Approche multidisciplinaire combinant l'imagerie par résonance magnétique ^{23}Na, la libération in-vitro de sodium et l'évaluation sensorielle pour étudier les interactions sel-aliments et optimiser l'utilisation du sel de table par les consommateurs

Raphaël Monod

Académie d'Agriculture de France – 23/09/2026

Direction de thèse

Dr. Thierry Thomas-Danguin, Directeur de recherche – UMR CSGA

Dr. Sylvie Clerjon, Ingénieure de recherche – INRAE UR QuaPA/Plateforme AgroResonance

Une consommation de sel supérieure aux recommendations

La majorité de la population consomme trop de sel

Apport moyen ~ 9 à 12 g de sel/jour

Recommandation pour adultes = 5 g de sel/jour

World Health Organization

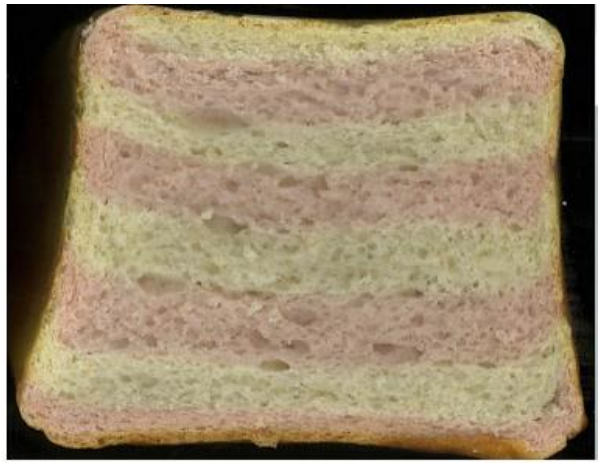
anses

Il est recommandé aux consommateurs de :

- limiter leurs consommations d'aliments les plus salés,
- connaître la composition des aliments en lisant les étiquetages,
- limiter les ajouts de sel lors de la préparation et pendant les repas.

Sal & Mieux

Stratégies de réduction du sel (1/3) : Distribution hétérogène en sel



Noort et al., J. Cer. Sci., 2010

Réduction possible du sodium dans le pain de 28% sans diminution de l'intensité salée

Observé aussi pour :

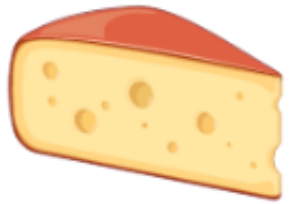
- **Viande (Xiong et al., IJFST, 2020)**
- **Quiche (Emorine et al., FRI, 2020)**
- **Pizza (Guilloux et al., J. Sens. Stu., 2015)**

Une répartition inégale du sel a été obtenue sur du pain en utilisant du gros sel (Konitzer et al., JAFC, 2013)

Stratégies de réduction du sel (2/3) : Augmenter la mobilité des ions sodium

Solution visqueuse

Roseit et al., JFS, 1994

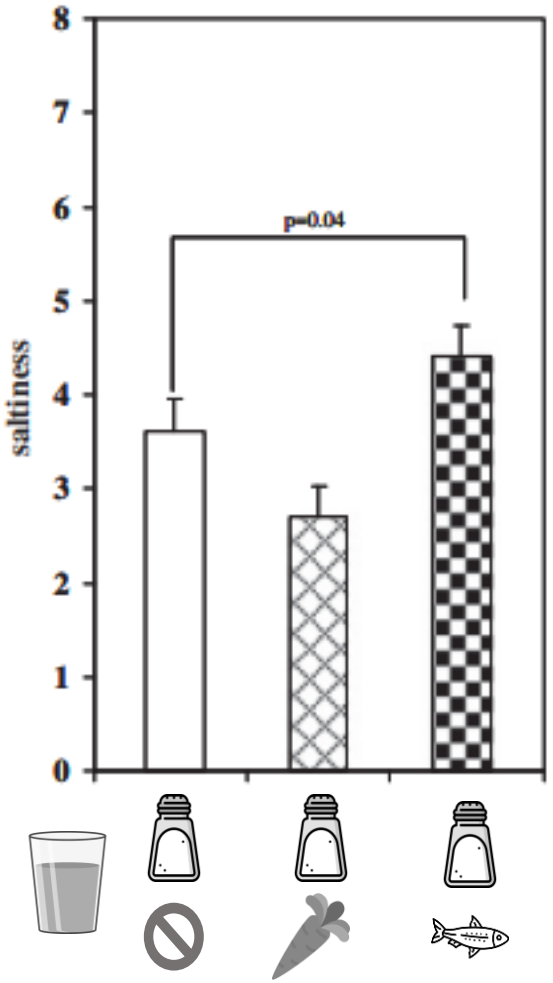


Fromages modèles

Boisard, Thesis, 2012

Etudiée par RMN ^{23}Na

Stratégies de réduction du sel (3/3) : Utilisation d'arômes



Nasri et al., FQAP, 2011

La teneur en sodium peut être diminuée sans impacter la perception grâce à l'utilisation d'arômes soigneusement sélectionnés

Observé aussi pour :

- **Fromages modèles (Lawrence et al., FQAP, 2009)**
- **Soupe de pois (Aveline et al., FQAP, 2022)**
- **Plat de pâtes au poulet (Barnett et al., JFS, 2019)**

Augmentation de l'intensité du goût salé grâce à l'utilisation d'ail fumé et d'herbes aromatiques (Aveline et al., FQAP, 2022; Barnett et al., JFS, 2019)

Reproduire ces stratégies dans un contexte domestique

3 stratégies pour aliments manufacturés

Comment les appliquer à des pratiques domestiques ?

Hétérogénéité de la distribution en sel	Moment de l'ajout de sel (Hypothèse)
Augmentation de la mobilité des ions sodium	Taille des cristaux de sel (Hypothèse)
Utilisation d'arômes	Utilisation de sels aromatisés, d'herbes et d'épices (Hypothèse)

Reproduire ces stratégies dans un contexte domestique

3 stratégies pour aliments manufacturés

Comment les appliquer à des pratiques domestiques ?

- Hétérogénéité de la distribution en sel
- Augmentation de la mobilité des ions sodium
- Utilisation d'arômes

- Moment de l'ajout de sel (Hypothèse)
- Taille des cristaux de sel (Hypothèse)
- Utilisation de sels aromatisés, d'herbes et d'épices (Hypothèse)

- *Impact sur la perception du goût salé ?*
- *Rôle de la matrice alimentaire ?*
- *Existe-t-il des liens entre la distribution, la mobilité et la perception ?*

Reproduire ces stratégies dans un contexte domestique

3 stratégies pour aliments manufacturés

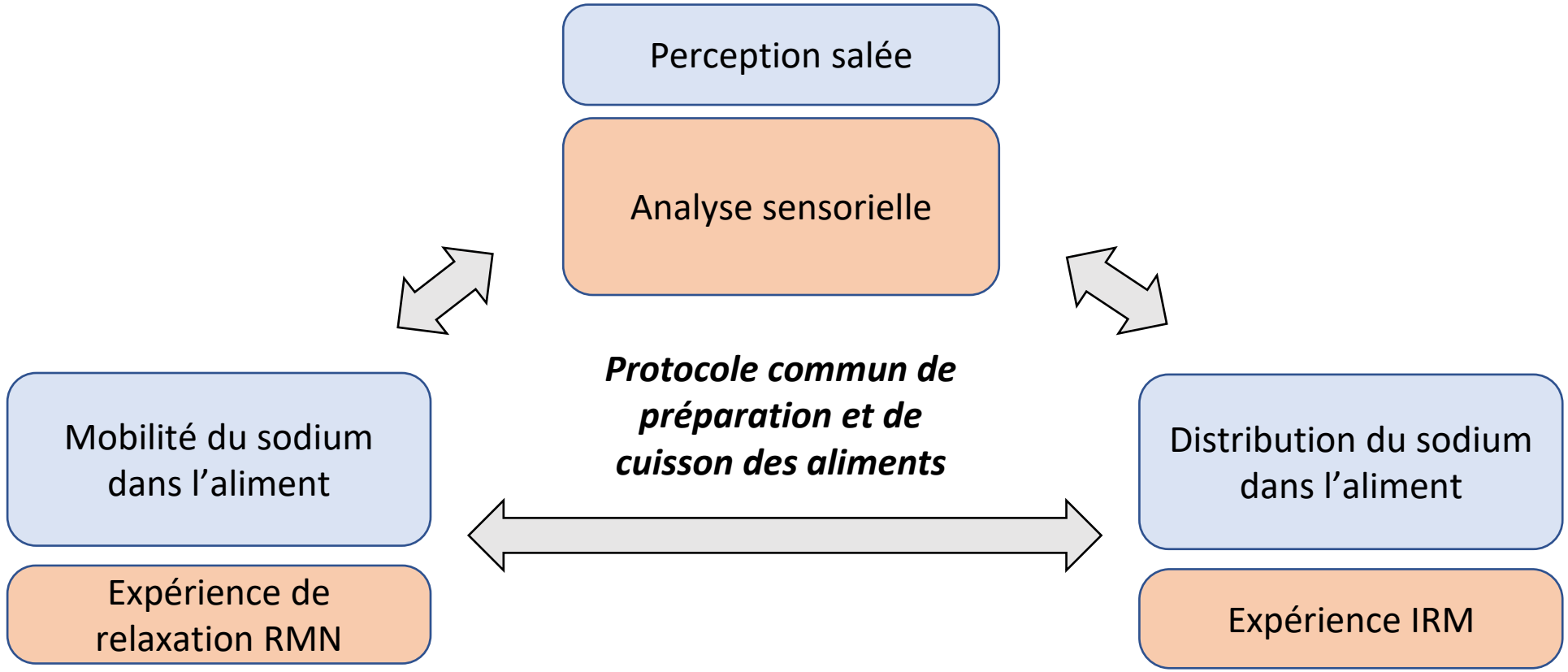
Comment les appliquer à des pratiques domestiques ?

