

Vous mangez trop salé !

Patrick Mielle, Marion Emorine, Chantal Septier, Jacques Maratray¹

Résumé. La consommation de sel est excessive dans les pays industrialisés. Les autorités sanitaires recommandent donc une réduction drastique de la quantité de sel incorporée dans les aliments manufacturés. Afin de conserver une perception du produit à teneur réduite en sel identique à celle du produit original, le rendement d'extraction du sel par la salive doit donc être amélioré, par exemple en modifiant la texture de l'aliment. Le sel se libère graduellement des aliments solides pendant les processus résultant de la mastication et de la salivation et entraînant la déstructuration de l'aliment. Deux sondes ont été développées pour la mesure de la température et de la conductivité de la salive en bouche pendant la mastication pour l'analyse en temps réel des électrolytes extraits par la salive. Leur réponse est très rapide, et donne des résultats fiables en fonction des différences dans la composition des aliments ainsi qu'entre individus. L'électronique a été développée dans l'Unité, à partir de circuits intégrés de catégorie « instrumentation », avec les critères de miniaturisation, de très faible consommation et bien entendu de sécurité des sujets. Un logiciel de pilotage et d'acquisition a été développé sous LabView, permettant à la fois l'étalonnage multipoint de chacune des sondes de conductivité et de température et l'affichage d'un graphe de libération du sel, pondéré par les courbes d'étalonnage de chaque sonde. Le logiciel gère également la sécurité du sujet. Nous avons observé des résultats fiables et reproductibles sur les différents aliments testés, avec une très bonne sensibilité, un temps de réponse court et sans temps de latence.

Mots clés : aliments, sel, libération, mastication, conductivité, instrumentation

Introduction

La consommation de sel (NaCl) est essentielle pour l'organisme, car elle est source d'iode et de fluor. Mais une consommation excessive (supérieure à 6 g/jour) est reconnue comme facteur important d'augmentation de l'hypertension et de risque pour les maladies cardiaques. Les autorités sanitaires recommandent une réduction de 20 % de la teneur en sel des aliments, celle-ci étant actuellement de 0,5 à 2 g pour 100 g dans les aliments manufacturés.

Il est donc essentiel de mieux comprendre, puis de permettre aux entreprises de maîtriser la libération des composés sapides afin de développer des aliments à teneur réduite en sel. Mais cette réduction en sel peut entraîner un rejet des produits par le consommateur. Afin de conserver une perception du produit à teneur réduite en sel identique à celle du produit original, le rendement d'extraction du sel par la salive doit donc être amélioré, par exemple en modifiant la texture, la composition ou encore le process d'élaboration de l'aliment, ou bien encore en ajoutant des arômes congruents. Le sel se libère graduellement des aliments solides pendant les processus intervenant en bouche, résultant à la fois de l'action de la mastication et de la salivation et entraînant la déstructuration de l'aliment et la libération des composés sapides, responsables de la saveur. Développer des produits à teneur réduite en sel sans affecter l'acceptabilité de l'aliment par le consommateur nécessite de mieux comprendre le phénomène de libération des composés sapides en bouche. Différentes stratégies ont donc été menées dans l'Unité pour améliorer la disponibilité du sel en bouche et augmenter le rendement d'extraction par la salive.

Suivre la libération du sel en bouche en direct

Deux sondes, ainsi que leur électronique associée, ont été développées dans notre Unité pour la mesure de la température et de la conductivité de la salive en bouche pendant la mastication, permettant l'analyse en temps réel des électrolytes extraits par la salive. Ceci permet de gagner beaucoup de temps par rapport à la technique actuelle utilisant des prélèvements discrets (discontinus, effectués en

1. INRA, UMR CSGA 1324 – CNRS UMR 6265, Centre des Sciences du Goût et de l'Alimentation, 17 rue Sully, B.P. 86510, F- 21065 Dijon cedex, France; Patrick.Mielle@dijon.inra.fr; jacques.maratray@dijon.inra.fr

mettant le cycle en pause) analysés par la technique de chromatographie liquide haute performance. Les sondes, une par sujet, ont été développées d'une taille et avec des matériaux compatibles avec la mise en bouche, afin d'assurer un très haut degré de sécurité pour les panélistes. Leur réponse est très rapide, sans temps de latence, et avec des résultats fiables en fonction des différences dans les aliments et entre individus.

