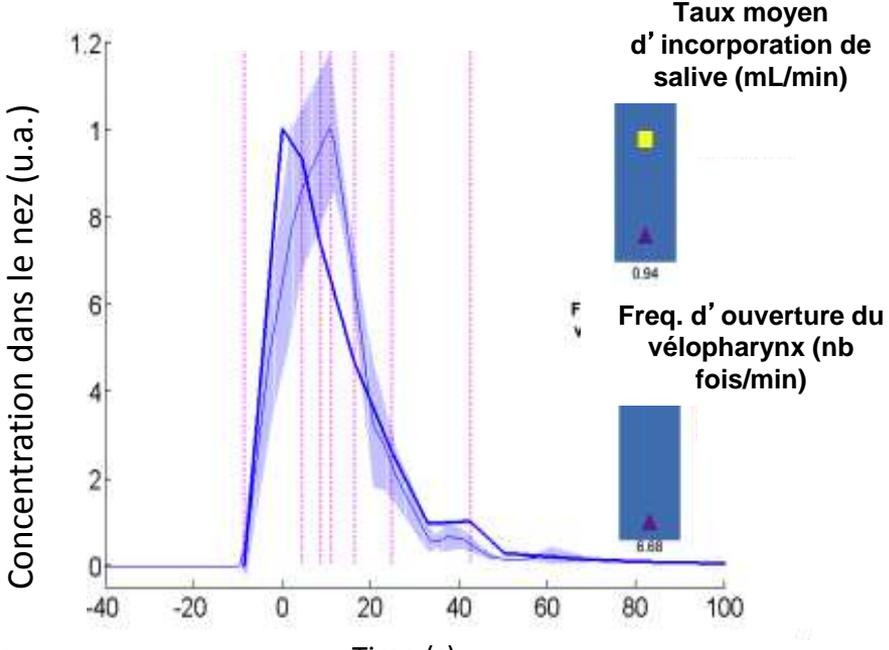
Produit FFI (très ferme)
Ethyl propanoate

Comparaison des cinétiques expérimentales et simulées : effet lié aux individus

Sujet S001



Sujet S101



■ Valeur initiale
▲ Valeur ajustée

Doyennette et al., J. Theo. Biol. (2014)

Paramètres liés :

- *au produit*

- *à l'individu*

- *au processus oral*

Apport de la modélisation par rapport aux mécanismes et facteurs clés expliquant la libération des composés d'arôme

Produits semi-liquides

- Coefficient de transfert de matière des composés d'arôme dans le bol
- **Fréquence respiratoire**
- Épaisseur des dépôt sur les muqueuses pharyngées

Produits solides

- Coefficient de transfert de matière des composés d'arôme dans le bol
- **Ouverture du vélopharynx (fréquence et amplitude)**
- Temps de séjour en bouche
- Vitesse d'incorporation de salive dans le bol

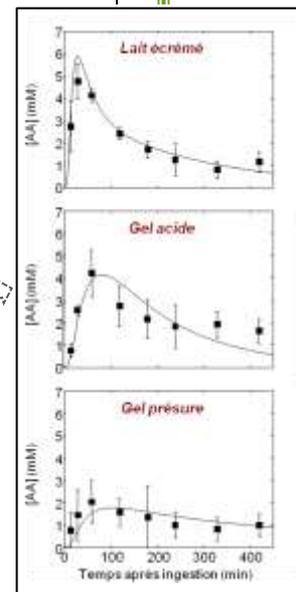
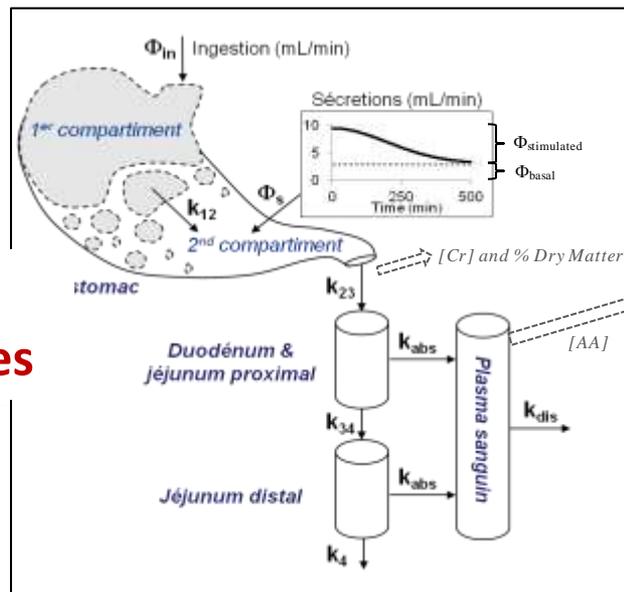
Des connaissances... vers des outils d'aide à la formulation?

INGÉNIERIE INVERSE

CONNAISSANCES DES MÉCANISMES CLÉS

Propriétés sensorielles cibles
(groupes d'individus, catégories de produits)

Propriétés nutritionnelles



Construction

Formulation Procédés

Aliment



Deconstruction



Des connaissances... vers des outils d'aide à la formulation?



Des avancées scientifiques significatives sur la compréhension du processus oral et de la digestion, en lien avec les propriétés de l'aliment, sa perception et la physiologie des individus ont été obtenues.



Une analyse systémique d'un procédé complexe, la digestion (de la phase orale à la phase intestinale), intégrant un ensemble de cascades réactionnelles et de mécanismes physiques.

Des développements de modèles mathématiques qui pourraient, à plus long terme, être des outils d'aide à la formulation pour répondre à des propriétés nutritionnelles et sensorielles ciblées

- UMR GMPA (Grignon) : I. Délérís , A. Saint-Eve , S. Le Feunteun , M. Panouillé De Loubens , M. Doyennette, C. Tréléa

- UMR CSGA (Dijon) 

- Laboratoire de Rhéologie (Grenoble) 

-  d' Auvergne 

- 
- 

Merci pour votre attention

- French National Research Agency 
(financial support of SensInMouth project)