



HAL
open science

Formulation, caractérisation et validation d'un pain satiétogène

Peio Touyarou

► **To cite this version:**

Peio Touyarou. Formulation, caractérisation et validation d'un pain satiétogène. Médecine humaine et pathologie. Université de Bourgogne, 2011. Français. NNT : 2011DIJOS011 . tel-00668177

HAL Id: tel-00668177

<https://theses.hal.science/tel-00668177>

Submitted on 9 Feb 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



UNIVERSITE DE BOURGOGNE

Ecole doctorale E2S – UFR Sciences vie



THESE

Pour d'obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Bourgogne

Discipline : Science de l'alimentation

Présentée publiquement le : 09/06/2011

Par

Peio Touyarou

**FORMULATION, CARACTERISATION ET
VALIDATION D'UN PAIN SATIETOGENE**

Jury :

Narce Michel, PU – Université de Bourgogne, Dijon

Giboreau Agnès, DR – Institut Paul Bocuse, Ecully

Lebecque Annick, PU – ENITA, Clermont-Ferrand

Baglieri Agnès, MCU – AgroParisTech, Paris

Sulmont-Rossé Claire, CR – UMR 6265, Dijon

Président du Jury

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Directeur de thèse

REMERCIEMENTS

REMERCIEMENTS

Je voudrais tout d'abord remercier Madame E. Guichard, Messieurs B. Schaal et L. Pénicaud de m'avoir accueilli pendant ces trois années. Une mention particulière pour Madame Guichard qui m'a finalement accueilli pendant plus de quatre ans dans ces locaux et une mention particulière à Monsieur Pénicaud pour son rôle mené de façon irréprochable afin que ce projet soit mené à son terme dans d'excellentes conditions.

Je souhaiterais remercier Messieurs J.P. Girard et P. Guez, co-gérants de l'entreprise CERELAB® Gustalis, partenaire industriel de cette thèse CIFRE.

Je souhaite ensuite remercier, Madame Claire Sulmont-Rossé, directrice de cette thèse pour ses conseils et son aide dans sa rédaction. Ta patience est également sans limite! J'espère que tu auras toujours un carré de chocolat pour moi quand je reviendrai!

Je voudrais remercier le Docteur L. Brondel, coencadrant de thèse pour ses conseils et ses idées. J'ai eu grand plaisir de travailler avec vous.

Je vous souhaite tout mes voeux de réussite pour les différents projets qui sont menés à ce jour et seront menés dans le futur. Je voudrais remercier également Monsieur J.P. Fasquel et Mademoiselle A. Dupont coordinateurs du programme Farine + pour leurs conseils experts pour la formulation de l'espace produit, leur patience, leur motivation ainsi que leur dynamisme. Je souhaite également leur adresser toute ma sympathie pour leur bonne humeur, leur franc parlé et leur humour!

Je voudrais remercier Sylvie Issanchou, qui même si elle m'oublie un peu (lors de présentation de l'AERES par exemple) est une personne d'une humanité extraordinaire. Travailler à tes côtés a été une expérience très enrichissante et un réel plaisir!

Je voudrais remercier Madame V. VanWymelbeke qui a participé à ce projet! Je te souhaite tous mes voeux de succès dans la suite des études que vous mènerez au Gérontopôle!

Je souhaite remercier les membres de l'entreprise CERELAB® Gustalis et particulièrement Valérie et Simon. Sans vous ça ne pourrait pas rouler comme sur des roulettes. J'ajouterai ici un grand merci à Monsieur Mathieu Beaurin qui m'a permis à sa façon de vivre "mai 68" et pour son oeil critique sur la production de mes pains expérimentaux. Je te souhaite tous mes voeux de réussite pour ta nouvelle entreprise.

Je souhaite remercier les différentes personnes avec qui j'ai travaillé au sein du Centre des Sciences du Goût et de l'Alimentation. Merci aux différentes personnes de l'équipe 8 et en particulier à Soso et à Stef. Merci aux autres personnes avec qui je n'ai pas travaillé directement mais avec qui c'est un réel plaisir d'échanger des idées scientifiques. Je ne vous nommerai pas tous, j'en aurais pour un moment....

Je souhaite également remercier la Société Eurogerm qui m'a accueilli dans ses locaux dans le cadre de la formulation des pains expérimentaux, point de départ du projet.

Je souhaite ensuite remercier ma soeur, Maia. Zu gabe ene bizia zeharo hitsa litzateke. Zure hitzak altxorak dira neretzat. Zu bezalako norbait ukaiteakene biziharen urrats bakoitzean poza eta lasaitasuna emaiten du. Zutaz pentsatzen dudana badakizu baina norbait eskertu behar badut bere sustengoarentzat zu zinateke lehena, beti bezala. Je souhaite également remercier aita eta ama qui ont été là pour moi. Petite mention à mon paye pour son oeil critique sur des chansons occitanes chantées à des heures indues. "Si n'ya qui han ço qui han, qu'em ço qui em". Et à ama de croire en moi plus encore que ce que moi je peux croire en moi!

Pour la suite merci de ne pas tenir compte de l'ordre (je sais que certains se vexeraient...). Ne soyez pas jaloux, je n'ai pas changé : je continuerai volontiers à donner du pain à chacun de vous !!!

Merci à "mon petit bout de femme" surtout pour nos conversations intéressantes du matin au réveil. Un an et demi de "coloc de l'amour" haha! T'es vraiment un sacré et franchement si les débuts ont été un peu compliqués, je crois que tu as droit à ta mention spéciale pour ces remerciements (vu que c'est toi qui a du le plus me supporter au quotidien). J'espère que le taff (et le reste) ça ira vieux! J'espère aussi que tu me feras une revanche à notre duel de « chaussures » haha (ou je tiens à préciser que je gagne largement !)

Merci à la clique. Alex je te remercie une deuxième fois mais tu le mérites vraiment. Pour ton soutien, pour tes conseils, pour ta franchise, pour ta gentillesse. S'il fallait énumérer tes qualités je n'aurais pas assez de place dans ces deux pages prévues Merci à mamie nova pour sa cravache et ses déjeuners au RU le vendredi, à Gibus le pimpin de Joseph d'Armatie qui élève des bisons dans des lacs en Croatie, à Nath, mon amour des jmj, à Gégé, à Aurél, à Lolo, à Sansan, à Tuteur et Vaness' de m'avoir accueilli dans ces petites soirées bien sympas. Votre amitié : c'est de l'or les loulous!

Merci aux footeux de l'Adas-dream team. Des titres ne se gagnent pas sans équipe. Grâce à vous j'ai étoffé un palmarès : vice champion de France Adas 2007, champion de France Adas 2008 (Dijon), 2009 (Carmaux) et 2011 (Theix, bon ok je m'avance un peu). Champion Olympique de l'IRNA (Mémézan 2010). Tout d'abord au Docteur Stéphane Cordeau qui fait partie de tout ceux qui auraient voulu changer le monde en domptant une assemblée de 1000 personnes avec une cuillère. Il a gagné la foule, il a gagné sa liberté. Pour la chag's et son horloge biologique proche du métronome (-10!). Pour Fafa, Dado, Abdellus, Papa-baltringue, le chauve, Nico, Nas de guit et Amadou ("Aïe Aïe Aïe"). Je remercie ici Nico Toulousaing à qui j'ai toujours aimé donner du pain!!!!

Merci aux pros du DUC. Qui n'ont pas compris qu'ils jouaient à un niveau pourrave mais qui se battent encore -question d'égo haha- pour jouer dans la prestigieuse équipe A! Particulièrement à Gott (Ah Paul!) pour son soutien dans les moments difficiles et ses disparitions intempestives de soirées. Pour Séb, heureusement que t'es plus un bon ami que tu n'es un bon coach !!!!. Pour Small, Jojo, la ritalaria, Karouf Marim, Matich', Gros, Momo, Chris, Math et Mehd, Papa-débile, la fratrie M'barek, pour Jérem, Juju et Nico qu'ont changé, pour Clem et son bonnet, pour lolo et ses os en sucre, pour Micha qui sera un grand joueur quand il saura faire un contrôle tout en courant, pour Capi qui bien qu'étant un BOLT court moins vite que le TGV! Jouer avec vous (sauf Jaouad en futsal) c'est vraiment génial les mecs!

Je voudrais aussi remercier le bureau du DUC et pour commencer son président Maître Ousman et ses 8 femmes, Alex, Manu, Denis et Thierry pour leur dévouement exemplaire. J'en profite aussi pour remercier Luis Figo, traître à ses couleurs hahaha! Je plaisante Papa Saucisson tu sais que je t'aime! Même si Luis Arconada comme idole c'est vraiment pas terrible.....!!!! Un poutouh à toute la famille!

Un merci à mon ami Francis Bon, mon "alter égo" au niveau du pain est quand même particulièrement fragile. Change de sport, pimpin! Si le prochain truc que tu te casses c'est le col du fémur, je ne me priverai pas à te proposer du pain : je sais déjà lequel : le tien!

Merci au coach, à Ronan et à Patx' qui êtes toujours là malgré la distance! Je ne vous oublie pas et vous serez toujours les bienvenus! Merci à des potos useless. Titi, Jeanmi, Gillou, Memph, Jojo papafrank, Pelonserarien. Vous je vous remercie parce que quand ça ne va pas top, un petit coup de flood et ça repart. Vous servez vraiment à rien ceci dit! Merci à Rachou,

amuse toi bien avec tes yayourts. Merci à Doc' Jourdan-Montana et Futur Doc Roblet! Les gars c'est toujours un plaisir de se réunir autour d'une mousse avec vous! Merci à Frik's, pour sa science de la musique haha! Merci à mon petit oiseau libre préféré aussi pour ses judicieux conseils de native speaker !

SOMMAIRE

SOMMAIRE

| | |
|---|-----------|
| I. PREFACE | 14 |
| 1) Le pain, un "outil" pour lutter contre l'obésité ? | 15 |
| 2) Présentation du manuscrit | 19 |
| II. MANGER OU NE PAS MANGER ? DEFINITIONS DU RASSASIEMENT DE LA SATIETE..... | 22 |
| 1) Rassasiement | 24 |
| a- Origine « sensorielle » du rassasiement..... | 25 |
| b- Origine « gastrique » du rassasiement..... | 27 |
| c- Facteurs modulateurs du rassasiement..... | 28 |
| 2) Satiété..... | 32 |
| a- Satiété et paramètres physiologiques..... | 33 |
| b- Caractéristiques des aliments influençant la satiété | 41 |
| 3) Enrichir le pain en fibres : une perspective intéressante pour augmenter son pouvoir satiétogène ?..... | 43 |
| a- Revue des études a court terme | 46 |
| b- Revue des études a long terme | 48 |
| c- Mode d'action des fibres sur la satiété | 50 |
| d- Conclusion..... | 50 |
| III. OBJECTIFS DE LA THESE | 54 |
| 1) Objectif industriel du projet de thèse | 54 |
| 2) Objectif recherche du projet de thèse | 54 |
| IV. PRODUCTION ET CARACTERISATION DES PAINS EXPERIMENTAUX | 58 |
| 1) Etapes de la panification | 58 |
| a- Pétrissage..... | 58 |
| b- Pointage..... | 59 |
| c- Apprêt et cuisson | 59 |
| 2) Formulation et caractérisation des pains expérimentaux | 60 |
| a- Matériel et Méthode | 62 |
| b- Résultats | 64 |
| V. VALIDATION DE L'EFFET SATIETOGENE D'UN PAIN RICHE EN FIBRES : ETUDES A COURT-TERME..... | 66 |

| | |
|--|------------|
| 1) Etude 1 : Effet de la consommation d'un pain riche en fibres sur les attentes des consommateurs et sur la prise alimentaire de ce pain | 67 |
| a- Matériel et méthode | 69 |
| b- Résultats | 73 |
| c- Discussion | 80 |
| d- Conclusion..... | 81 |
| 2) Etude 2 : Evaluation du caractère satiétogène des pains riches en fibres | 83 |
| a- Matériel et méthodes | 86 |
| b- Résultats | 92 |
| c- Discussion | 100 |
| d- Conclusion..... | 105 |
| VI. VALIDATION DE L'EFFET SATIETOGENE D'UN PAIN RICHE EN FIBRES : | |
| ETUDE A LONG TERME..... | 108 |
| a- Matériel et méthode | 109 |
| b- Résultats pour le pain PF1 | 113 |
| c- Résultats Pour le pain PF2..... | 120 |
| d- Discussion | 130 |
| e- Conclusion..... | 137 |
| VII. DISCUSSION GENERALE | 140 |

PREFACE

I. PREFACE

Cette thèse s'insère dans le cadre du programme Farine+ (2008-2011) financé par le Fond Unique Interministériel (FUI). Ce programme, coordonné par la société CERELAB® Gustalis et soutenu par le pôle de compétitivité Vitagora®, vise à identifier et maîtriser tout au long de la chaîne céréalière (du blé à la farine et de la farine au pain) les facteurs clés permettant de proposer au consommateur final des produits de panification à haute valeur « goût, nutrition, santé ». En plus du coordinateur, les partenaires impliqués dans ce programme sont Dijon Céréales (coopérative agricole), Eurogerm (correcteurs de meunerie et améliorants de panification), l'UMR Centre des Sciences du Goût et de l'Alimentation (CNRS, INRA, Université de Bourgogne), l'UMR Microbiologie du Sol et de l'Environnement (INRA, Université de Bourgogne), l'unité de recherche en Gériatrie en lien avec le Gérontopôle (CHU de Dijon), Welience AgroAlimentaire et Bioindustriel (filiale de la valorisation de la recherche de l'Université de Bourgogne) et l'Université de Bourgogne via la société CREABio® (Centre de Ressource pour Etudes Appliquées BIOMédicales).