Développement des sondes

La mesure de la conductivité de solutions aqueuses est basée sur la conduction électrique des ions (mesurée en S/cm). Celle-ci est dépendante de la température de la solution, une compensation par sonde de température (thermistance de type NTC-negative temperature coefficient-) est donc nécessaire si les variations de la température du liquide analysé sont assez importantes.

Le montage le plus efficace est de type Wenner array (comparable au montage Kelvin pour la mesure de faibles résistances) : un courant circule entre deux électrodes externes et une différence de potentiel (tension) est mesurée entre les deux électrodes internes. Ce montage présente l'intérêt principal d'être moins sensible au colmatage que le montage à deux électrodes. Afin d'éviter la polarisation des électrodes dans un électrolyte (effet condensateur), un courant alternatif symétrique est appliqué entre les électrodes externes.

Notre sonde originale utilisée pour les mesures dans le simulateur de mastication « Bouche artificielle » (Maratray et al., 2007) comporte donc un réseau de quatre électrodes plaquées or afin de réduire l'effet des particules et du colmatage. Différents designs d'électrodes ont été testés. Il est à noter que bien que les électrodes soient de type planar (en ligne), les courants circulent dans les trois dimensions, un peu à la manière des lignes de force d'un aimant.

La gamme de concentration pour l'étalonnage va de 0,02 à 20 g de NaCl/litre (sel de cuisine). La compensation en température est basée sur un capteur de température miniature. Les deux sondes sont séparées (**Figure 1**). Afin de réduire au maximum l'encombrement en bouche, les sondes utilisées sur l'humain sont de type deux fils. Leur taille est de 5 x 2 mm, et la sortie vers l'extérieur de la cavité buccale s'effectue par deux fils de 21 μm isolés, passant par la commissure des lèvres. Ceci limite au maximum la gêne causée par le dispositif. La sonde de conductimétrie possède par définition un temps de réponse nul, et celle de température a un temps de réponse d'environ 0,3 s en phase liquide. Les sondes ne comportent pas de composants électroniques embarqués, sont bien évidemment inertes et ne contiennent aucun matériau dangereux pour la santé. Elles peuvent être stérilisées à froid. Elles sont compatibles avec la directive européenne RoHS et elles ont bénéficié d'un agrément sanitaire délivré par l'AFSSAPS (n° ID RCB 2011 A00807-34).

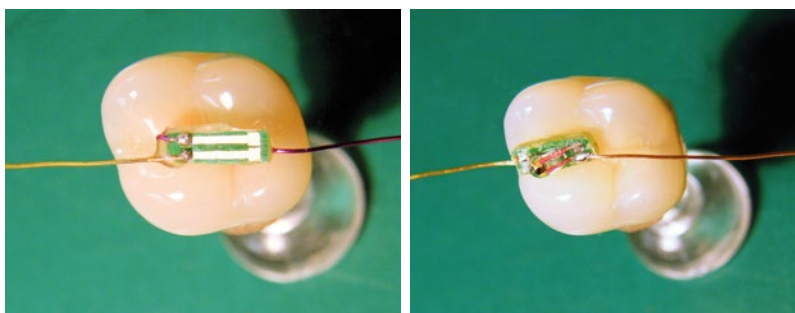


Figure 1. A gauche : le capteur de conductivité pour mise en bouche, version deux fils ; à droite : le capteur de température. La molaire humaine représente l'échelle (photo : P. Mielle, INRA).