- Hétérogénéité de la distribution en sel
- Augmentation de la mobilité des ions sodium
- Utilisation d'arômes

- Moment de l'ajout de sel (Hypothèse)
- Taille des cristaux de sel (Hypothèse)
- Utilisation de sels aromatisés, d'herbes et d'épices (Hypothèse)

- *Impact sur la perception du goût salé ?*
- *Rôle de la matrice alimentaire ?*
- *Existe-t-il des liens entre la distribution, la mobilité et la perception ?*

Approche scientifique



Pratiques domestiques de cuisson et d'assaisonnement

Aliments réels et largement consommés dans le monde

Pratique de cuisson domestique

Monod et al., MethodsX, 2024

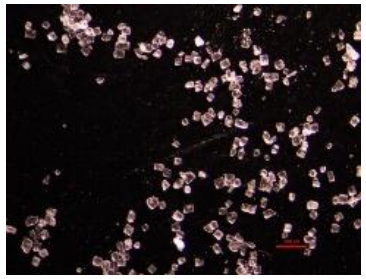
Plan expérimental

Moment d'ajout du sel

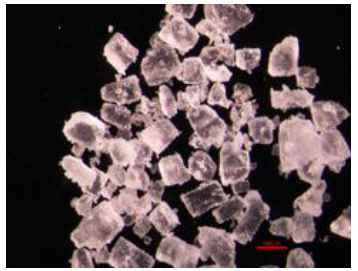
Dans l'eau

A l'assiette (après cuisson)

Types de cristaux de sel



Sel micronisé 175 µm



Sel fin de mer 500 µm

Fleur de Sel 1000 µm

Niveaux de salage

Habituel

Réduit (-50%)

Perception salée

Analyse sensorielle

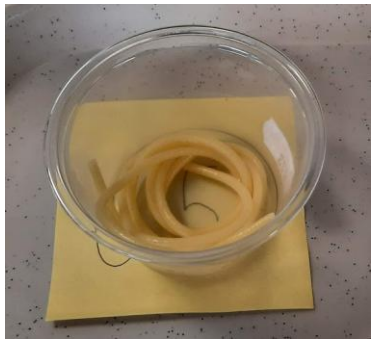
Mobilité du sodium dans l'aliment

Expérience de relaxation RMN

Distribution du sodium dans l'aliment

Expérience IRM

Méthodologie



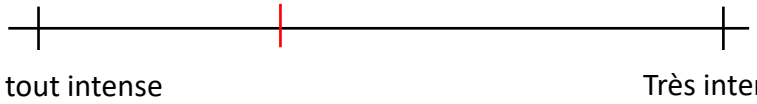
70 participants naïfs
57 % Femmes
Age moyen 40

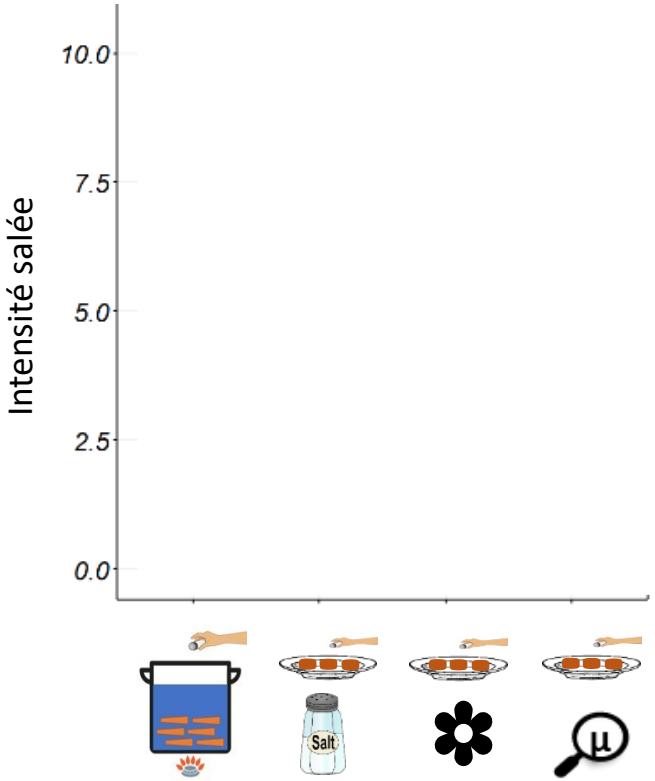
74 participants naïfs
51 % Femmes
Age moyen 43