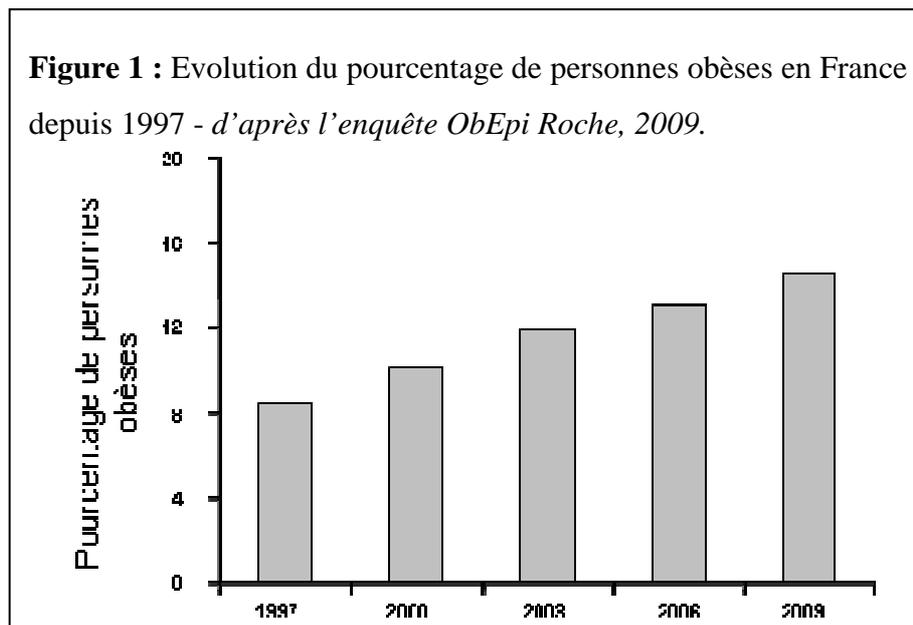
Les trois objectifs du programme de recherche FARINE + correspondent aux trois étapes de la panification, à savoir : le blé, la farine et le pain :

- En ce qui concerne l'étape « blé », un premier objectif est d'améliorer la qualité sanitaire des matières premières dans une perspective de développement durable. Un second objectif est d'enrichir la sélection variétale en associant les critères usuels de sélection (agronomiques, sanitaires, technologiques) à de nouveaux critères (nutritionnels, sensoriels, valeurs d'utilisation). Autrement dit, l'objectif est de caractériser les variétés de blé, non seulement en fonction de leurs caractéristiques agronomiques, mais aussi en fonction des caractéristiques nutritionnelles et sensorielles des produits transformés issus de ces variétés de blé (farine et pain) ;
- En ce qui concerne l'étape « farine », l'objectif est de développer de nouveaux procédés de mouture afin d'améliorer la qualité nutritionnelle des farines (enrichissement en fibres) tout en maintenant des niveaux de rendement et de consommation d'énergie compatibles avec une exploitation industrielle ;
- En ce qui concerne l'étape « pain », l'objectif est de développer d'une part un pain « Senior » susceptible de lutter contre et/ou de prévenir la dénutrition chez les

personnes âgées, et d'autre part un pain « Obésité » susceptible d'aider les personnes en surpoids ou obèses à réduire leur prise alimentaire. Le développement de chacun de ces pains a fait l'objet de deux thèses : celle de Francis BON pour le pain « Senior » (Unité de Recherche du Gérontopôle) et celle présentée dans ce manuscrit pour le pain « Obésité ».

1) Le pain, un "outil" pour lutter contre l'obésité ?

En 2009, la prévalence de l'obésité dans la population française était de 14,5% et celle du surpoids de 31,9% (enquête ObEpi-Roche, 2009). Ces dernières années ont été marquées par une forte augmentation de l'obésité en France : +82% chez les femmes et +58% chez les hommes (Figure 1). En conséquence, l'obésité est devenue l'une des préoccupations de « santé » prioritaire sur le plan politique. A cet effet, l'un des objectifs principaux du Programme National de Nutrition Santé (PNNS) est de réduire de 20% la prévalence du surpoids et de l'obésité chez l'adulte et d'interrompre son augmentation chez l'enfant.

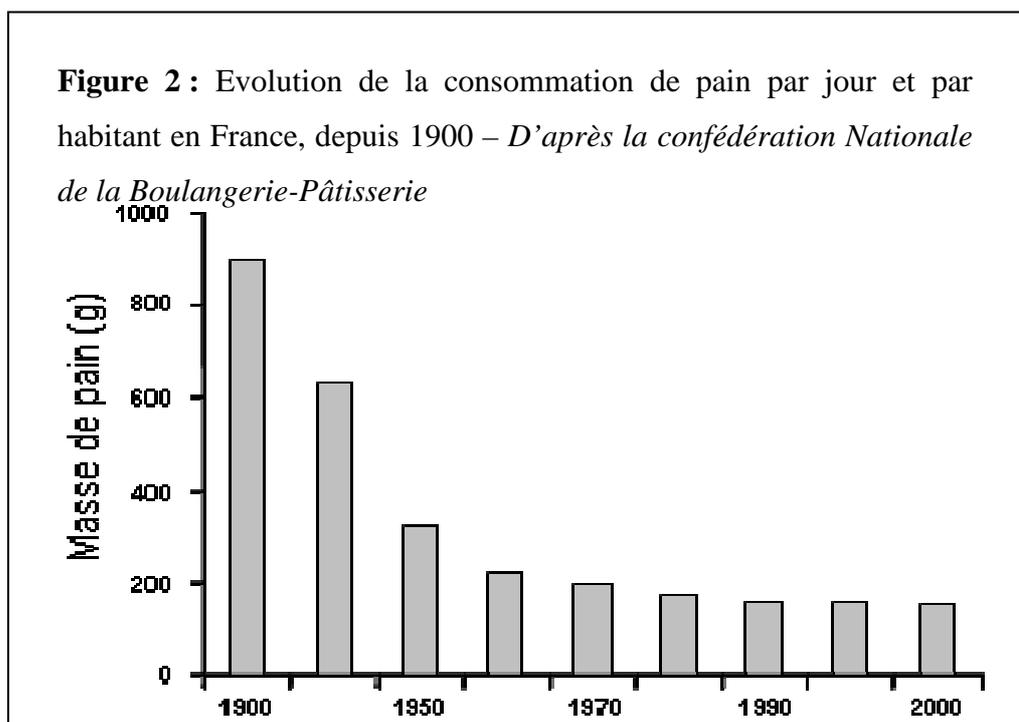


Reconnue comme une maladie chronique depuis 1985, l'obésité est la deuxième cause de mortalité susceptible d'être prévenue, la première étant la consommation de tabac. Plus généralement, l'obésité est considérée comme le 6^e facteur à risque à la santé à travers le monde (Haslam et James, 2005). L'obésité résulte d'une interaction complexe entre des facteurs génétiques, comportementaux et environnementaux induisant un déséquilibre entre la prise énergétique et la dépense énergétique. L'obésité est reconnue comme susceptible

d'aggraver les risques d'hypertension, de maladies cardiovasculaires, de diabète de type II et de certains cancers. Selon l'Institut National de la Santé (1998), un indice de masse corporel (IMC) supérieur à 25 kg/m² est considéré comme anormal. Ainsi, l'obésité augmenterait de 60% le risque d'être frappé d'un infarctus du myocarde et de trois fois le risque de développer un cancer du côlon. Pour la première fois depuis 1980, l'espérance de vie stagne voire diminue dans certains pays (Etats-Unis) du fait d'une forte prévalence du surpoids et de l'obésité (Enquête de l'Harvard School of Public Health, 2008).

Dans ce contexte, l'optimisation de notre alimentation est un enjeu majeur du XXI^e siècle. Or, nous savons qu'il existe une relation inverse entre la consommation de glucides et la fréquence de l'obésité (Rigaud et al., 1997). Cette apparente « protection » par les glucides semble avant tout être liée aux glucides complexes, dont l'absorption intestinale est plus lente et moins complète (glucides dits « lents »). Parmi ces glucides lents, le pain représente une part non négligeable de la consommation en France. D'après une enquête de l'Observatoire du Pain (2011), le pain est consommé quotidiennement par 97,6% des Français. Sa consommation est répartie de façon équitable : un tiers de la ration journalière étant consommée au petit-déjeuner, un tiers au déjeuner et un tiers au dîner. D'après l'étude « Consommation et Comportement Alimentaire en France » (2007), le pain et les biscottes représentent la source la plus importante de glucides totaux (33,2%), de glucides complexes (48,2%) et de fibres (29,1%) au sein de la population française.

Même si à l'heure actuelle, la consommation de pain par personne est inférieure au tiers de ce qu'elle était au début du siècle et représente la moitié de ce



qu'elle était il y'a 50 ans (Figure 2), le pain occupe toujours une place centrale auprès des consommateurs français. Au cours de groupes de discussion réalisés dans notre laboratoire sur les produits traditionnels, les participants ont désigné le pain comme étant le meilleur exemple d'un produit traditionnel en France. En effet, le pain est à la fois ancré dans les habitudes (« ça a toujours fait partie de mon petit-déjeuner »), dans le temps (« petit-déjeuner de mon enfance ») et dans l'espace (« c'est typiquement français ») (Guerrero et al., 2009). Les enquêtes alimentaires réalisées dans le cadre de l'étude SU.VI.MAX (1994-2002) révèlent que la consommation moyenne de pain est de 133 g/j chez les hommes de 45 à 60 ans et de 84 g/j chez les femmes de 35 à 60 ans (Hercberg et al., 1998). Ces dernières années ont été marquées par l'émergence d'une grande variété de pains sur le marché, ces pains différant tant d'un point de vue organoleptique que nutritionnel (Tableau 1). Même si les pains blancs (baguette, pain de tradition française) restent les plus consommés (65% des consommateurs achètent des baguettes tradition en boulangerie), nous pouvons noter l'émergence de la consommation de pains complets (30% des consommateurs achètent du pain complet en boulangerie - Figure 3).