Développement de l'électronique

L'acquisition des données est effectuée par un boîtier de la marque National Instruments® de type NI6009, qui est auto-alimenté par la prise USB d'un ordinateur portable fonctionnant uniquement sur batteries, afin que le sujet soit intégralement isolé du secteur. Toujours pour assurer la sécurité des panélistes, le courant dans les sondes est limité à +/- 50 μA , sous une tension efficace maximale de 2,5 VRMS. Dans le cas extrême d'une défaillance de l'électronique, le sujet ne serait soumis qu'à la tension USB, soit 5 VDC, qui n'est aucunement létale.

La partie électronique a été développée en catégorie « instrumentation » et gère indifféremment les deux sondes (**Figure 2**). Elle présente de très faibles offset et dérives, encore améliorées par une alimentation symétrisée +/- 2,50 VDC. Le rapport cyclique du courant bipolaire de sonde (fréquence de 120 Hz) est de 50 +/- 0,2 %, toute dissymétrie du rapport cyclique pouvant entraîner une polarisation dans le cas d'une durée d'utilisation assez longue.

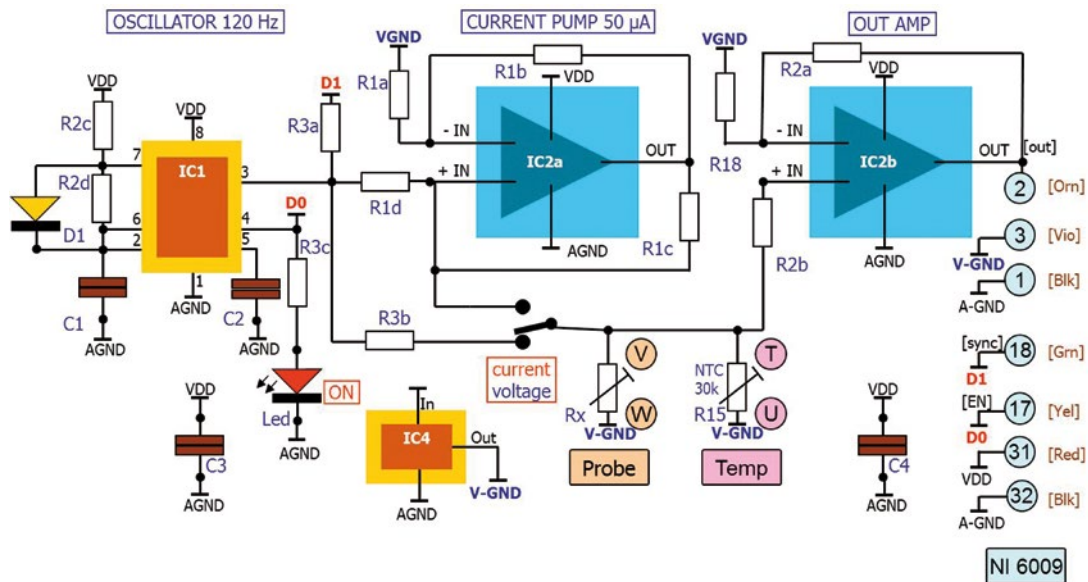


Figure 2. Schéma de principe de l'électronique développée pour le conditionnement de signal des sondes.

Afin d'assurer une compacité maximale, de limiter le nombre de fils et de minimiser la sensibilité aux parasites, la partie conditionnement du signal a été directement câblée sur le connecteur de la carte d'acquisition (**Figure 3**). Des réseaux de résistances appariées ont été mis en œuvre afin d'assurer une impédance de sortie proche de l'infini pour le générateur de courant (de type *Howland Current Pump*).