222 participants naïfs
54 % Femmes
Age moyen 44

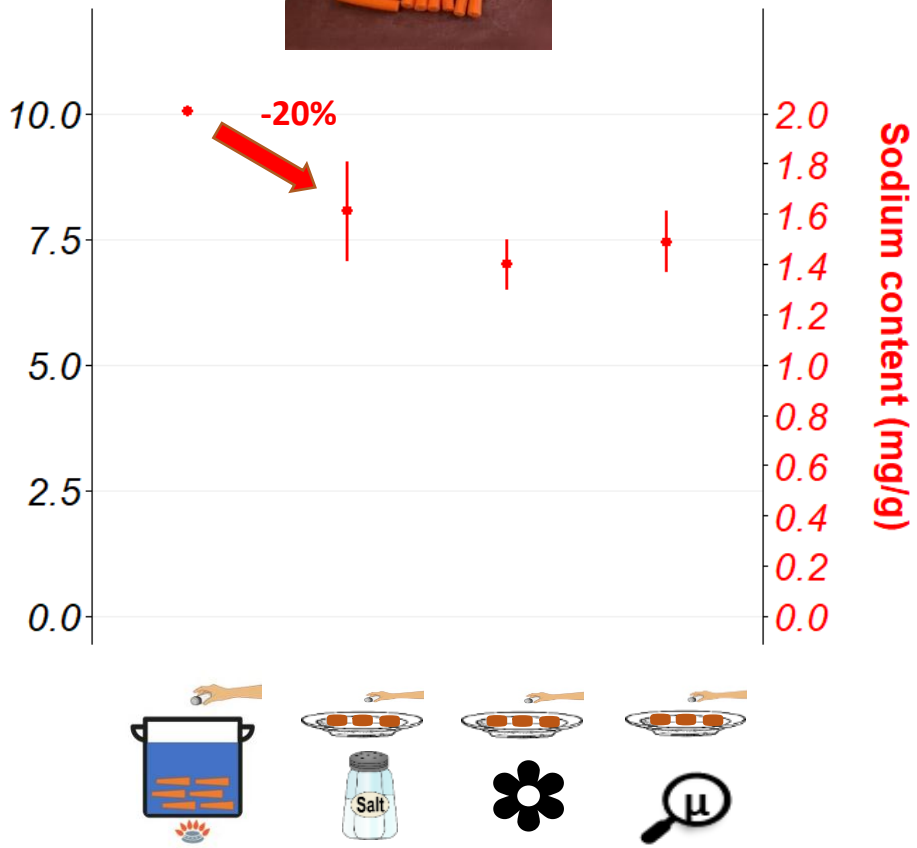
Méthodologie

Intensité salée



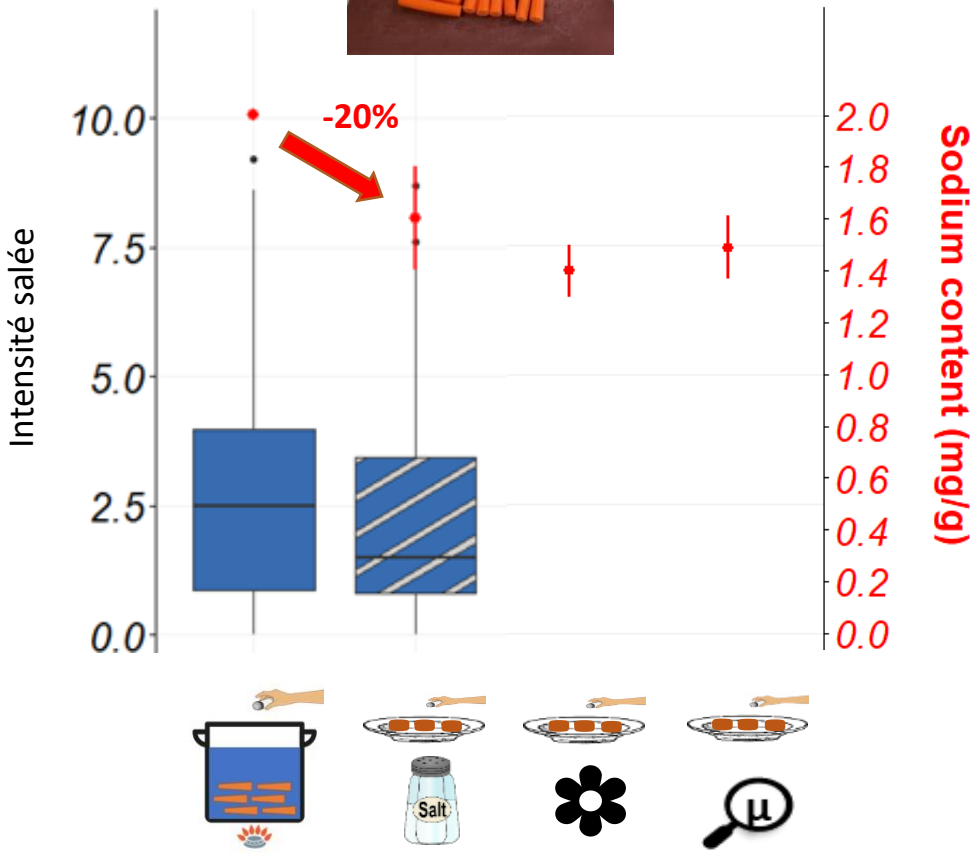


Résultats – **Niveau habituel**

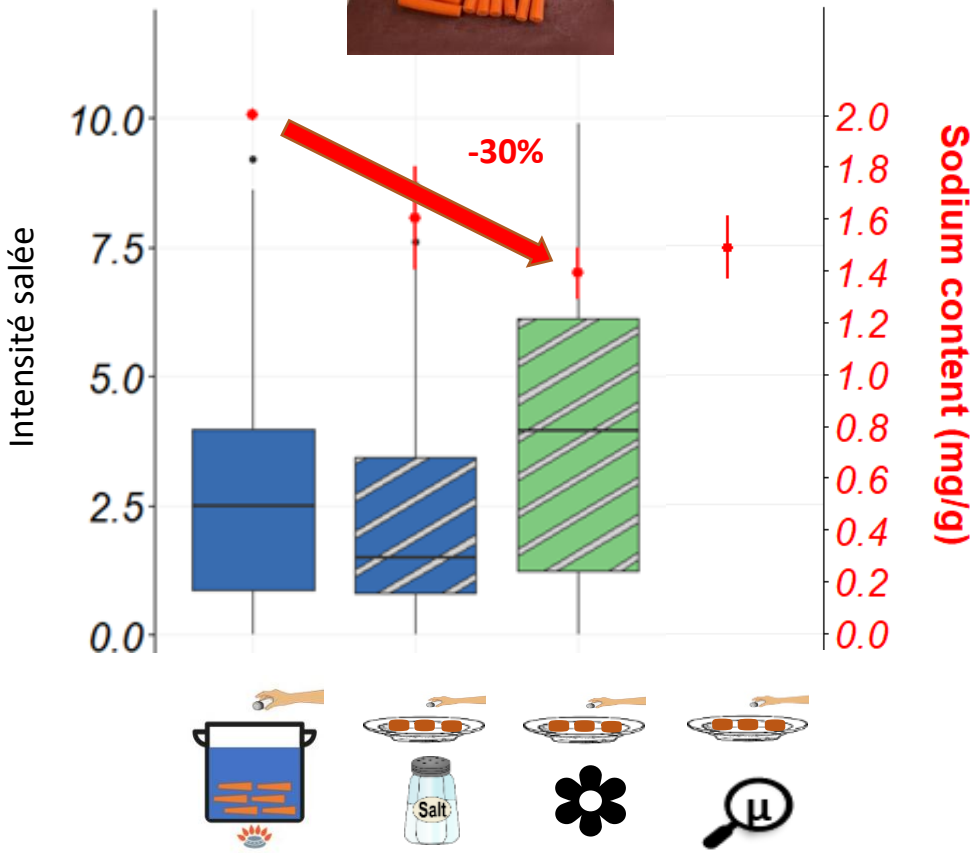


Teneur en sodium mesurée par méthodes analytiques

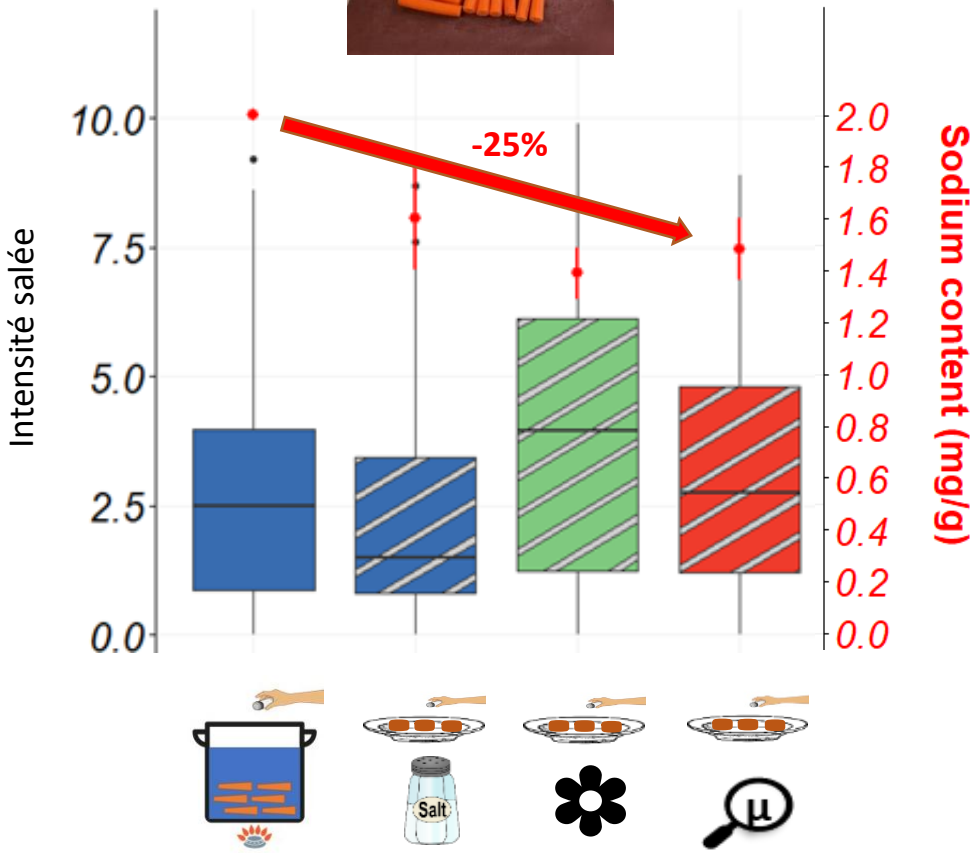
Résultats – **Niveau habituel**



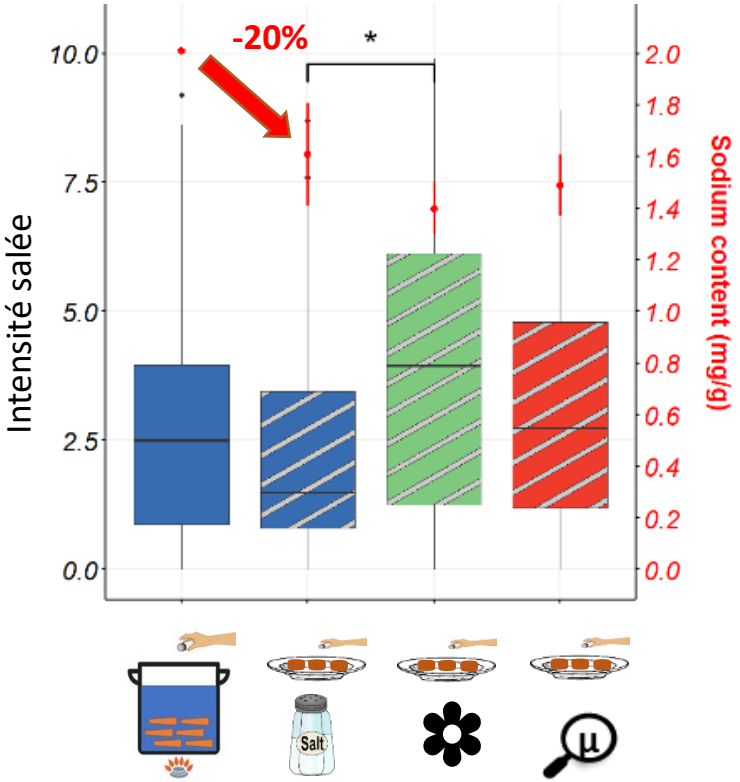
Résultats – **Niveau habituel**