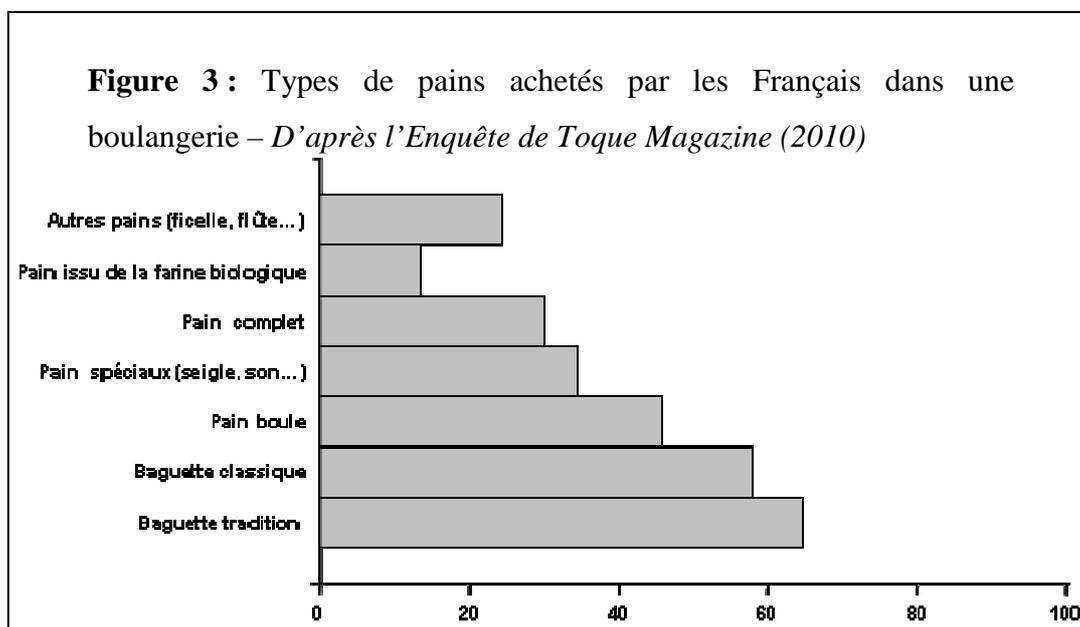


Tableau 1 : Présentation de quelques uns des pains commercialisés en France – *D’après l’Observatoire du pain (2010).*

| Type de pain | Photographie | Composition nutritionnelle (pour 100 g) | Description |
|-----------------------------|---|--|---|
| Baguette |  | Glucides : 57.7 g Lipides : 0.3 g Protides : 9.5 g Fibres : 3.8 g | Composé de farine, de sel, de levain (ou levure) et d’eau et peut contenir un certain nombre d’additif. |
| Pain de tradition française |  | Glucides : 56.8 g Lipides : 0.4 g Protides : 9.2 g Fibres : 3.3 g | Composé de farine, de sel, de levain (ou levure) et d’eau. |
| Le pain complet |  | Glucides : 55.5 g Lipides : 0.8 g Protides : 9.7 g Fibres : 8.8 g | Composé de farine (complète ou intégrale issue de grain de blé entier y compris le germe et l’enveloppe), de sel, de levain (ou levure) et d’eau. |
| Le pain aux céréales |  | Glucides : 52.3 g Lipides : 3.9 g Protides : 9.8 g Fibres : 4.9 g | Ces pains spéciaux qui peuvent contenir différentes céréales (maïs, millet, avoine..) ou des graines (lin, pavot, tournesol...) en plus de la farine, du sel, de levain (ou levure) et d’eau. |
| Pain de mie |  | Glucides : 46.0 g Lipides : 2.6 g Protides : 8.7 g Fibres : 3.3 g | Le pain de mie blanc se compose de farine, de sel, de levure (ou levain) et d’eau ainsi que d’améliorants de panification (des émulsifiants par exemple) de façon à garder le produit moelleux. |

L'intérêt, en terme de santé, du pain dans l'alimentation des personnes en surpoids ou obèses mérite d'être mieux connu. En effet, le pain entraîne une satiété et une réponse glycémique variable selon la composition et le process de fabrication utilisé (Rizkalla et al., 2007). Ainsi, le pain de tradition française entraîne une réponse glycémique plus faible que la baguette classique. Ces deux pains sont fabriqués à partir de la même farine mais selon des pétrissages différents, le mode de pétrissage affectant la déstructuration des molécules d'amidon. Par ailleurs, l'enrichissement en fibres du pain (utilisation de farines complètes, ajout de son, ajout de céréales) augmente son pouvoir satiétogène (Lee et al., 2006) et diminue son index glycémique (Rizkalla et al., 2007). En conséquence, il a été proposé de modifier la composition des pains afin de permettre un meilleur contrôle énergétique chez les participants obèses (Holt et al., 2001 ; Perreira et al., 2002). Augmenter la quantité de fibres présente dans le pain permettrait de répondre, au moins en partie, à l'un des objectifs du PNNS, à savoir augmenter de 50% la portion de fibres dans l'alimentation des Français.

L'objectif de la thèse présentée dans ce manuscrit a fait l'objet d'un partenariat entre le Centre des Sciences du Goût et de l'Alimentation et la société CERELAB® Gustalis. L'objectif était de mettre au point et de caractériser en terme de pouvoir satiétogène et de palatabilité (goût, acceptabilité) des pains formulés de façon à ralentir la vidange gastrique et l'absorption digestive. *In fine*, l'objectif était de proposer ce ou ces types de pains à des patients en surpoids et/ou obèses dans le cadre d'une alimentation optimisée.

2) Présentation du manuscrit

Ce manuscrit se subdivise en cinq chapitres. Tout d'abord, il m'est apparu important de commencer par un état de l'art portant sur les mécanismes responsables du rassasiement et de la satiété. Dans le deuxième chapitre, je vous présenterai les différentes étapes de formulation d'un pain ainsi que la caractérisation sensorielle des pains choisis pour la suite du projet. Un troisième chapitre abordera les deux premières études réalisées dans le cadre de cette thèse. Ces études avaient pour objectif de valider ou non l'effet satiétogène des pains expérimentaux à l'aide de paradigmes à court terme. Enfin, le quatrième chapitre s'intéressera à l'impact de la consommation des pains sélectionnés sur le comportement alimentaire de participants normaux, à long terme. La discussion générale s'ouvrira sur la validation finale des pains

expérimentaux, dans le cadre d'un régime mené par des patients en surpoids, étude qui est à ce jour en cours de déroulement.

Cher lecteur, je vous souhaite un agréable moment dans la lecture de ce manuscrit, j'espère sincèrement que cette lecture vous procurera autant de plaisir qu'a pu me procurer son écriture.

**MANGER OU NE PAS
MANGER : DEFINITIONS DU
RASSASIEMENT ET DE LA
SATIETE**

II. MANGER OU NE PAS MANGER ? DEFINITIONS DU RASSASIEMENT DE LA SATIETE

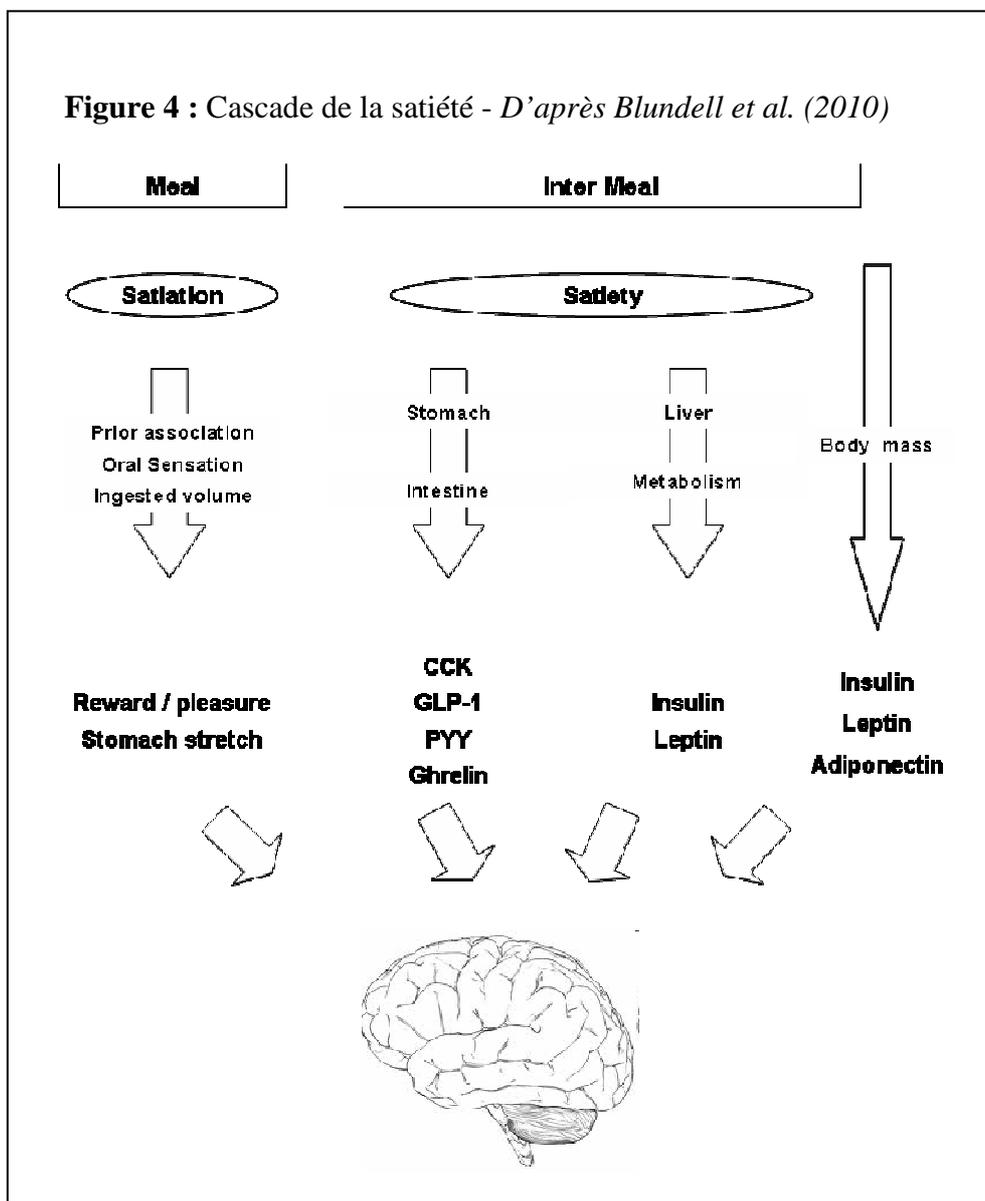
« Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme » (A. Lavoisier, *Traité élémentaire de chimie*, 1789).

Ce principe fondamental édicté par Antoine Lavoisier, dans le domaine du transfert de la matière, s'applique également à l'organisme humain : la vie tend en permanence à un équilibre (homéostasie). Cette recherche d'équilibre est aussi bien observée à l'échelle des planètes qui ont une influence gravitationnelle mutuelle dépendant de leur densité et de leur diamètre, qu'à l'échelle du microorganisme qui transforme le carbone du glucose pour son propre métabolisme.

Pour les êtres vivants, Claude Bernard (*Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*, 1865) définit l'homéostasie comme « la capacité d'un système » à conserver son équilibre de fonctionnement en dépit des contraintes qui lui sont extérieures. Selon Walter Bradford Cannon (*The Wisdom of the Body*, 1932), cet équilibre dynamique qu'est l'homéostasie est essentiel à la vie. A l'échelle de l'organisme, plusieurs « systèmes homéostatiques » vont permettre de maintenir constants les paramètres physico-chimiques de cet organisme. Ainsi, un système d'homéostasie thermique permet de maintenir la température du corps humain à 37°C, cette température permettant le fonctionnement optimal des organes. Ce système fait intervenir des mécanismes qui visent à lutter soit contre, une diminution des températures extérieures (vasoconstriction, frissons), soit contre une augmentation des températures extérieures (vasodilatation, sudation). Le système d'homéostasie énergétique permet de maintenir l'équilibre entre les apports énergétiques d'une part et les dépenses énergétiques d'autre part (maintient de la balance énergétique). Les apports énergétiques proviennent de notre alimentation. Les dépenses énergétiques sont de trois types : le métabolisme basal (c'est-à-dire la dépense minimale d'énergie permettant à l'organisme d'assurer ses fonctions vitales), la thermogénèse post-prandiale (c'est-à-dire la dépense énergétique liée à la digestion) et l'activité physique. Le métabolisme basal et la thermogénèse post-prandiale étant directement dépendants des caractéristiques anthropométriques des individus, le maintien de l'équilibre des dépenses par rapport aux besoins se fait en régulant les apports alimentaires par rapport à l'activité physique (cette dernière représente en général un tiers des dépenses

énergétiques). Même si l'augmentation de la prévalence du surpoids et de l'obésité est influencée par de nombreux paramètres, aussi bien physiologiques, sociologiques, génétiques, culturels et/ou environnementaux, elle résulte avant tout d'un déséquilibre de la balance énergétique, c'est-à-dire d'un excès d'apports comparativement aux dépenses (Wardle, 1995 ; Haslam et James, 2005).