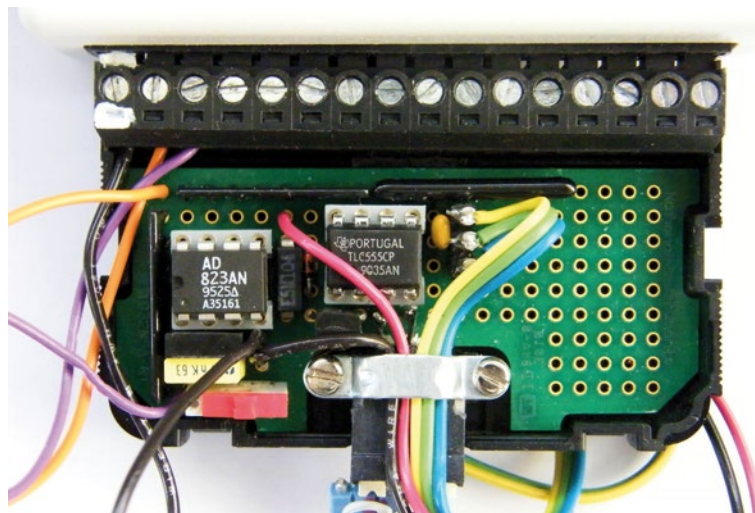


Figure 3. Vue du câblage compact de la carte de développement connecté sur le boîtier NI6009 (photo : P. Mielle).

Développement du logiciel

Le logiciel a été développé dans notre Unité sous Labview. Il supervise la sécurité du panéliste, assure la déconnection si l'ordinateur portable est alimenté sur le secteur et met les sondes hors tension avant le début de l'acquisition. Il gère également la calibration d'un couple de sondes par panéliste (20 sujets). Il gère enfin l'acquisition et le stockage des données et permet l'affichage de la température ou de la concentration en sel en bouche, avec un changement automatique de gamme suivant les valeurs de tension mesurées (Figure 4).

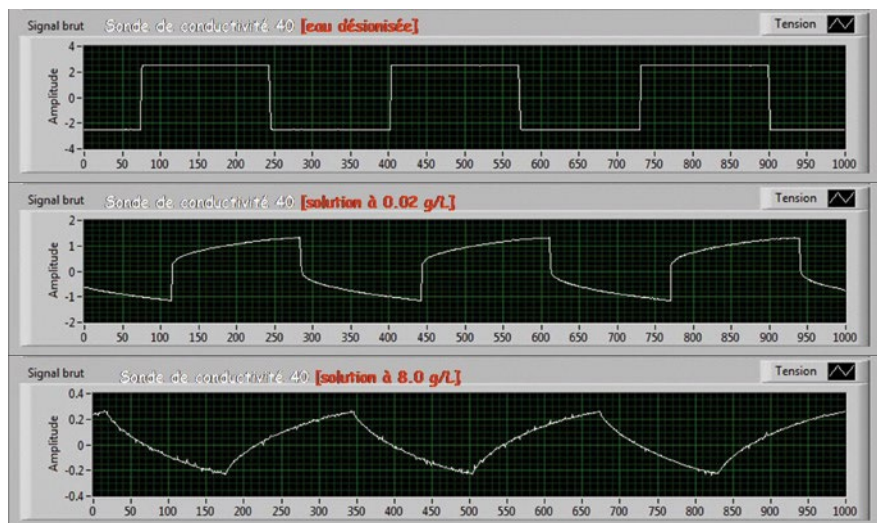


Figure 4. Forme et intensité des différents signaux générés par les sondes suivant la concentration en sel. On notera que la réponse des sondes de conductivité présente une forte composante capacitive.

Réponse des sondes

A cause de la forte composante capacitive due au milieu électrolytique, la fonction de transfert de la réponse des sondes de conductivité suit une loi de puissance. Afin d'améliorer la prédiction de la concentration en sel à partir des mesures brutes, nous avons utilisé un modèle en deux segments, l'un pour les tensions faibles et l'autre pour les tensions élevées (**Figure 5**). Le seuil de commutation entre les deux équations est paramétrable, et se situe généralement autour de 0,5 VRMS.