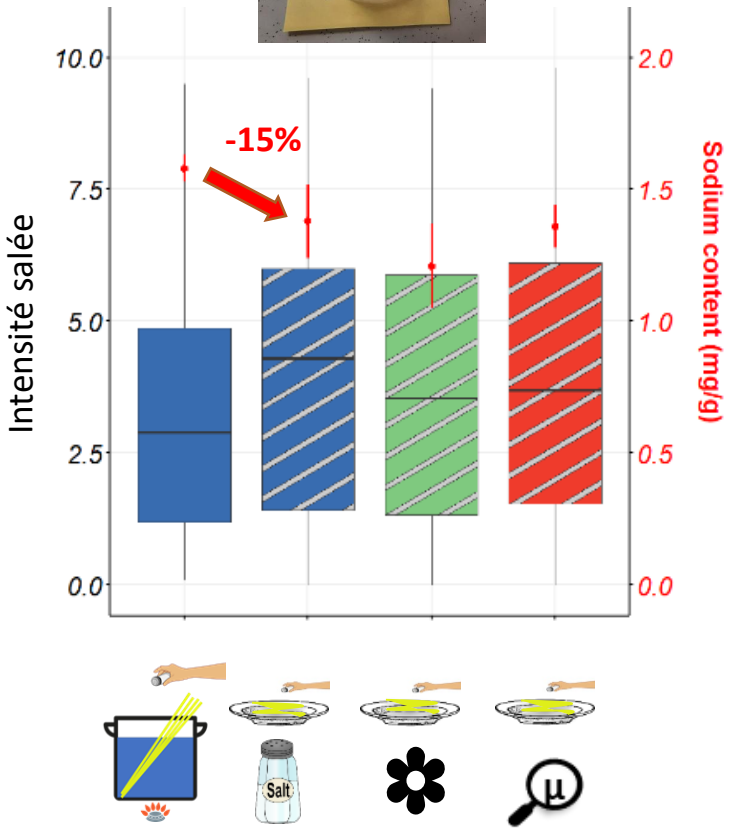


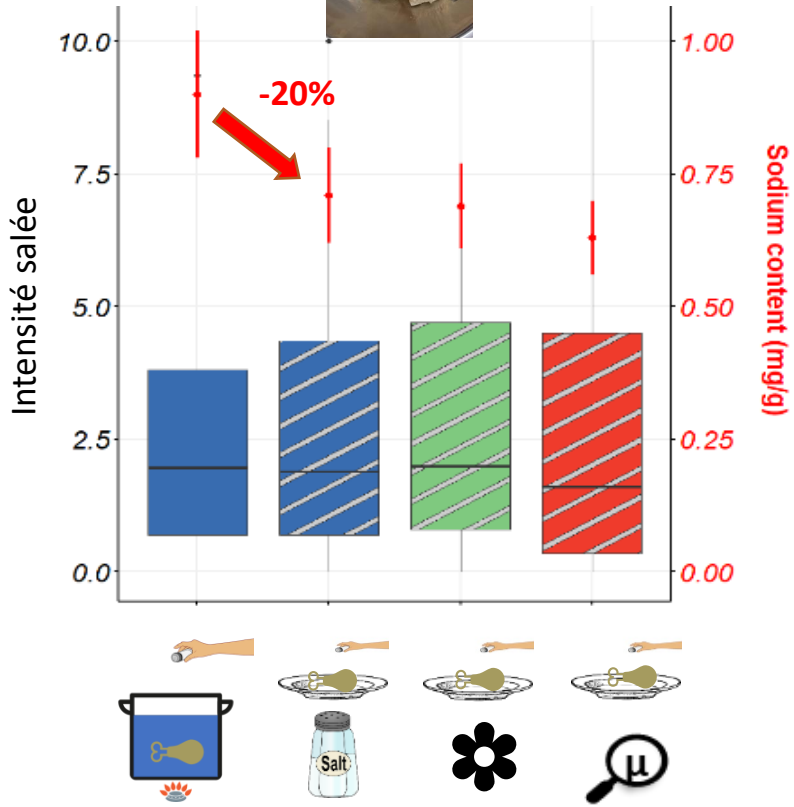
Résultats – **Niveau habituel**



Résultats – **Niveau habituel**



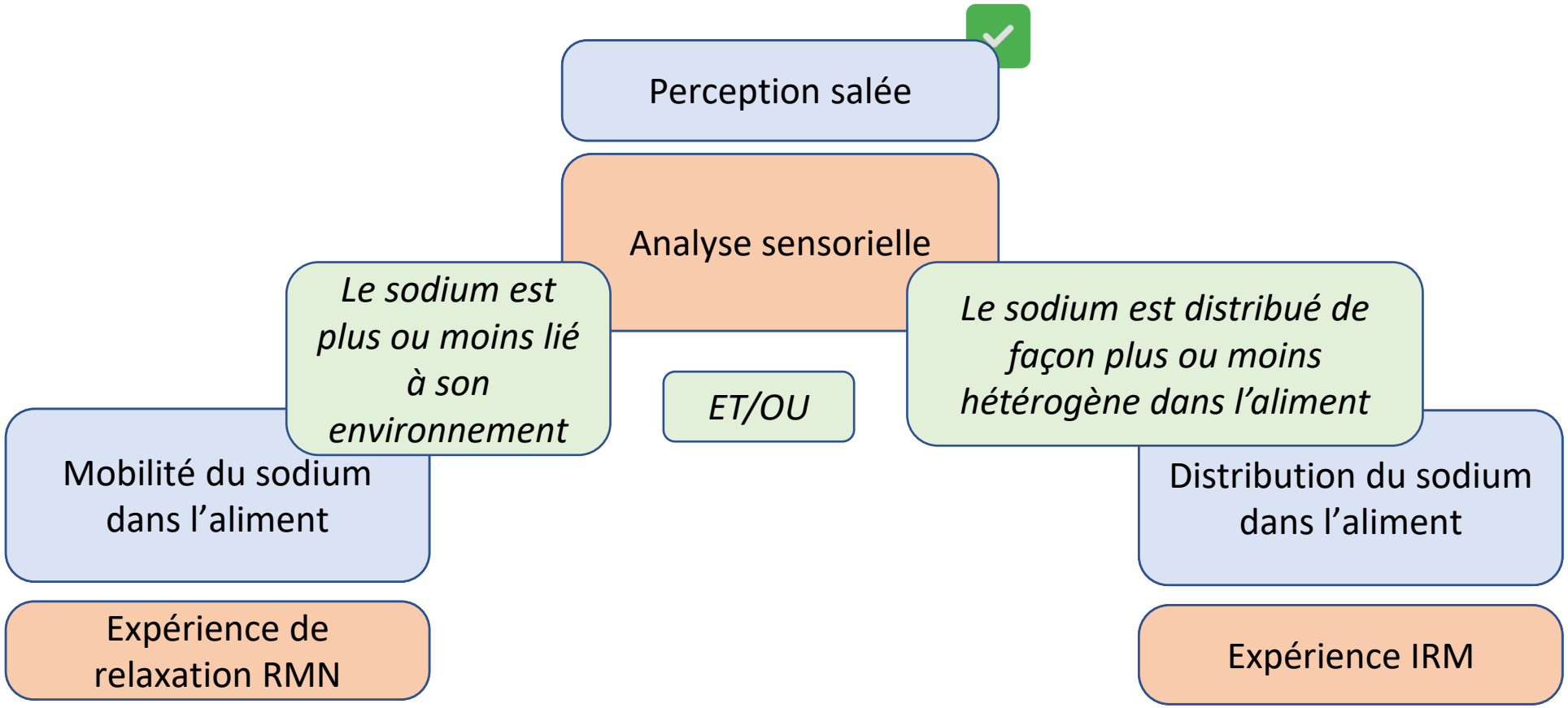




Conclusion

Pour les deux niveaux de salage et pour les trois aliments :

- Il est possible de réduire la teneur en sodium d'au moins 20 % sans diminuer l'intensité du goût salé, en salant à l'assiette, et ce quel que soit le type de sel utilisé.