Chez l'Homme, le contrôle de l'homéostasie énergétique fait notamment intervenir les mécanismes responsables de l'initiation et de l'arrêt de l'acte alimentaire. L'un des facteurs clés de ce contrôle est la *sensation de faim*. Cette sensation de faim est définie par Mattes (1993) comme « une sensation subjective ressentie au niveau de l'estomac, quand on ressent le besoin ou l'envie de manger ». Au-delà de cette faim "cognitive", Mattes (1993) définit



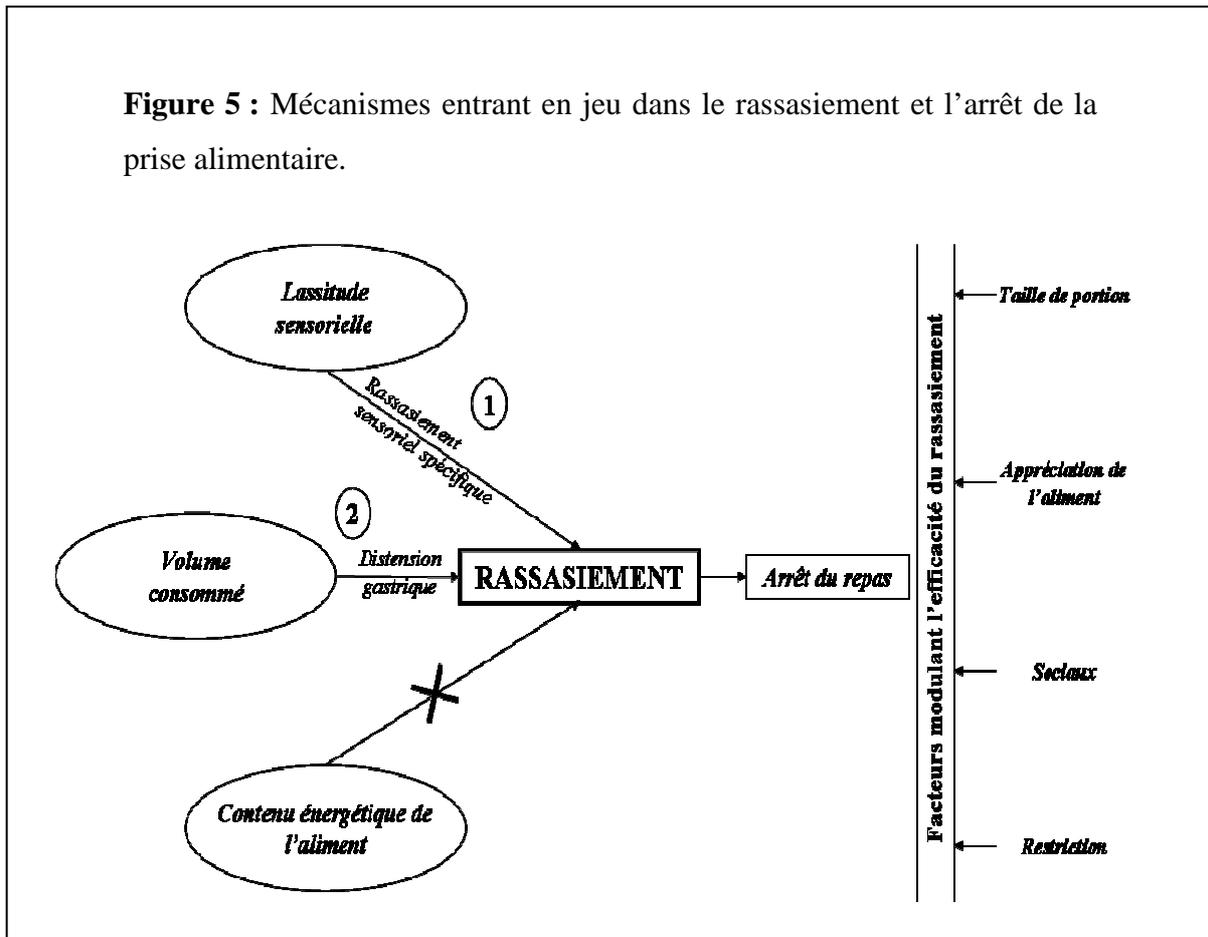
également une faim "physiologique" comme étant une « sensation déclenchant un comportement de prise alimentaire sous le contrôle de nombreux mécanismes neuro-hormonaux mesurables ». A l'évidence, de nombreux facteurs et notamment le contexte spatio-temporel vont influencer cette sensation de faim. En effet, il arrive souvent que l'on mange, non pas parce que l'on a faim, mais parce que c'est l'heure de manger. En ce qui concerne l'arrêt de la prise alimentaire (ou la "non prise alimentaire"), Blundell et al. (1996) ont proposé une « cascade de la satiété » dissociant d'une part le *rassasiement* (satiété intra-repas - satiation) et d'autre part la *satiété* (satiété inter-repas - satiety) (Figure 4). Au cours d'un repas, le rassasiement dépend essentiellement de signaux oraux (perception des caractéristiques sensorielles des aliments) et gastriques (distension gastrique liée au volume ingéré). Ce rassasiement conduit à une diminution de la sensation de faim, de la motivation à manger et donc à l'arrêt du repas. En dehors des repas, le maintien de la satiété dépend de signaux hormonaux issus de la sphère digestive (ghréline, GLP-1, CCK, PYY) et de signaux métaboliques (glucose, leptine). Les premiers résultent de la présence du bol alimentaire dans les organes digestifs. Les seconds renseignent l'organisme sur l'utilisation des nutriments et les besoins éventuels.

1) Rassasiement

Le rassasiement (ou *satiété intra-repas*) correspond au mécanisme qui conduit à l'arrêt du repas. C'est un mécanisme essentiel dans la modulation de l'homéostasie énergétique puisqu'il détermine la taille du repas.

Dans une étude prospective, Hetherington et al. (1996) ont demandé à leurs participants de consommer *ad libitum* des crackers au fromage, puis d'expliquer les raisons pour lesquelles ils s'arrêtaient de manger. Les résultats ont montré que 40% des participants se sont arrêtés de manger parce qu'ils étaient "*lassés de l'aliment*" et 25% parce qu'ils "*se sentaient repus*". En fait, le rassasiement semble résulter de deux mécanismes : un mécanisme "sensoriel" (lassitude pour les caractéristiques sensorielles de l'aliment consommé) et un mécanisme "gastrique" (distension de l'estomac). Il convient néanmoins de souligner que l'efficacité de ces mécanismes (c'est-à-dire la capacité de l'organisme à prendre en compte ces signaux internes pour déclencher l'arrêt de la prise alimentaire) dépend de facteurs externes tels que la taille des portions servies, l'appréciation des aliments consommés, le contexte de la prise alimentaire et les traits de caractère de l'individu (Figure 5).

Figure 5 : Mécanismes entrant en jeu dans le rassasiement et l'arrêt de la prise alimentaire.



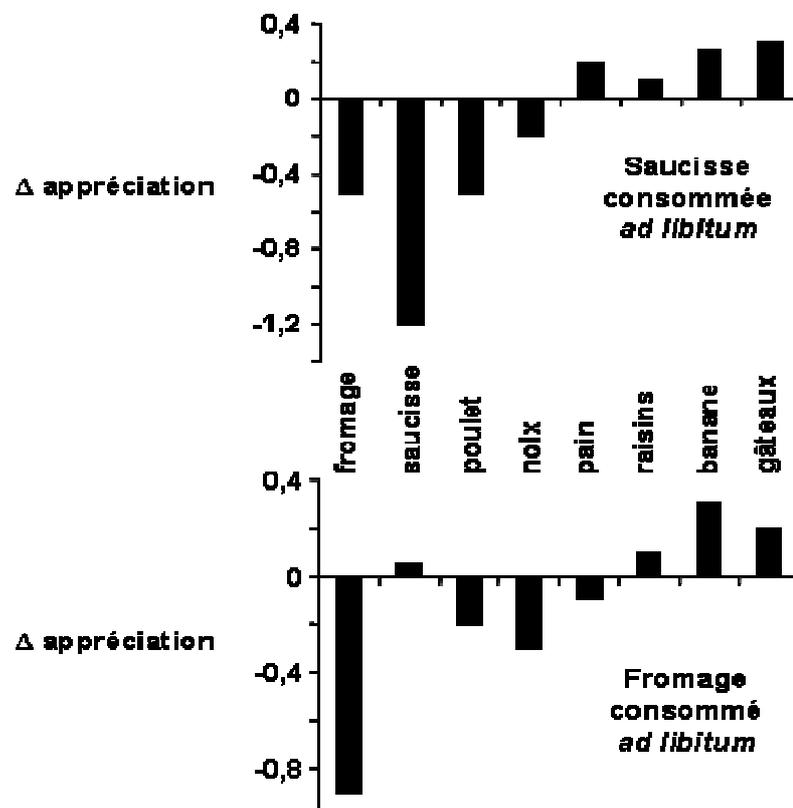
a- Origine « sensorielle » du rassasiement

Mis en évidence par Le Magnen (1956) chez le rat, puis par Rolls (1981) chez l'Homme, le rassasiement sensoriel spécifique correspond à la diminution du plaisir pour l'aliment consommé par rapport à des aliments non consommés. Le paradigme permettant de mettre en évidence ce mécanisme comporte trois phases : une évaluation hédonique de plusieurs aliments, la consommation *ad libitum* de l'un de ces aliments et une nouvelle évaluation hédonique de l'ensemble des aliments. Ainsi, dans l'étude de Rolls et al. (1981) les participants ont donné une note d'appréciation hédonique pour huit aliments (saucisse, fromage, poulet, noix, pain, raisin, bananes, gâteaux). Puis, ils consommaient *ad libitum* la saucisse (12 participants) ou le fromage (12 participants). Les participants ont alors de nouveau noté leur appréciation hédonique pour les huit aliments. Les résultats ont montré une diminution des notes d'appréciation hédonique après le repas, beaucoup plus importante pour les aliments consommés que pour les aliments non consommés (pour certains aliments non consommés, on observe même une augmentation des notes) (Figure 6). Un tel résultat est observé lorsque les évaluations se font en *goûtant* les aliments (Rolls et al., 1981) mais

également lorsque les évaluations se font en sentant les aliments (Rolls et Rolls, 1997). Autrement dit, ce mécanisme dépend bien des propriétés sensorielles de l'aliment consommé.

Il est intéressant de souligner que le rassasiement sensoriel spécifique, largement étudié par Barbara et Edmund Rolls puis par d'autres auteurs (Hetherington et al., 1989, Holt et Petocz, 1995 ; Manthey et Vickers, 1996 ; Guinard et Brun, 1998 ; Maier et al., 2002 ; Pai et al., 2005, Romer et al., 2006 ; Brondel et al., 2007), correspond à un phénomène bien connu en cuisine. En effet, il n'est pas rare qu'un cuisinier qui vient de passer de longues heures au dessus du fourneau tout en baignant dans les odeurs des plats mitonnés n'ait plus faim en passant à table. De façon plus formelle, Ruijschop et al. (2009) ont observé que plus la stimulation rétronasale était longue lors de l'ingestion d'un aliment, plus le rassasiement était important. Cette étude a été réalisée à l'aide d'un olfactomètre permettant de moduler la durée de la stimulation rétronasale lors de la consommation d'un aliment (les participants consommaient un même aliment, soit en présence d'une stimulation courte, soit en présence d'une

Figure 6 : Diminutions relatives des aliments consommés par rapport à des aliments non consommés, lorsque la saucisse est consommée ad libitum (haut) ou que ce sont les crackers tartinés de fromage (bas). – D'après Rolls et al. (1981)



stimulation longue). A l'inverse, la réintroduction de variabilité sensorielle augmente les quantités consommées (Brondel et al, 2009). Ainsi, dans l'étude de Brondel et al. (2009) les participants consommaient une première portion de frites ou de brownie. Puis, ils recevaient une seconde portion du même aliment (condition monotone) ou du même aliment avec une variation sensorielle (frites + mayonnaise ; brownie + crème anglaise). Les résultats ont montré que les quantités consommées *ad libitum* étaient plus importantes dans la condition *variété sensorielle* que dans la condition *monotone*. Dans une seconde étude non publiée, ces chercheurs ont repris ce paradigme pour comparer quatre conditions : 1) deux services de frites ; 2) un service de frites puis un service de frites avec ketchup ; 3) un service de frites, une pause de cinq minutes, un service de frites avec ketchup ; 4) un service de frites, une pause avec jeu et musique, un service de frites avec ketchup. Les résultats ont montré que les quantités consommées étaient plus importantes dans la condition 4 que dans les conditions 2 et 3, elles-mêmes plus importantes que dans la condition 1. Autrement dit, l'introduction de variabilité sensorielle (ketchup) mais également non alimentaire (jeu, musique) freinerait la mise en place du rassasiement.

b- Origine « gastrique » du rassasiement

L'arrivée du bol alimentaire dans l'estomac provoque une distension gastrique et active les mécanorécepteurs situés sur les parois de l'estomac. Ces signaux contribuent à la mise en place du rassasiement et donc à l'arrêt de la prise alimentaire (de Graaf, 2004). Ce mécanisme a été mis en évidence pour la première fois chez l'animal en regardant l'effet d'une injection directement dans l'estomac sur la prise alimentaire subséquente (Powley et Phillips, 2003). Ainsi Powley et Phillips (2003) ont montré que plus le volume injecté était grand et plus la prise alimentaire subséquente était faible. En revanche, ces auteurs ont montré que la variation de la composition de la solution injectée ne modifiait pas la prise alimentaire subséquente (il s'agit donc bien là d'un phénomène mécanique).