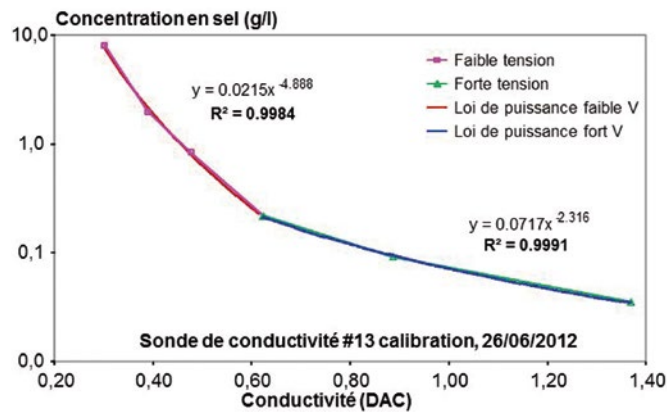


Figure 5. Réponse de la sonde de conductivité n° 13 en fonction de la concentration et modélisation.

Nous avons constaté une bonne stabilité de la réponse pendant la durée d'une manipulation sur les solutions salines à 37°C, sous agitation (**Figure 6**). Le contrôle de la stabilité de l'ensemble de la chaîne d'acquisition a été effectué pendant 30 jours par l'utilisation de charges fictives (*dummies*) : REF1, simulant la sonde de température, est purement résistive et fournit une tension RMS d'environ 1 270 mV, la stabilité de la mesure a été de 0,03 % ; REF2, simulant la sonde de conductivité est une impédance complexe qui fournit une tension RMS d'environ 373 mV, la stabilité de la mesure a été de 0,09 %, soit une stabilité équivalant en concentration de NaCl à 0,22 % de la mesure.

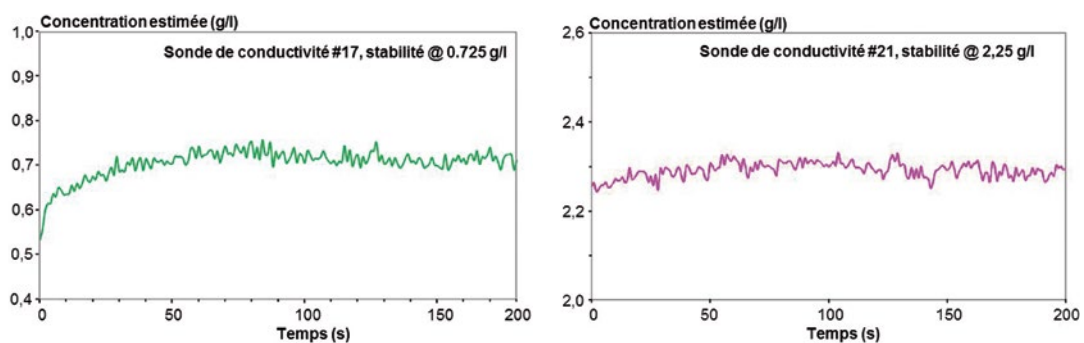


Figure 6. Stabilité des sondes de conductivité à deux concentrations pendant une expérimentation.

Mesures sur les sujets

Le positionnement des sondes de conductimétrie en bouche est très délicat. En effet, la concentration est très hétérogène suivant l'emplacement de la sonde de mesure. Pour une mesure fiable elle doit baigner dans le flux salivaire, dans une zone de circulation, mais toutefois assez éloignée du bol alimentaire afin de ne pas mesurer l'aliment lui-même. De plus, pour le confort, la sonde ne doit pas gêner la mastication, ni bouger pendant celle-ci.

La fixation des sondes est elle aussi délicate. D'un point de vue purement technique, l'idéal serait de les fixer par un piercing dans la joue des sujets, mais...