Perception salée
Analyse sensorielle
Le sodium est plus ou moins lié à son environnement
ET/OU
Le sodium est distribué de façon plus ou moins hétérogène dans l'aliment
Mobilité du sodium dans l'aliment
Distribution du sodium dans l'aliment
Expérience de relaxation RMN
Expérience IRM

Perception salée

Analyse sensorielle

Le sodium est plus ou moins lié à son environnement

ET/OU

Le sodium est distribué de façon plus ou moins hétérogène dans l'aliment

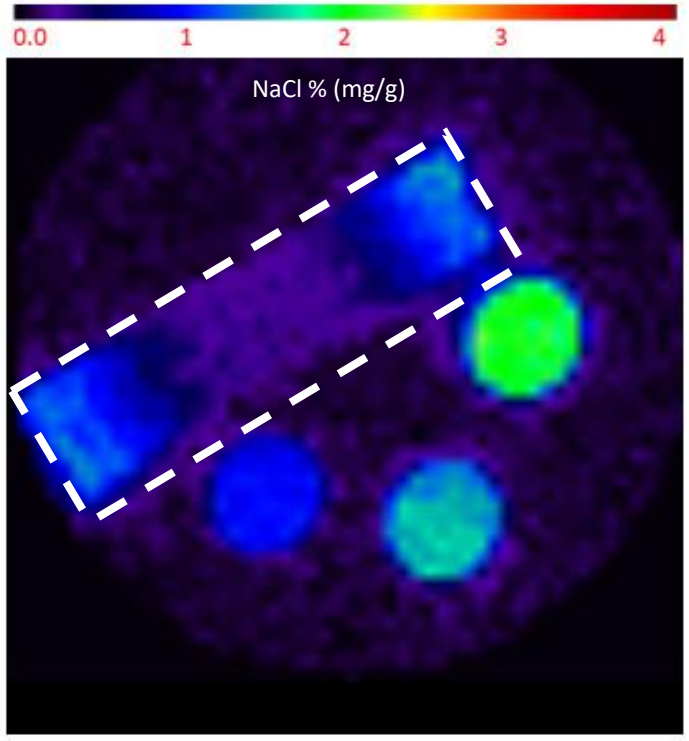
Mobilité du sodium dans l'aliment

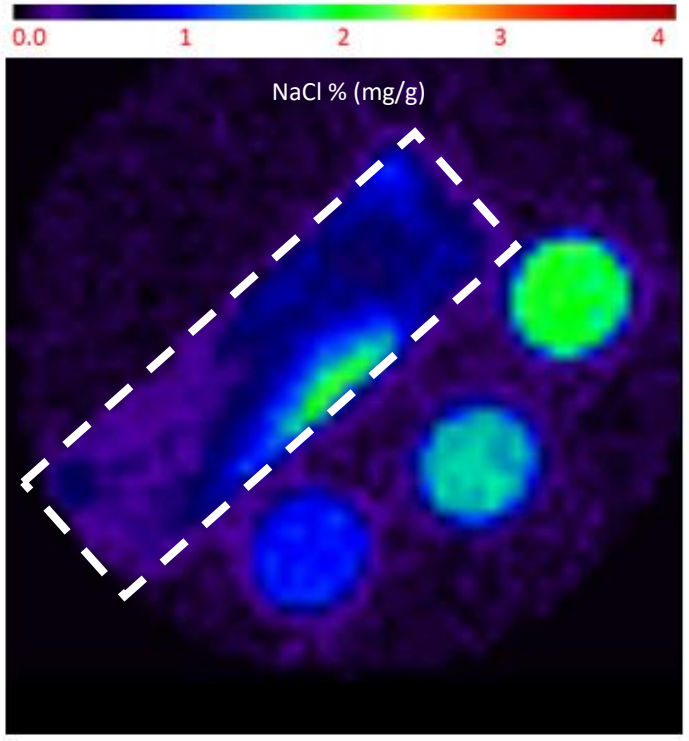
Expérience de relaxation RMN

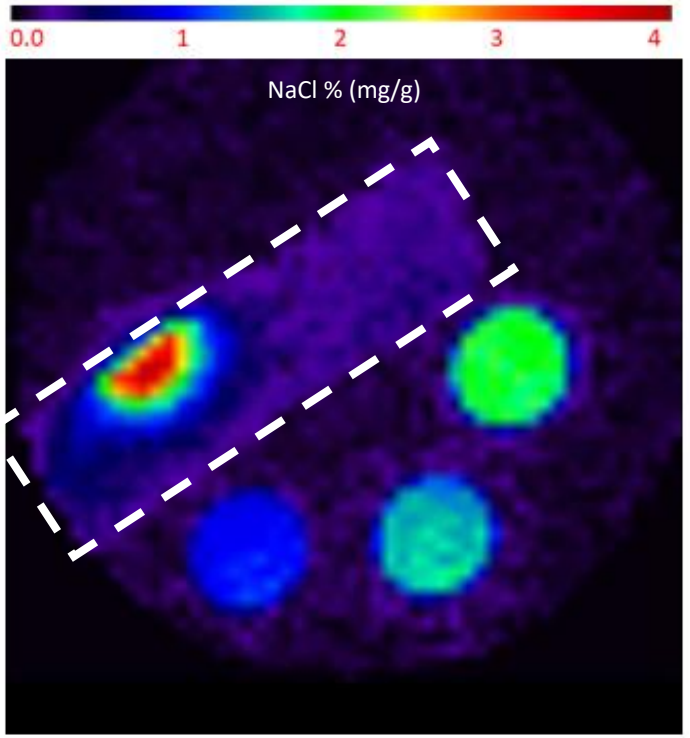