Certains auteurs ont proposé d'utiliser ce mécanisme pour lutter contre l'obésité. La méthode proposée consistait à insérer un ballon dans l'estomac des participants puis à gonfler ce ballon de façon à augmenter la distension gastrique et réduire le volume de la prise alimentaire. Ainsi, Doldi et al. (2004) ont associé un régime hypocalorique (1000 kcal/jour) à l'implantation de ballons dans l'estomac chez des patients obèses (IMC > 40 kg/m²). Au bout de quatre mois de traitement ces participants avaient perdu en moyenne 13,9 kg. Il semble

toutefois que cette méthode soit moins efficace chez des personnes en surpoids ou présentant un IMC inférieur à 40.

Il convient de souligner que, dans une situation de consommation normale, il est difficile de distinguer l'effet du volume ingéré sur la distension gastrique de l'effet de ce volume sur la lassitude sensorielle. En effet, plus le volume d'aliment ingéré est grand, plus le temps de séjour de l'aliment en bouche est long, et donc, plus les systèmes sensoriels de l'individu seront stimulés longtemps. Bell et al. (2003) ont étudié le rassasiement sensoriel spécifique après l'ingestion 1) d'un petit volume d'une boisson peu énergétique ; 2) d'un grand volume de cette même boisson peu énergétique ; 3) d'un petit volume de cette même boisson enrichie en énergie. Ces trois versions présentaient les mêmes caractéristiques organoleptiques. Les résultats ont montré que l'ingestion d'un volume plus important engendrait un rassasiement plus important, la teneur en énergie n'ayant pas d'influence. Cependant, dans cette étude, il n'est pas possible de distinguer l'effet du volume sur la distension gastrique de l'effet du volume sur la stimulation bucco-nasale.

c- Facteurs modulateurs du rassasiement

Taille de la portion

Derrière la notion de taille de portion se cache la fameuse expression « finis ton assiette ! » que les parents répètent à leurs enfants. Plus généralement, les règles de politesse et de bienséance de nos cultures occidentales imposent de terminer la portion qui nous est servie, en particulier lorsque l'on est invité. Cette pression socioculturelle conduit de nombreuses personnes à poursuivre et/ou arrêter leurs repas, non pas en fonction de leurs signaux internes mais en fonction des portions servies. Ainsi, Wansink et Park (2001) ont offert à des personnes venant au cinéma soit un pot standard, soit un pot extra large (XXL) de pop-corns avant d'entrer dans la salle de projection. Ces auteurs avaient préparé les pop-corns de façon à ce qu'ils soient peu palatables. A la sortie du film, les auteurs récupéraient les pots et demandaient aux participants d'évaluer leur appréciation pour les pop-corns. Bien que ces derniers n'aient pas apprécié le goût des pop-corns, les résultats ont montré que les participants ayant reçu un pot extra large avaient consommé en moyenne 53% de pop-corns en plus que le groupe ayant reçu des pots standards. Dans une autre étude, Wansink et al. (2005) ont servi à leurs participants un bol de soupe, ces derniers pouvant consommer autant de soupe qu'ils le souhaitent. Si la moitié des participants recevait un bol de soupe

"normal", l'autre moitié recevait un bol de soupe "truqué", c'est-à-dire un bol de soupe se remplissant à nouveau au fur et à mesure de sa consommation. Les résultats ont montré que la consommation de soupe dans la condition "truquée" était supérieure d'environ 70% à la consommation de soupe avec un bol normal. Et pourtant, les participants de la condition "truquée" n'avaient pas l'impression d'avoir consommé plus de soupe et n'avaient pas moins faim que les participants dans la condition "normale".

Appréciation des aliments consommés

A l'évidence, l'arrêt de la consommation d'un aliment ou d'un plat dépend également et très largement de l'appréciation du participant pour cet aliment ou ce plat (« Quand on aime, on ne compte pas !... »). Dans le cadre de l'étude SU.VI.MAX, des consommateurs français ont noté la nature et le poids de tous les aliments et boissons consommés pendant une saison, puis ont donné une note d'appréciation de chacun de ces aliments et boissons (De Castro et al., 2000). Les auteurs ont mis en évidence de fortes corrélations entre la quantité d'aliment consommée et l'appréciation de ce même aliment. Dans un restaurant expérimental, Wansink et al. (2007) ont offert à la moitié de la salle un vin sous le label « Vin de Californie » évoquant un vin de bonne qualité, et à l'autre moitié le même vin sous le label « Vin du Dakota », une région davantage associée aux bisons et à la neige qu'au vin. Tous les participants recevaient ensuite le même repas. Les résultats ont montré que les quantités de

vin consommées étaient les mêmes mais que les buveurs de "vin californien" ont en moyenne mangé 11% de plus et passé 10 minutes de plus à table que les buveurs du "vin du Dakota". En fait, le « vin de Californie » avait induit des attentes positives chez les consommateurs pour le vin mais aussi pour le reste du repas. En revanche le



« Vin du Dakota » avait induit des attentes négatives pour le vin et pour le reste du repas. De façon cohérente, le repas attendu comme plus positif a induit une prise alimentaire plus importante que le repas attendu comme négatif. Dans un cadre plus expérimental, de Graaf et al. (1999) ont observé que les quantités consommées *ad libitum* d'une soupe de tomate additionnée d'acide citrique (jugée peu palatable) étaient moins importantes que les quantités consommées d'une soupe de tomate standard palatable, de même composition nutritionnelle. On pourrait imaginer une situation expérimentale inverse où on demanderait aux participants de consommer une quantité importante et fixe d'un aliment palatable et d'un aliment non palatable. Logiquement, la diminution de l'appréciation hédonique (rassasiement sensoriel spécifique) devrait être plus importante pour l'aliment peu palatable que pour l'aliment palatable. A notre connaissance il n'existe aucune expérience qui porte sur la relation directe entre l'appréciation d'un aliment et son effet sur le rassasiement sensoriel spécifique.

Facteurs socio-temporels

Il est bien connu que dans les repas festifs (repas de famille...), nous mangeons davantage qu'au cours d'un repas normal. Plusieurs études ont montré l'impact de facteurs environnementaux tels que la présence ou non de convives, le lieu, l'heure du repas...et leur influence sur les quantités d'aliments consommés (Meiselman, 1992 ; Stroebele et De Castro, 2004). Nous mangeons plus lorsque nous mangeons en société que lorsque nous mangeons seul. Ainsi, Clendenen et al. (1994) ont montré que la prise alimentaire de participants était une fois et demie plus importante pour un repas pris avec d'autres convives que pour un repas "solitaire". Ces auteurs ont aussi montré que la prise alimentaire était de 30% plus importante pour un repas pris avec des amis que pour un repas pris avec des personnes "étrangères" (non connues des participants avant l'étude). De façon intéressante, la prise alimentaire croît avec le nombre d'amis assis autour de la table mais décroît avec le nombre d'étrangers. En parallèle certains auteurs ont montré que lorsque nous sommes en présence d'autres convives, nous avons tendance à manger autant qu'eux. Dans l'étude d'Herman et al. (2003), une personne cible était invitée à manger des gâteaux en présence d'un inconnu. A l'insu de la personne cible, cet inconnu avait reçu la consigne de manger 1 ou 3 ou 6 gâteaux. Les résultats ont montré un alignement du nombre de gâteaux consommés par la personne cible sur le nombre de gâteaux consommés par l'inconnu. En fait, dans un groupe, la quantité moyenne consommée par les autres convives suggère une norme implicite que chacun va plus ou moins respecter (Wansink et al., 2006). Un autre facteur socio-temporel souvent pointé du doigt pour son influence sur la prise alimentaire est la télévision (Stroebele et De Castro,

2004 ; Wansink, 2004 ; Temple et al., 2007). Une étude menée par Temple et al. (2007) ont observé que des enfants (âgés de 9 à 12 ans) consommaient davantage de leur aliment préféré en regardant la télévision qu'en absence de télévision. Une interprétation proposée est que la télévision apporte une "distraction sensorielle" qui perturberait la mise en place du rassasiement sensoriel spécifique. Ce résultat fait écho aux résultats de Brondel et al. (*non publiés*) mentionnés plus tôt montrant qu'une pause ludique et musicale était suivie d'une consommation plus importante de frites, qu'une pause sans distraction.

Traits de personnalité

Parmi les traits de personnalité susceptibles d'influencer le mécanisme de rassasiement, de nombreux auteurs ont évalué l'influence de la "restriction" sur la prise alimentaire. La restriction se définit comme étant la propension d'un individu à restreindre sa prise alimentaire pour contrôler son poids. Plusieurs questionnaires ont été proposés afin de mesurer ce trait de personnalité. Tous ces questionnaires reposaient sur des questions du type : « Je me sers délibérément des petites portions pour pouvoir contrôler mon poids. Vrai / Faux », « Je m'arrête souvent de manger sans être complètement rassasié(e), pour limiter délibérément la quantité d'aliments que je mange. Vrai / Faux » ou « Quand je me sens inquiet (e), j'ai tendance à manger. Vrai / Faux » (Three Factor Eating Questionnaire : Stunkard et Messick, 1985 ; voir aussi le Restraint Scale : Herman et Polivy, 1980). Plusieurs études ont montré le caractère restreint ou non d'un individu sur son comportement au cours d'un épisode de consommation alimentaire. Ces études ont notamment montré dans une situation de stress ou d'anxiété, que les participants restreints avaient tendance à manger davantage que les participants non restreints (Wardle et al., 2000) alors qu'aucune différence n'est observée entre ces participants en l'absence de stress ou d'anxiété (Ouwens et al., 2003). Par ailleurs, lorsque les participants restreints sont en présence d'un aliment très palatable et/ou sont "distracts" de leur prise alimentaire, ils ont tendance à consommer plus de ces aliments que des participants non-restreints. Ainsi, Coelho et al. (2009) ont proposé à 57 participants restreints et 59 participants non-restreints de consommer *ad libitum* des gâteaux au chocolat, tout en effectuant des exercices de mathématiques et de vocabulaire. Les résultats ont montré que les participants restreints consommaient 50% de gâteaux en plus que les participants non-restreints. Les auteurs interprètent ce résultat par le fait que les tâches distrayantes ont "bloqué" la mise en place des mécanismes de contrôle chez les participants restreints. Ce résultat évoque deux réflexions. D'une part, il est possible que les mécanismes de contrôle de la prise alimentaire (mécanismes essentiellement implicites) soient plus

efficaces chez certains individus que chez d'autres. Il est donc possible que ces derniers aient mis en place des mécanismes de contrôle plus explicites (par exemple, se servir volontairement des portions plus petites) pour compenser le manque d'efficacité des mécanismes "implicites". Ces individus deviendraient alors ce que les chercheurs appellent des « participants restreints » (« restrained eaters »). D'autre part, il est possible que le fait de contrôler en permanence sa prise alimentaire engendre un sentiment de frustration. Lorsque le contrôle cesse pour x ou y raisons (tâches distractives, arrêt d'un régime...), la prise alimentaire serait alors excessive (boulimique) pour compenser cette frustration (Wansink et al., 2006). Plus généralement, la restriction alimentaire joue sans doute davantage sur la dimension *wanting* (correspondant à l'appétence ou l'envie de consommer un aliment) que sur la dimension *liking* (correspondant à l'appréciation d'un aliment) du système de récompense alimentaire (Blundell, 2011). Enfin, il semble que les participants restreints aient une image plus négative d'eux-mêmes que les participants non restreints (Neimeyer et Khouzam, 1985).