Nous avons donc testé plusieurs méthodes (**Figure 7**) :

- ✓ la suspension sublinguale par les fils, mais la sonde n'était pas en contact permanent avec la salive ;
- ✓ par colle dentaire, mais cette colle provoquait des courts-circuits sous l'effet de la salive ;
- ✓ par un couple d'aimants, un de chaque côté de la joue, solution un peu plus aisée à mettre en œuvre, et qui permet d'ajuster la position de la sonde assez facilement.

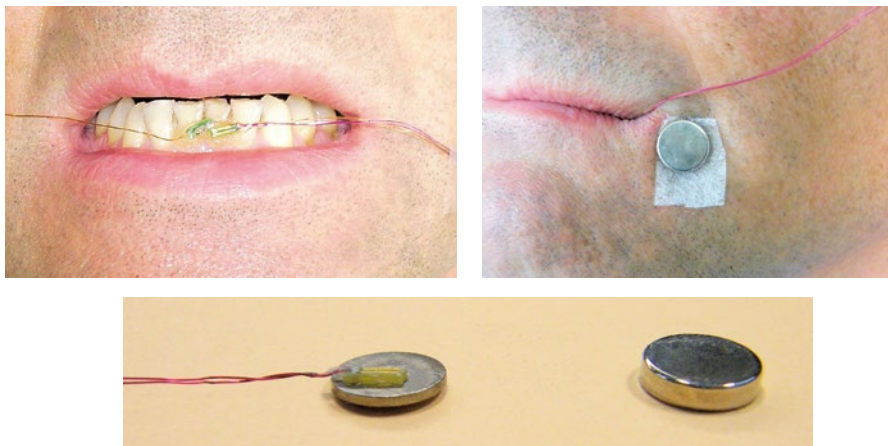


Figure 7. Différents essais de fixation et de positionnement de la sonde en bouche (photo : P. Mielle).

Les premières mesures ont été effectuées sur des aliments courants contenant une quantité de sel assez importante : des cubes de fromage apéritif, du jambon sec et enfin des crackers apéritif. Afin de prendre en compte la concentration en sel initiale dans la salive, la moyenne des valeurs initiales sur 30 s a été retirée de toutes les concentrations calculées (*offset*). Le comportement de la libération du sel dans la salive a été assez différent pour chacun de ces trois produits (**Figure 8**) :

- ✓ dans les cubes de fromages apéritif, le sel est réparti également dans toute l'épaisseur (*bulk*), sa libération est donc quasi-constante dès le début de la mise en bouche ;
- ✓ dans le jambon sec, le sel est emprisonné dans les fibres de la viande, qui doivent être ramollies afin de permettre sa libération ;
- ✓ dans les crackers apéritif, le sel se trouve uniquement en surface, sous forme de grains fins, sa libération commence donc dès que le sel commence à se dissoudre dans la salive.

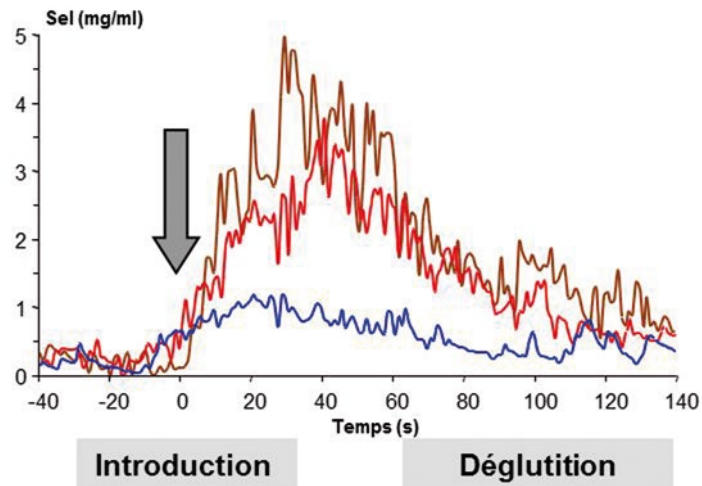


Figure 8. Mesures sur un panéliste de la libération de sel pour divers aliments : en bleu, cubes de fromage apéritif ; en rouge, jambon sec ; en marron, crackers apéritifs.