Distribution du sodium dans l'aliment

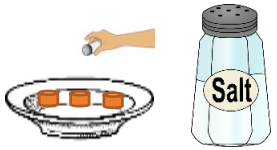
Expérience IRM

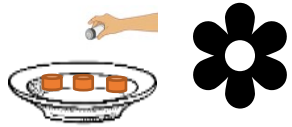
Résultats



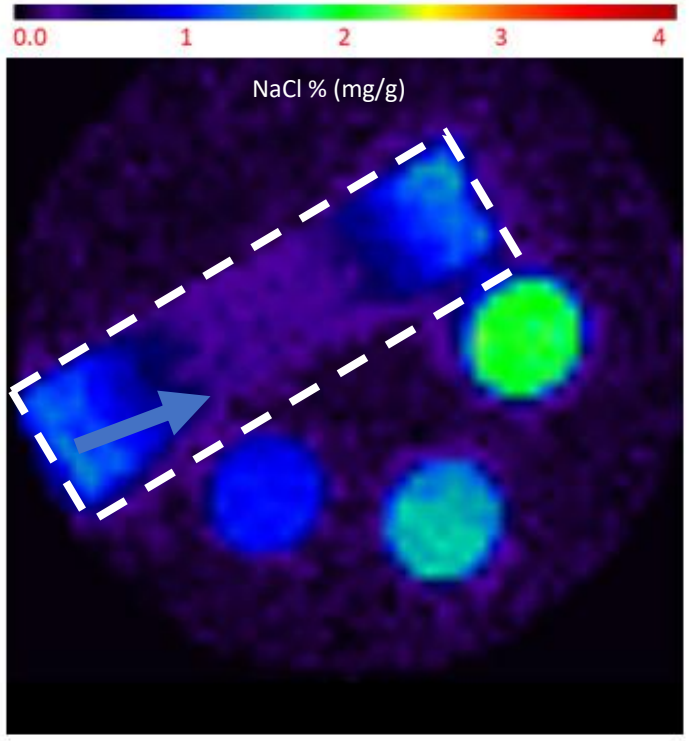


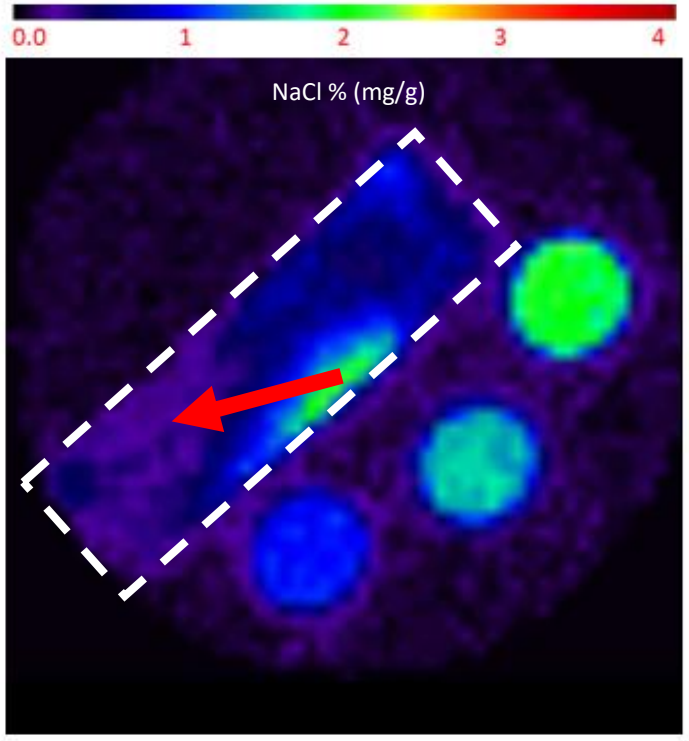


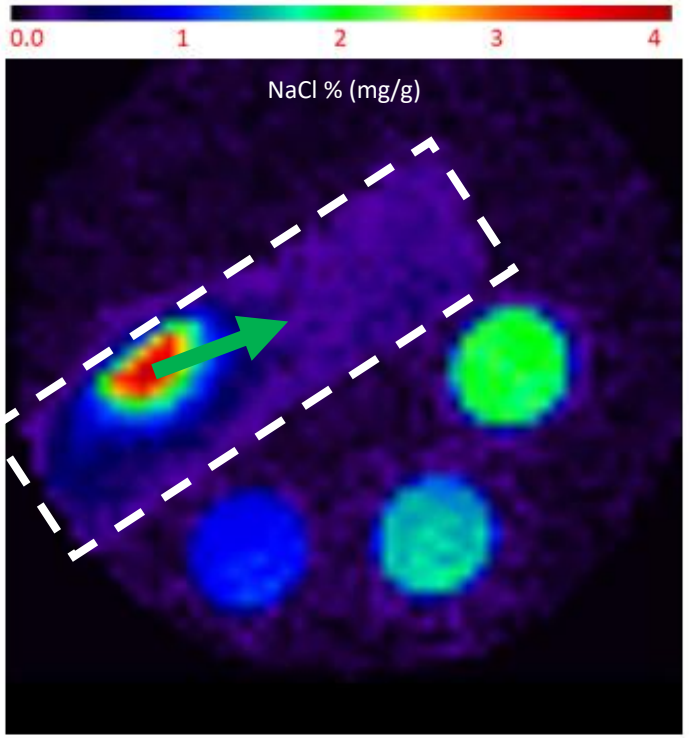


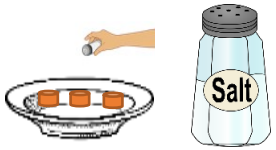


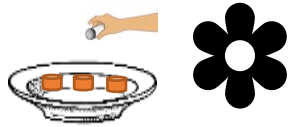
Résultats



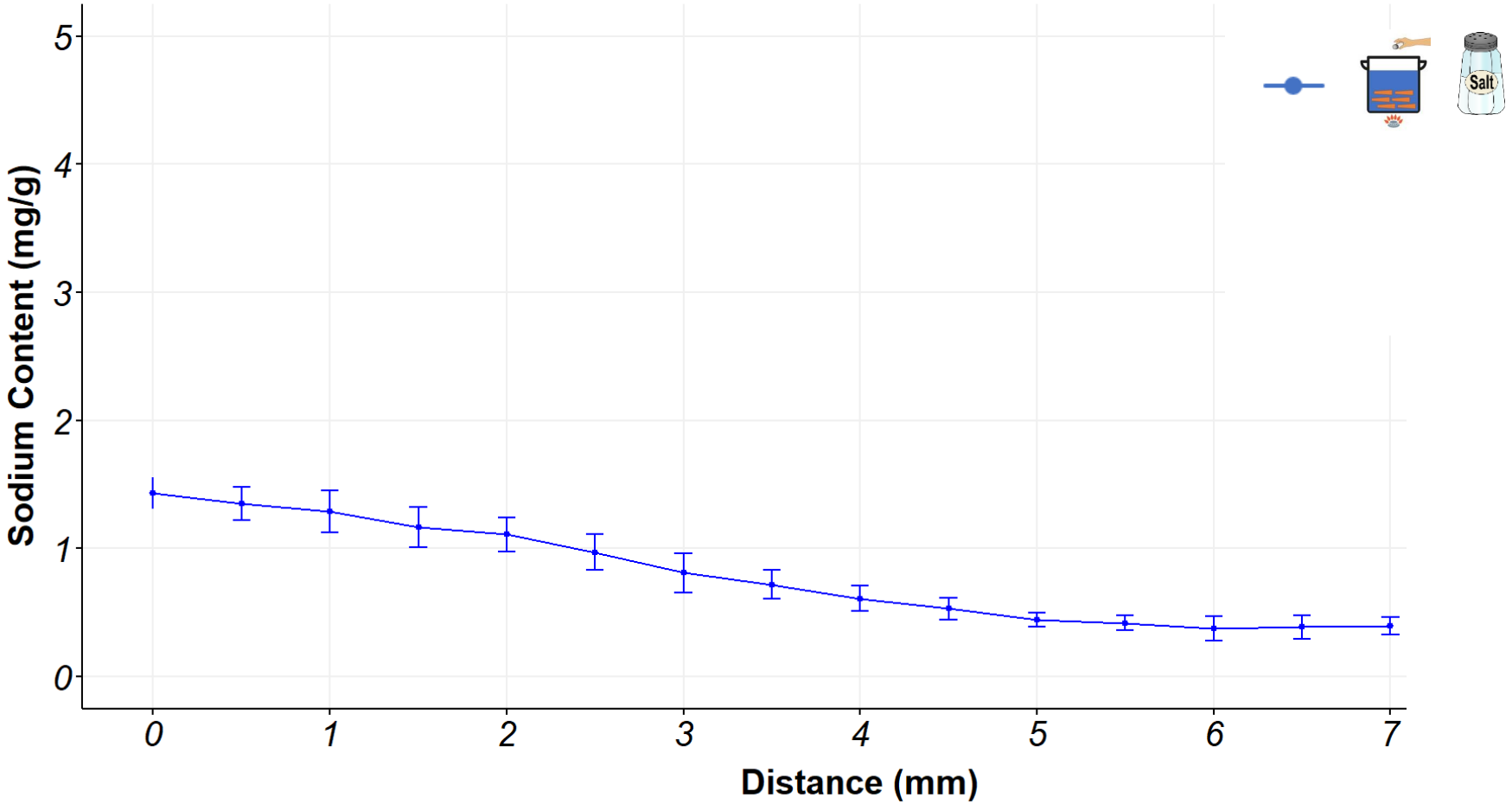




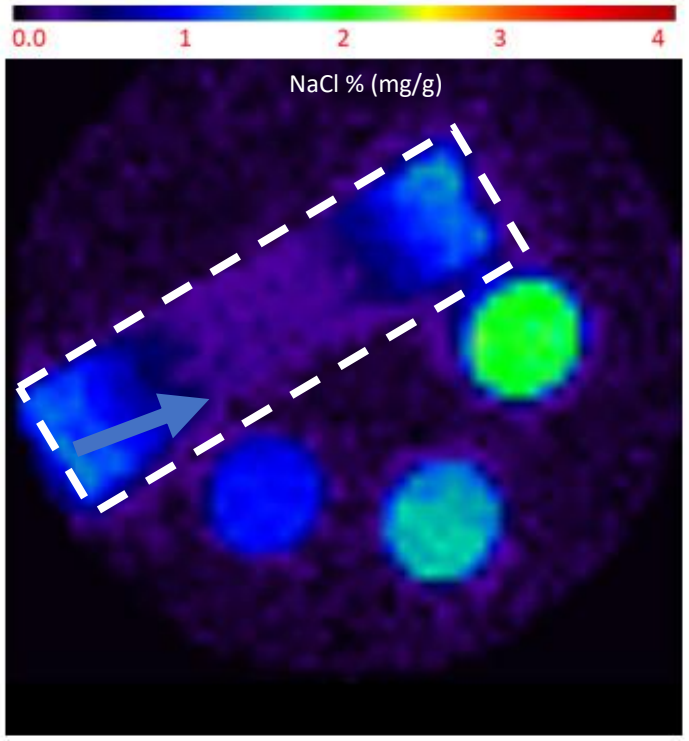




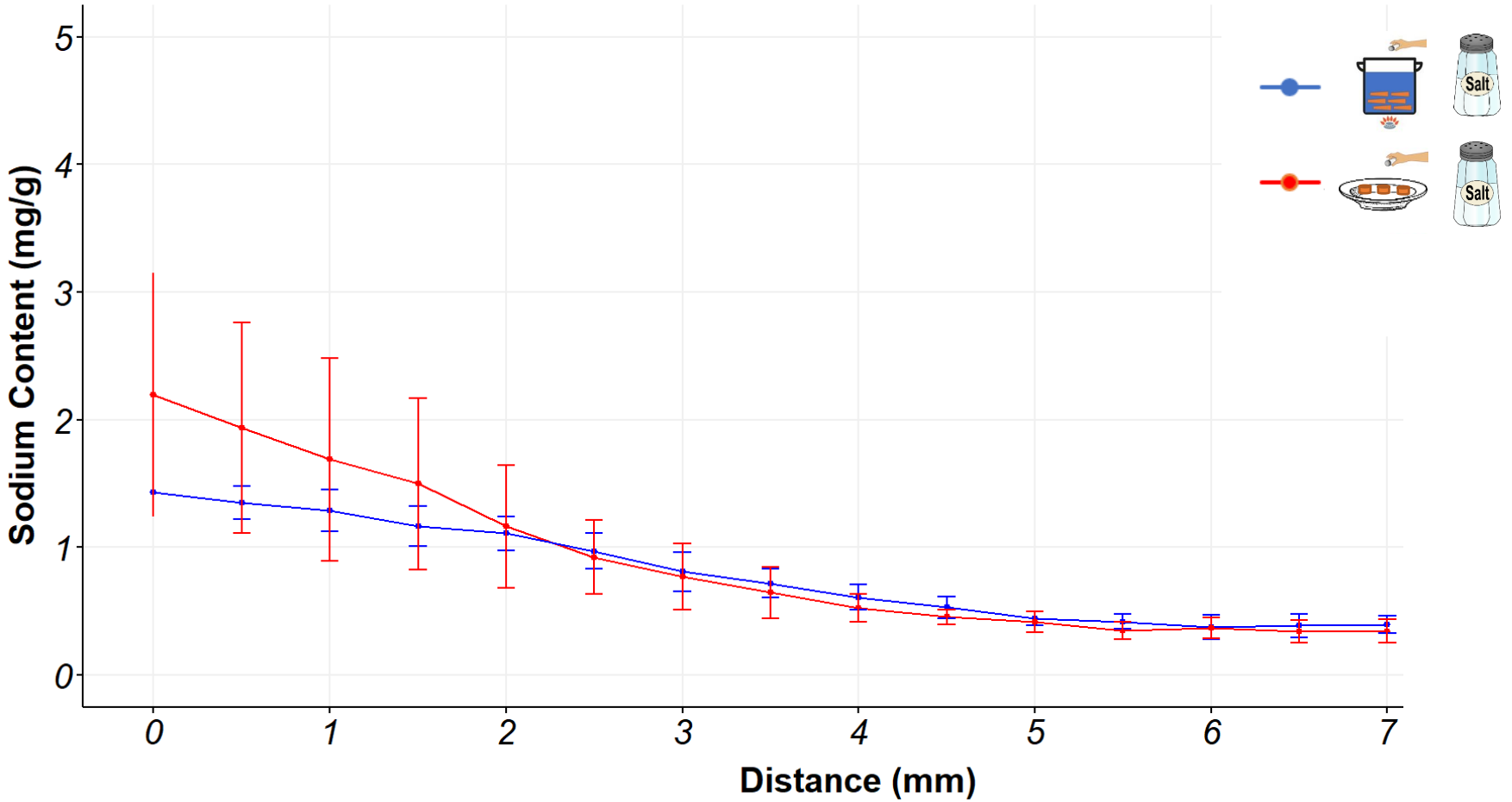
Résultats

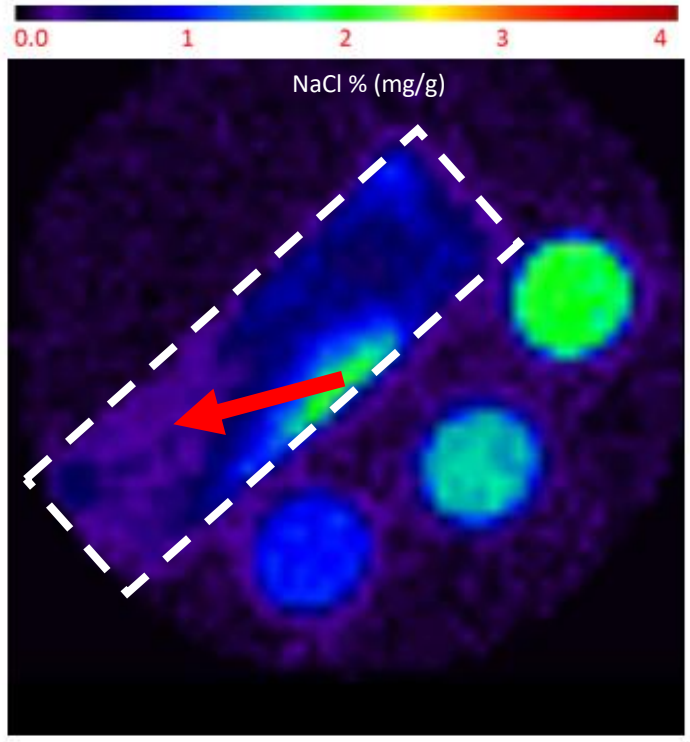

Sodium Content (mg/g)
0
1
2
3
4
5
0
1
2
3
4
5
6
7
Distance (mm)

Salt

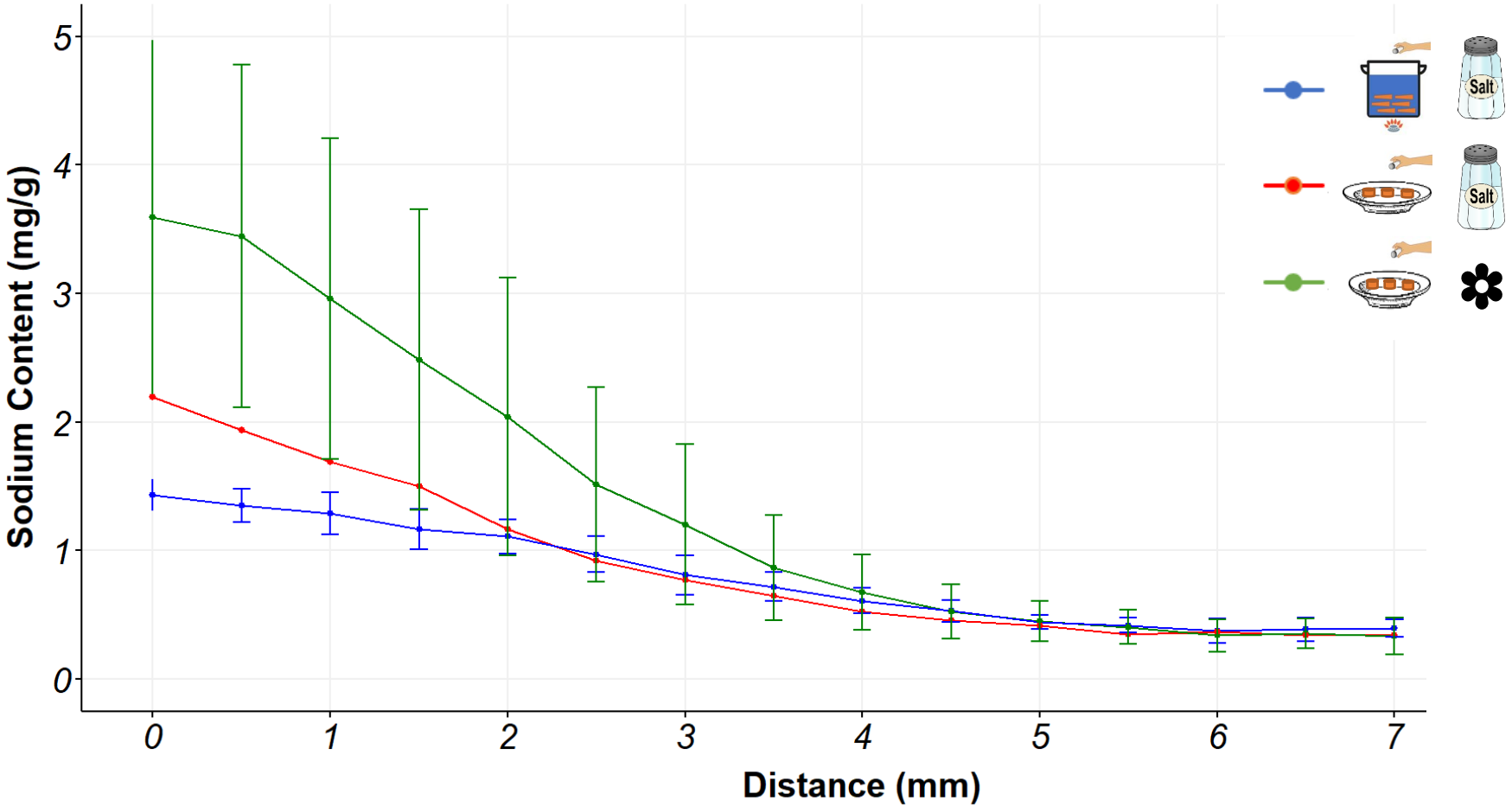