2) Satiété

La satiété est définie par Blundell et al. (2010) comme étant le mécanisme qui inhibe la prise alimentaire subséquente, diminue la sensation de faim ou augmente la sensation de réplétion une fois un repas terminé. La satiété correspond à l'intervalle qui sépare deux prises alimentaires successives. Les études sur la satiété menées chez l'homme, reposent sur trois catégories de mesure:

- Mesure de l'intervalle inter-repas : cette mesure consiste à servir au participant une précharge (une certaine quantité d'un aliment d'intérêt), puis à évaluer au bout de combien de temps le participant redemande spontanément de la nourriture (par exemple Himaya et al., 1997). Cette mesure permet de faire donc l'hypothèse que plus le repas cible est satiétogène, plus l'intervalle de temps entre les deux prises alimentaires sera long. Pour éviter de biaiser la mesure, il est nécessaire de priver l'individu de repère temporel (lumière constante, absence d'horloge...).
- Mesure de la quantité consommée au(x) repas subséquent(s) : cette mesure consiste à servir au participant une précharge, puis après un intervalle de temps fixe à lui proposer un second repas que le participant peut consommer *ad libitum*. Cette mesure permet de faire l'hypothèse que plus l'aliment repas cible est satiétogène, et plus les quantités

consommées lors de la seconde prise alimentaire seront faibles. (par exemple : Porrini et al., 1995 ; Holt et al., 1995, 2001 ; Guinard and Brun, 1998 ; Zandstra et al., 1999 ; Flint et al., 2000) ;

- Mesure de la sensation de faim : après avoir consommé une précharge, le participant évalue sa sensation de faim sur des échelles visuelles analogiques (par exemple : Lyly et al., 2009).

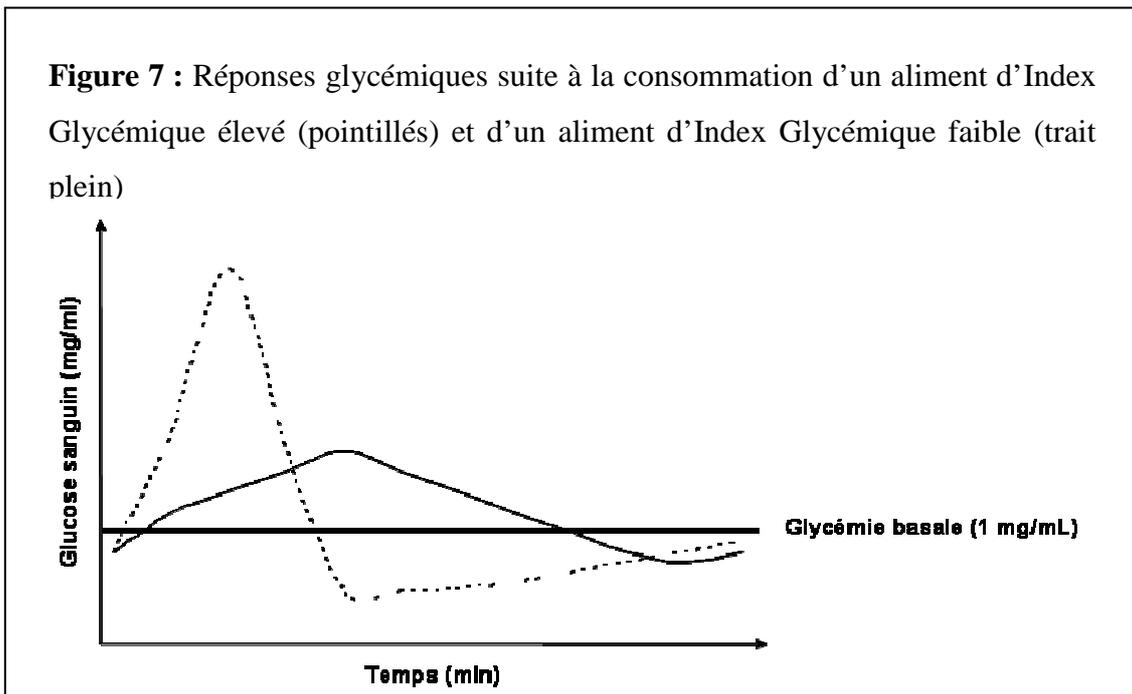
Si ces méthodes permettent de séparer des aliments en fonction de leur pouvoir satiétogène sur le plan comportemental, les mécanismes physiologiques sous-jacents à la mise en place, au maintien et à la levée de la satiété sont complexes et ne sont encore qu'imparfaitement connus (Fantino, 1998). En fait, le maintien de la satiété est un jeu d'équilibre entre des paramètres physiologiques qui inhibent la sensation de faim (leptine, cholécystokinine, glucagon like peptide-1, Peptide YY) et ceux qui stimulent la sensation de faim jusqu'à la "rupture" de la satiété, autrement dit l'initiation d'une nouvelle prise alimentaire (hypoglycémie pré-prandiale, ghréline).

a- Satiété et paramètres physiologiques

Glucose

L'évolution de la glycémie (taux de glucose dans le sang) après la consommation d'un aliment cible est le premier paramètre et probablement le paramètre le plus étudié pour rendre compte du pouvoir satiétogène de cet aliment. Il convient de souligner que le glucose, indispensable au fonctionnement du cerveau dont les possibilités de stockage sont limitées, est un élément central du métabolisme humain (De Graaf, 2004). Dans les années 1950, Mayer a proposé la théorie glucostatique qui place le glucose au coeur de l'homéostasie énergétique (Mayer, 1955). D'après cette théorie, le glucose, ou son métabolisme cellulaire, joue le rôle de signal contrôlant le maintien de la satiété et le déclenchement de la prise alimentaire. Plusieurs études ont effectivement montré que la prise alimentaire spontanée était précédée d'une légère diminution de la glycémie (hypoglycémie pré-prandiale) (Louis-Sylvestre et Le Magnen, 1980). Plusieurs populations neuronales, sensibles au glucose, ont été mises en évidence au niveau du cerveau. Ces neurones constituent des récepteurs nerveux susceptibles d'informer le cerveau sur l'état glycémique de l'organisme afin de moduler la prise alimentaire.

Jenkins et al. (1981) ont défini l'Index Glycémique comme le rapport entre la réponse glycémique suite à la consommation d'un aliment cible et la réponse glycémique suite à la consommation d'un aliment de référence (50 g de sucre). Ainsi les aliments à index glycémique élevé (par exemple, les pommes de terre frites : index glycémique de 95) vont induire une augmentation importante et rapide de la glycémie juste après leur ingestion, tandis que les aliments à Index Glycémique faible (par exemple, les lentilles : index glycémique de 22) induisent une augmentation plus lente et moins importante de la glycémie (e.g. Björck et al., 2000 ; Brand-Miller et al., 2002) (Figure 7).



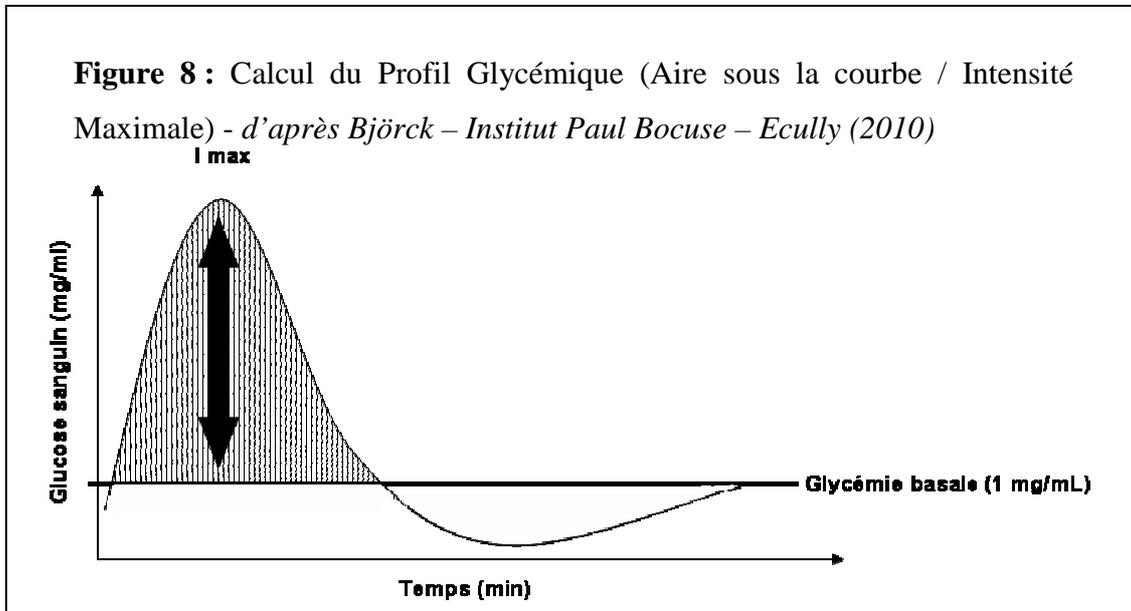
Le pain figure parmi les aliments d'index glycémique élevé, l'index glycémique de la baguette étant compris en moyenne entre 75 et 95 et celui du pain complet étant compris en moyenne entre 40 et 85. Il convient néanmoins de noter que ces valeurs d'Index Glycémique varient d'une source à l'autre comme le montre le Tableau 2.

Tableau 2 : Index Glycémique du pain.

| Source | Baguette | Pain de mie blanc | Pain complet | Pain aux céréales |
|-----------------------------|----------|-------------------|--------------|-------------------|
| Burton-Freeman et al., 2002 | 95 | 76 | - | - |
| Rizkalla et al., 2007 | 78 | - | 85 | - |
| www.physiomax.com | 85 | - | 40 | - |
| www.doctissimo.fr | 95 | - | 77 | - |
| www.coach-gym.com | 85 | - | 40 | - |
| www.montignac.com | 77 | 85 | 65 | - |
| www.santé-ufj.grenoble.fr | 95 | 70 | 77 | 45 |
| www.sanssucre.org | 75 | - | 60 | 40 |
| www.radio-canada.ca | 75 | 85 | 50 | 40 |

Certains auteurs ont émis l'hypothèse que les aliments à Index Glycémique faible seraient des aliments plutôt satiétogènes, susceptibles d'entraîner une diminution des prises alimentaires subséquentes (voir: Warren et al., 2009). Bien que l'utilisation de l'Index Glycémique pour classer les aliments ait recueilli un certain succès, notamment auprès des promoteurs de régimes et de personnes soucieuses de leur poids (la méthode Montignac, ou d'autres régimes "express" qui permettraient de perdre 3 kg en 15 jours, www.aufeminin.com), la corrélation entre l'Index Glycémique d'un aliment et son pouvoir satiétogène reste controversée. Cette controverse est illustrée de façon amusante par le titre de deux articles : celui de Raben (2002) : "Should obese patients be counselled to follow a low-glycaemic index diet ? No" et celui de Pawlak et al. (2002): "Should obese patients be counselled to follow a low-glycaemic index diet? Yes". Dans leur revue de littérature, Raben et al. (2002) ont noté que sur 31 études ayant porté sur la relation entre Index Glycémique et satiété (études à court terme), seules quatorze études ont montré que les aliments d'Index Glycémique faible augmentent la satiété. Par ailleurs, seules quatre études à long terme sur vingt ont montré qu'un régime alimentaire riche en aliments d'Index Glycémique faible favorisait une perte de poids. La même année, Pawlak et al. (2002) ont souligné que certes, le lien entre Index

Glycémique faible et satiété n'était pas systématique, mais qu'il restait néanmoins opportun de conseiller la consommation de ce type d'aliments aux personnes obèses. Par ailleurs, ces auteurs ont noté que la consommation d'aliments à Index Glycémique faible avait tendance à diminuer le risque de développer des maladies cardiovasculaires ou le diabète de type 2.