Conclusion

Nous avons observé des résultats fiables et reproductibles sur les différents aliments testés, avec une très bonne sensibilité, un temps de réponse court et sans temps de latence. De plus, l'ensemble peut être positionné en bouche de manière sûre et aisée, avec des risques de détérioration réduits pendant la mastication.

Les différences constatées dans les courbes de libération du sel sont liées d'une part à la texture de l'aliment, ainsi qu'à la distribution du sel, mais principalement aux différences interindividuelles entre les sujets, dues à des mastications très différentes (Figure 9).

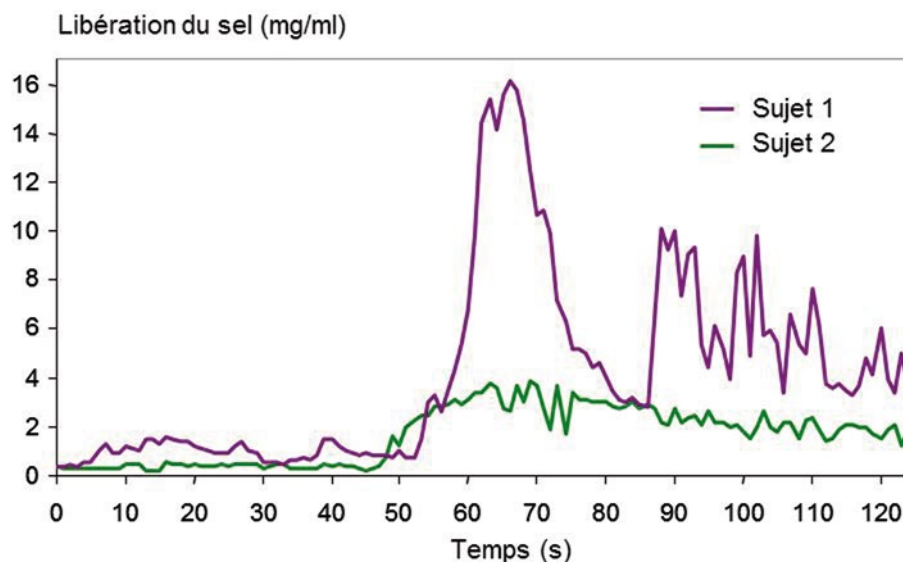



Figure 9. Différences interindividuelles entre deux panélistes dans la libération de sel pendant la mastication.





Le relatif confort observé pendant l'utilisation va permettre un couplage de la réponse sensorielle temporelle au goût salé avec la mesure instrumentale de la libération du sel. La sonde développée est également utilisée avec succès sur le simulateur de mastication « Bouche Artificielle ».

La sonde peut être également utilisée sur des aliments servis chauds (snacks), la réponse étant pondérée par un capteur de température miniature.

Références bibliographiques

US Department of Health and Human Services, US Department of Agriculture : Dietary guidelines for Americans, USA, 2005.

Maratray J, Mielle P, Bé A (2007) La bouche artificielle. *Cahier des Techniques de l'INRA* **60** : 37-44.

Pionnier E, Le Quere JL, Salles C (2005) Real time release of flavor compounds and flavor perception. An application to cheese, in : *Food Flavor and Chemistry : Explorations into the 21st Century*. Cambridge : Royal Soc Chemistry, 13-22.

Salles C, Tarrega A, Mielle P, Maratray J, Gorria P, Liabeuf J, Liodenot JJ (2007) Development of a chewing simulator for food breakdown and the analysis of in vitro flavor compound release in a mouth environment. *J Food Eng* **82** : 189-198.