0.0
1
2
3
4
NaCl % (mg/g)

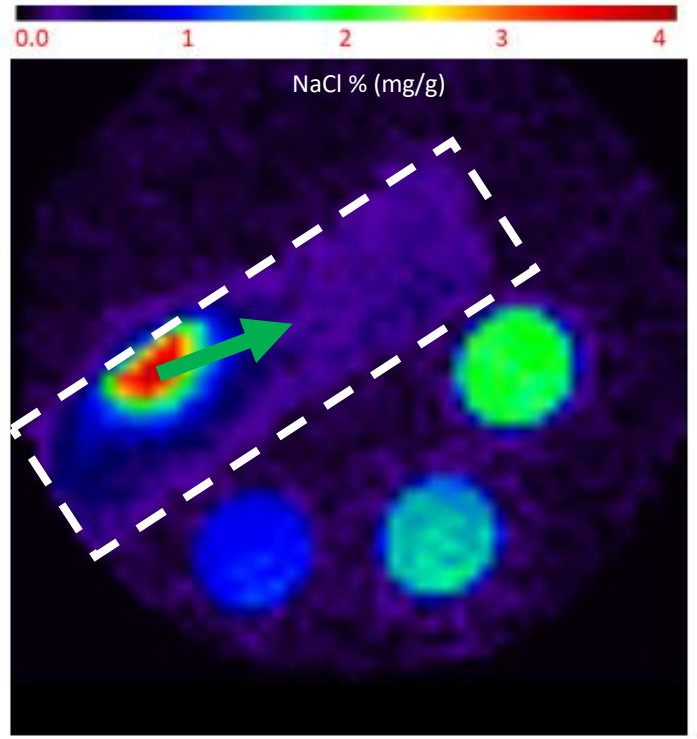
Résultats


Sodium Content (mg/g)
0
1
2
3
4
5
Distance (mm)
0
1
2
3
4
5
6
7
Salt
Salt


0.0
1
2
3
4
NaCl % (mg/g)

Résultats


Sodium Content (mg/g)
Distance (mm)
0
1
2
3
4
5
6
7
Salt
Salt


0.0
1
2
3
4
NaCl % (mg/g)

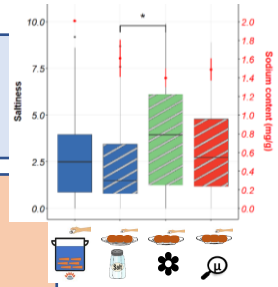
Conclusion

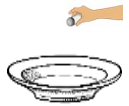
- La répartition du sodium est significativement plus hétérogène lorsque le salage est effectué à l'assiette plutôt que dans l'eau de cuisson

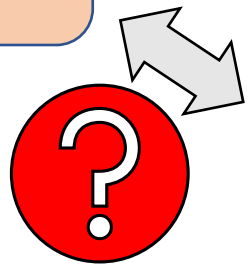
- Cet effet est accentué lorsque l'on utilise de la fleur de sel.