Récemment, Björck et ses collègues (Institut Paul Bocuse, 2010) ont remis en cause le mode de calcul de l'Index Glycémique. En effet, s'en tenir à la zone sous la courbe ne reflète qu'imparfaitement la réponse glycémique. En particulier, l'Index Glycémique proposé par Jenkins et al. (1981) serait le même pour un aliment induisant une hyperglycémie forte mais courte après ingestion que pour un aliment induisant une hyperglycémie plus faible mais plus longue dans le temps. En conséquence, Björck et al. (2010) proposent de calculer le Profil Glycémique, c'est-à-dire le rapport entre l'aire sous la courbe de la glycémie et l'intensité maximale de cette courbe (Figure 8).

Insuline

L'insuline est une hormone produite par les cellules β des îlots de Langerhans du pancréas. Elle joue un rôle majeur dans la régulation de la glycémie au travers de son effet hypoglycémiant. En effet, l'insuline favorise l'utilisation du glucose dans les cellules, bloque la production de glucose par le foie et favorise la conversion des glucides en acides gras en vue de leur stockage dans les tissus adipeux. Il semble que l'insuline soit également impliquée dans le mécanisme de satiété. En effet, Woods et al. (1979) ont observé que l'injection

régulière d'insuline chez le babouin était responsable d'une diminution de la prise alimentaire sur le long terme. Dans une étude chez l'homme, Holt et al. (1995) ont observé qu'après l'ingestion de divers aliments, plus la sécrétion d'insuline endogène était importante et plus les notes de faim étaient faibles (autrement dit, plus la satiété était importante). Néanmoins, dans ce type d'étude, il est difficile de dissocier l'effet de l'insuline *per se* de l'effet du glucose. En effet, une sécrétion d'insuline plus importante implique également une teneur en glucose plus importante dans l'aliment. Par ailleurs, Gielkens et al. (1998) ont comparé l'effet de trois injections sur la sensation de faim chez l'homme : une injection de solution saline (contrôle), une injection d'insuline en maintenant le glucose constant¹ et une injection de glucose stimulant la production d'insuline endogène. Les résultats ont montré une diminution des notes de faim dans la troisième condition mais pas dans les deux premières. Pour conclure, De Graaf et al. (2004) suggèrent que l'insuline aurait un effet sur la satiété à long terme mais qu'elle ne serait pas impliquée dans les mécanismes de régulation à court terme.

Ghréline

La ghréline est une hormone sécrétée par l'estomac qui stimule l'appétit. Son taux augmente avant les repas puis diminue après ceux-ci (Kojima et al., 1999 ; Inui et al., 2004 ; Asakawa et al., 2005). De fait, l'injection, par voie intraveineuse de ghréline chez l'Homme, entraîne une augmentation de la sensation de faim ainsi qu'une augmentation de la prise calorique d'environ 30% lors du repas suivant (Wren et al. 2001). La prise alimentaire s'accompagne d'une diminution du taux circulant de ghréline, la présence de macronutriments dans l'estomac (lipides et glucides) entraînant une inhibition de sa sécrétion (Weigle et al., 2003).

Cholécystokinine (CCK)

La cholécystokinine (CCK) est une hormone sécrétée par la muqueuse du duodénum en présence de nutriments dans l'intestin grêle et plus particulièrement des acides gras à longue chaîne (Degen et al., 2001). Au-delà de ses fonctions digestives (stimulation de la sécrétion d'enzymes par le pancréas, de la production de bile,...), cette hormone serait également un médiateur de la satiété (Burton-Freeman et al., 2002). Des études chez le rat et chez l'homme ont montré que l'administration de CCK exogène entraîne une diminution de la prise alimentaire (Gibbs et al., 1973 ; Kissilef et al., 1981). En injectant un antagoniste de la CCK

¹ Système de « clamp » : la glycémie est mesurée en continu (par un analyseur) et corrigée par des injections de glucose.

dans la lumière intestinale, Degen et al. (2001) ont observé une augmentation de la prise alimentaire, ce qui confirme le rôle satiétogène de la CCK endogène. Enfin, Kissilef et al. (2003) ont montré que la CCK n'avait un effet qu'en présence d'une distension gastrique. Pour cela, les auteurs ont étudié l'influence d'une injection d'une faible dose de CCK sur la prise alimentaire de participants, en gonflant ou non un ballon placé dans l'estomac de ces derniers. Les résultats ont montré que l'injection de CCK n'entraînait une diminution de la prise alimentaire que lorsque le ballon était gonflé (environ 300 ml).

Glucagon Like Peptide-1 (GLP-1)

Le glucagon like peptide-1 (GLP-1) est une hormone sécrétée par l'iléon lors de l'arrivée de nutriments dans l'intestin (Orskov, 1992) et dont le mode d'action sur la prise alimentaire se rapprocherait de celui de la CCK (De Graaf, 2004). Turton et al. (1996) ont observé que l'injection de GLP-1 entraînait une diminution de la prise alimentaire chez des rats à jeun, tandis qu'un antagoniste du GLP-1 supprimait cet effet anorexigène (augmentation de la prise alimentaire). Chez l'Homme, Flint et al. (1998) ont mis en évidence une réduction de 12% de la prise énergétique consécutive à l'injection de GLP-1 au cours d'un petit-déjeuner chez des participants normopondéraux.

Peptide YY (PYY)

Le peptide YY (PYY) est une hormone produite et sécrétée par les cellules L de l'intestin (Adrian et al., 1985). Après avoir observé l'augmentation du taux circulant de PYY suite à la consommation d'un repas, Adrian et al. (1985) ont suggéré son implication dans la régulation de la prise alimentaire. Une étude très complète de Batterham et al. (2005) a permis d'observer qu'une injection périphérique de PYY exogène chez le rat avait tendance à diminuer la prise alimentaire ainsi qu'à limiter sa prise de poids. De plus, ces auteurs ont également observé que l'augmentation du taux circulant de PYY diminuait l'expression de l'ARNm du NPY qui est un neurotransmetteur orexigène. Enfin, chez l'homme, l'infusion d'une concentration de PYY exogène équivalente à la présence circulante de cette hormone après la consommation d'un repas, diminue la prise alimentaire de 30% pendant 24 heures, par rapport à une solution saline (Batterham et al., 2005). Degen et al. (2005) ont observé que plus l'apport calorique d'un repas était important, plus le taux circulant de PYY augmentait et que plus le taux circulant de PYY était important, plus la prise alimentaire subséquente était faible. Enfin, ces auteurs ont également observé que l'injection de PYY exogène chez

l'homme entraînait les mêmes symptômes de réplétion voire de nausée après la consommation d'un repas trop important.

Leptine

La leptine est une hormone produite et sécrétée par les cellules adipeuses. Son action essentielle est de diminuer la prise alimentaire (Zhang et al., 1994 ; Campfield et al., 1995 ; Halaas et al., 1995). Cependant, il convient de souligner que le taux circulant de leptine varie peu à court terme. Ainsi, Joannic et al. (1998) n'ont pas observé de variation de ce taux avant et après un repas. En revanche, certains auteurs ont mis en évidence une relation entre l'état énergétique de l'organisme et le taux de leptine. En particulier, Chin-Chance et al. (2000) ont montré qu'un déficit énergétique s'accompagnait d'un taux de leptine faible et qu'un surplus énergétique induisait une augmentation du taux de leptine. Autrement dit, la leptine informerait l'organisme quant à la disponibilité et/ou l'utilisation des stocks de matière grasse au sein du tissu adipeux (De Graaf, 2004).

En conclusion, la satiété est un mécanisme complexe (Figure 9), résultant d'un équilibre entre d'une part, des paramètres physiologiques en faveur de la satiété (cholécystokinine, glucagon like peptide-1, leptine, PYY) et d'autre part, des paramètres en faveur de la prise alimentaire (hypoglycémie, ghréline). On peut faire l'hypothèse quand les premiers prédominent sur les seconds, l'individu est en état de satiété (absence de prise alimentaire), tandis que lorsque les seconds prédominent sur les premiers, l'acte alimentaire se déclenche. Il convient néanmoins de souligner que si l'effet de chacun de ces paramètres pris isolément a fait l'objet de nombreuses études, les interactions entre ces paramètres (par exemple, effet d'un paramètre satiétogène sur un autre paramètre satiétogène mais aussi interaction entre les paramètres satiétogènes et les activateurs de la prise alimentaire) restent encore peu étudiés. Or, ces interactions existent très probablement comme le montre par exemple l'étude de Zhao et al. (1998), ces auteurs ayant mis en évidence que la leptine induit une inhibition de la sécrétion d'insuline.

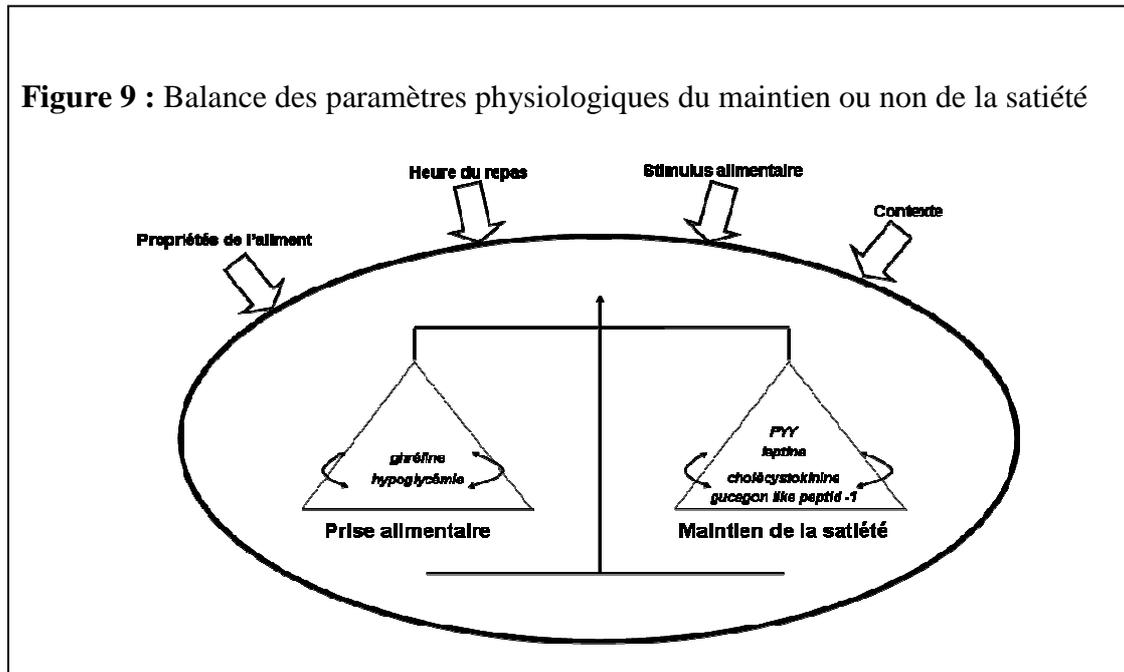
Par ailleurs, comme nous l'avons montré pour le rassasiement, la satiété est aussi influencée par des facteurs environnementaux tels que des facteurs socio temporels ou des traits de personnalité. A l'évidence, une prise alimentaire est souvent conditionnée par nos habitudes horaires et par la proximité de sources d'aliments. Ainsi, nous allons très souvent manger non

pas parce que nous avons « physiologiquement » faim mais parce que « c'est psychologiquement l'heure ! ». Cette tendance à caler les horaires de repas sur une horloge semble être plus forte chez des personnes en surpoids que chez des participants normaux. Schachter et Gross (1968) ont placé des participants obèses et des participants normopondéraux ayant l'habitude de prendre leur dîner à 18h dans une pièce sans fenêtre, de 17h40 à 17h50 et mis des crackers à leur disposition. Cette pièce contenait soit une horloge conçue pour retarder (à 17h50, l'horloge indiquait 17h35), soit une horloge conçue pour avancer (à 17h50, l'horloge indiquait 18h20). Les résultats ont montré que les participants normaux consommaient davantage de crackers lorsque l'horloge retardait que lorsqu'elle avançait, tandis que les participants obèses consommaient davantage de crackers lorsque l'horloge avançait que lorsqu'elle retardait. Autrement dit, les participants obèses se sont davantage fiés à l'horloge affichée qu'à leurs signaux de faim. Le fait que les participants normaux aient consommé davantage de crackers à "17h35" qu'à "18h20" fait dire aux auteurs que les participants normaux n'ont pas voulu « gâcher leur dîner » (« No thanks, I don't want to spoil my dinner. ») en consommant trop de crackers à 18h20.