Perception salée

Analyse sensorielle

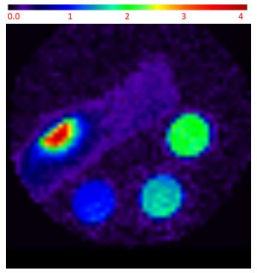


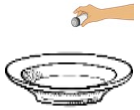




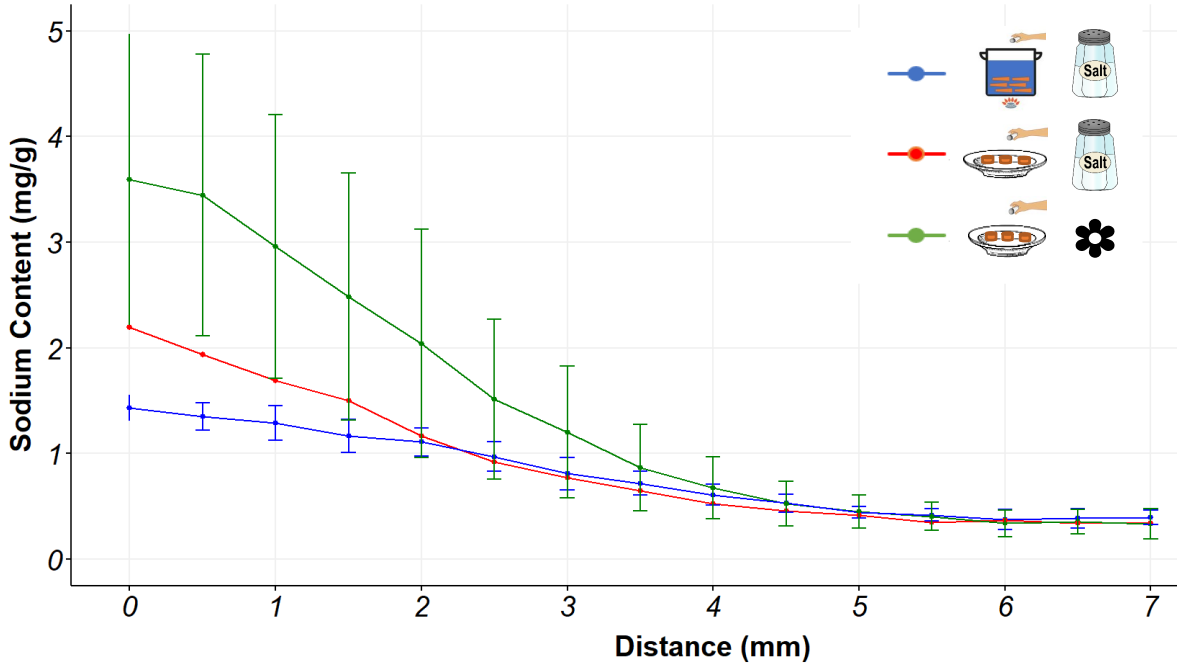
Distribution du sodium dans l'aliment

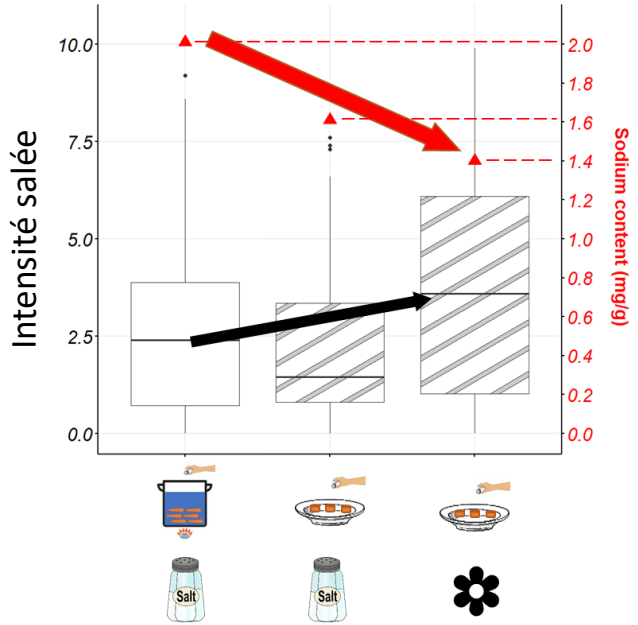
Expérience IRM





Liens entre la répartition du sodium et l'intensité du goût salé





Les résultats d'IRM confirment que l'hétérogénéité de la répartition du sel contribue à l'augmentation de l'intensité de la perception salée

L'hétérogénéité entraîne des pics de libération de sel pendant la mastication, ce qui renforce la sensation de salé (hypothèse)

On sait que la libération par intermittence de sel lors de la mastication renforcent la perception du sel (Busch et al., Chem. Se., 2009)

Lié à nos récepteurs gustatifs, qui sont des détecteurs sensibles aux contrastes

Liens entre la répartition du sodium et l'intensité du goût salé

Données complémentaires

Peut-on observer de tels pics de libération de sel lors d'une mastication *in vitro* ?

Le fait de saler directement dans l'assiette avec de la fleur de sel a entraîné une cinétique de libération du sel *in vitro* significativement plus variable pendant la mastication que le salage dans l'eau.

Liens entre la répartition du sodium et l'intensité du goût salé

- Le salage à l'assiette a entraîné une répartition hétérogène du sodium, ce qui a provoqué des pics de libération de sel pendant la mastication, renforçant ainsi le goût salé.
- Ce phénomène a été observé sur une matrice alimentaire réelle et en suivant un protocole domestique de cuisson et d'assaisonnement.
- Des images IRM temporelles ont montré que l'hétérogénéité de la distribution en sel lors du salage à l'assiette diminue avec le temps

Recommandations :

- ✓ Saler après la cuisson et juste avant de manger, en utilisant du sel fin ou des cristaux plus gros
- ✓ Utiliser des arômes tels que le bacon fumé et l'ail fumé (données non présentées – observation réalisée sur du poulet)

Sel fin de mer
500 µm

Fleur de sel
1000 µm

Valorisation

Tenth European Conference on Sensory and Consumer Research
EuroSense2022
A Sense of Earth

Pangborn 2023
15th Pangborn Sensory Science Symposium
Meeting new challenges in a changing world

Wartburg Symposium
on Flavor Chemistry & Biology
October 03 - 06, 2023

MR Food 2024

11th European Conference on Sensory and Consumer Research
EuroSense2024
A Sense of Global Culture
8-11 September 2024 | Dublin, Ireland
Sensory Food Network Ireland

Monod et al., (2024). MethodsX, 12, 102666. https://doi.org/10.1016/j.mex.2024.102666

Monod et al., (2025) International Journal of Food Science. Exploring Culinary Methods to Reduce Sodium Intake: The Impact of Flavorings and Salt Addition Timing in Boiled Chicken

Monod et al., (*in prep*). Seasoning Practices Influence Sodium-Food Interactions and Shape Perceived Saltiness: Insights from a Sodium NMR and Sensory Study

Monod et al., (2025) Food Research International. Quantitative 23Na MRI in boiled carrots: differences in sodium heterogeneities according to the salting practices

Monod et al., (2025) Food Research International. Quantitative ^{23}Na MRI protocol for following the evolution of salt concentration in real food samples.

Monod et al., (2025) Journal of Texture Studies. In vitro monitoring of taste compound release during chewing according to process related parameters of the food

Remerciements

ANR-19-CE21-0009 TRANSFORM Dpt

Direction de these : Thierry Thomas-Danguin

Comité de suivi : Charlotte Sinding, Christian Salles, Hervé This

Etudiants :
- Coline Scribot
- Maud Sebelon
- Elodie Rouleau

Aide technique et scientifique : Léna Nicolle, Bérénice Houinsou-Houssou, Chantal Septier, Claire Follot, Vinciane Thomas-Danguin, Catherine Pedron, Noëlle Béno

Sylvie Clerjon

Jean-Marie Bonny, Guilhem Pagès

- Camille Géliot
- Diamantino Da Cunha
- Léo Ferreira

Jason Sicard

Tous les volontaires aux études sensorielles

Riette de Kock

Nomzamo Magano, Kyle Hay, Clarissa Van Heerden, Josephine Baloyi, Marise Kinnear, Shanece Ramkisson, Irene Darkwa, Zeinab Asadi