La présence d'une bonne odeur alimentaire nous met également en appétit et nous incite à initier une prise alimentaire. De même, Wansink et al. (2006) ont montré que les secrétaires consommaient davantage de bonbons lorsque ces derniers se trouvaient dans un récipient transparent que dans un récipient opaque, et lorsque ces derniers se trouvaient sur leur bureau que sur une étagère distante. Dans la lignée de ces résultats, Barnett et ses collègues (2009) ont montré que le fait d'habiter près d'une épicerie de quartier augmentait le risque chez les jeunes de devenir obèses. Comme en ce qui concerne le rassasiement, il semble que le fait d'être restreint ou non influence la satiété. Ainsi, Ogden et Wardle (1990) ont montré que la consommation d'une boisson pauvre en calories en présence ou non d'une étiquette piège "riche en énergie", entraînait une sensation de faim équivalente chez des participants non restreints, tandis que la présence de cette étiquette diminuait la sensation de faim chez des participants restreints. Par ailleurs, Herman et Mack (1975) ont montré qu'après la consommation d'une précharge (milk-shake), les participants restreints mangeaient davantage de glace que des participants non restreints.

En parallèle de ces facteurs environnementaux, les caractéristiques intrinsèques des aliments consommés (densité énergétique, composition en macronutriments, viscosité) vont également influencer la satiété.

Figure 9 : Balance des paramètres physiologiques du maintien ou non de la satiété



b- Caractéristiques des aliments influençant la satiété

Afin de classer les aliments en fonction de leur pouvoir satiétogène, plusieurs indices ont été proposés (Kissilef, 1984, Holt et al., 1995, Green et al., 1997). Par exemple, l'index de satiété proposé par Holt et al. (1995) consiste à demander à un groupe de participants de consommer des précharges équicaloriques de différents aliments (240 kcal) puis de noter leur sensation de faim toutes les 15 minutes pendant 2 heures. Pour chaque aliment, l'aire sous la courbe de faim est ensuite rapportée à l'aire sous la courbe de faim résultant de la consommation d'un aliment de référence (pain blanc). Cette méthode présente néanmoins l'inconvénient de ne pas s'affranchir du volume consommé. En effet, pour une portion équicalorique de 240 kcal, il faut consommer 368 g de pomme de terres vapeur contre 61 g de croissant, par exemple. Or, certains paramètres physiologiques sont modulés par la distension gastrique, tels que la sécrétion de la cholécystokinine ou du glucagon like peptide-1.

Densité énergétique

La densité énergétique² correspond à la quantité d'énergie (kcal ou kJ) contenue pour un poids donné d'aliment (Rolls, 2009). Par exemple, la tomate a une densité énergétique de 0,2

² L'unité internationale est le kJ/g mais l'unité la plus usuelle est le kcal/g

kcal/g tandis que le Nutella® a une densité énergétique de 5,3 kcal/g. Les pains se situent entre les deux (pain blanc : 2,7 kcal/g ; pain complet : 2,3 kcal/g). Comme le rappelle Drewnowski (1998) la densité énergétique joue un rôle clé dans la régulation de la prise alimentaire. En effet, il convient de rappeler que le rassasiement, et donc l'arrêt de la prise alimentaire, est essentiellement lié au rassasiement sensoriel spécifique (autrement dit, à la lassitude générée par l'exposition répétée à un stimulus sensoriel donné) et à la distension gastrique, d'où l'intérêt de consommer des aliments volumineux mais pauvres en calories. En effet, pour une même quantité d'aliments ingérés, l'apport calorique sera plus faible pour les aliments de faible densité énergétique que pour les aliments de forte densité énergétique. Ainsi, Rolls et al. (1998) ont servi à leurs participants trois précharges de boisson lactée isocaloriques (2088 kcal) mais de volumes différents (300, 450 et 600 ml). Les résultats ont montré une diminution de la prise alimentaire lors du repas suivant avec l'augmentation du volume de la précharge. Il convient de rappeler que dans des conditions normales de consommation (consommation *ad libitum*), les participants vont essentiellement réguler leur prise alimentaire en fonction du volume ou de la masse consommée et pas en fonction de la teneur énergétique de l'aliment (Rolls, 1998).

Composition en macronutriments

Un certain nombre de travaux a montré que les protéines avaient un pouvoir satiétogène plus élevé que les lipides et les glucides (Rolls et al., 1988 ; Hill et Blundell, 1989 ; Weigle et al., 2005 ; Paddon-Jones et al., 2008). En effet, les protéines sont des macronutriments de faible rendement énergétique (4 kcal/g) par rapport aux lipides (9 kcal/g) et la fraction de protéines transformée en énergie est faible (seules 10% des protéines contre près de 100% des glucides et des lipides consommés sont transformées en énergie). Par ailleurs, Lyly et al. (2009) ont proposé que les protéines augmentent la viscosité du bol alimentaire et ralentissent ainsi la vidange gastrique. Fort de ces constats, le Dr Dukan a proposé un régime hyperprotéiné actuellement très en vogue. Ce régime consiste à consommer de très fortes proportions d'aliments riches en protéines afin de perdre du poids. De façon moins drastique, Weigle et al. (2005) ont proposé d'augmenter la part protéique contenue dans l'alimentation de patients obèses (15% les 15 premiers jours, 20% les 15 jours suivants et 30% lors des 12 semaines suivantes) tout en maintenant constante la part de glucides (50%). Les résultats de cette étude ont montré une diminution des apports caloriques journaliers, une augmentation de la sensation de réplétion et une diminution de la sensation de faim. A l'inverse, Stubbs (1995) a mis en évidence une augmentation des apports caloriques en augmentant la part des lipides

dans l'alimentation, tout en maintenant la part des protéines constante (étude réalisée chez six participants sains). Enfin, Hill et Blundell (1990) ont observé une réduction de 20% de la prise calorique après un repas riche en protéines (54% de l'énergie apportée par les protéines) par rapport à un repas riche en glucides (63% de l'énergie apportée par les glucides). Certaines études viennent cependant nuancer ces résultats. Ainsi, De Graaf et al. (1992) n'ont pas observé de différence entre les quantités consommées lors d'un repas suivant une précharge contenant soit une majorité de glucides (99%), soit une majorité de protéines (70%), soit une majorité de lipides (92%). Ces auteurs ont émis l'hypothèse que l'intervalle entre la précharge et le repas était trop court pour observer un effet différentiel des macronutriments.

Au sein de chaque classe de macronutriments, il apparaît que le type de glucides, de lipides ou de protéines puisse avoir un effet satiétogène plus ou moins important. Ainsi, pour les lipides, les acides gras insaturés entraînent une diminution de la sensation de faim (Maljaars et al., 2009) et des apports caloriques au repas suivant (French et al., 2000) plus importante que les acides gras saturés. Enfin, comme nous allons le détailler dans la suite de ce manuscrit, les glucides complexes et notamment les fibres ont un pouvoir satiétogène plus élevé que les glucides simples.

3) Enrichir le pain en fibres : une perspective intéressante pour augmenter son pouvoir satiétogène ?

Le but de cette thèse était de formuler un pain "satiétogène" c'est-à-dire susceptible d'induire un rassasiement et/ou une satiété plus élevés après sa consommation qu'un pain contrôle et éventuellement de diminuer les prises alimentaires subséquentes. *In fine*, l'objectif de ce projet était de proposer ce pain à des personnes en surpoids ou obèses dans le cadre d'un rééquilibrage alimentaire voire d'un régime hypocalorique. Toutefois, le but n'était pas de formuler un alicament (pas d'ajout de composé actif) mais de formuler un produit restant dans l'univers pain.

Ces dernières années, de nombreux travaux ont montré que l'enrichissement d'un aliment en fibres augmentait le pouvoir satiétogène de cet aliment. Les fibres sont des polymères glucidiques d'origine végétale peu ou pas métabolisées par le système digestif humain. On distingue les fibres solubles dans l'eau (pectines, mucilages, guar) qui forment des gels

visqueux au contact de l'eau, et les fibres insolubles dans l'eau (cellulose, hémicellulose, lignine).

Le Tableau 3 présente les différentes études ayant porté sur l'effet satiétogène des fibres (ce tableau récapitule toutes les études dont nous avons eu connaissance mais ne prétend pas forcément être exhaustif). Il est intéressant de noter qu'une grande partie des études (11 sur 22 ont porté sur des aliments céréaliers, dont le pain). Ces études reposent sur l'utilisation soit d'un paradigme à court terme, soit d'un paradigme à long terme. Le paradigme à court terme consiste à servir aux participants une certaine quantité d'aliments enrichis en fibres (précharge) puis à observer l'évolution de la sensation de faim et/ou la prise alimentaire au cours d'un repas subséquent, par rapport à une situation contrôle dans laquelle la précharge est constituée d'un aliment pauvre en fibres. Dans ce type de paradigme, l'intervalle de temps entre la précharge et le repas ainsi que la composition des aliments consommés au cours du repas sont contrôlés avec soin de façon à être identique entre les conditions et les participants. Le paradigme à long terme consiste à regarder l'effet de la consommation quotidienne d'un aliment riche en fibres sur la sensation de faim et/ou les prises alimentaires journalières et/ou l'évolution du poids.

Une analyse rapide du Tableau 3 montre que 18 des études citées ont mis en évidence un effet satiétogène des fibres (c'est-à-dire une diminution de la sensation de faim et/ou de la prise alimentaire subséquente) tandis que 9 études n'ont pas montré de différence entre des aliments enrichis en fibres et des aliments contrôle. A ce jour et à notre connaissance, aucune étude n'a montré que l'enrichissement d'un aliment en fibres augmentait la sensation de faim et/ou la prise alimentaire subséquente. Enfin il n'existe à ce jour aucune étude montrant de façon claire que les fibres solubles sont plus satiétogène que les fibres insolubles ou vice versa (Howarth et al., 2001).

Tableau 3 : Récapitulatif des études ayant porté sur l'influence des fibres sur la satiété.

CT = court terme ; LT = long terme / S = solubles / I = insolubles.

| Etude | Aliment | Type de fibres | Quantités consommées (g) | Paramètres mesurés | Effet |
|-------------------------|----------------------|----------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| Haber et al., 1977 | Pommes | S | 2.9- 3.1 | Faim | ↘ |
| Grimes et Gordon, 1978 | Pain | S & I | <i>Ad libitum</i> | Quantité de pain consommée | ↘ |
| Bryson et al., 1979 | Pain | S & I | 3 – 7.5 | Prise calorique | ∅ |
| Porikos & Hagamen, 1986 | Pain | - | 0.2 – 5.2 | Faim | ↘ (normaux) / ∅ (obèses) |
| Levine et al., 1989 | Céréales | S & I | 0 - 22 | Prise calorique | ↘ |
| Vandeven et al., 1994 | Boisson | S & I | 2.5- 7.5 | Prise calorique | ↘ |
| Delargy et al., 1997 | Céréales | S & I | 22 | Faim | ∅ |
| Chow et al., 2006 | Barre nutritionnelle | S & I | 6.4 – 9.1 | Faim | ↘ |
| Lee et al., 2006 | Pain | S & I | 3.4 - 15 | Réplétion Prise calorique | ↘ ↘ |
| Hlebowicz et al., 2007 | Céréales | S & I | 1.5 – 7.5 | Faim | ∅ |
| Lyly et al., 2009 | Jus de fruits | S & I | 0- 10 | Faim | ↘ |
| Mathern et al., 2009 | Boisson | S & I | 0 – 7.2 | Prise calorique | ↘ |
| Peters et al., 2009 | Substitut de repas | S & I | 2.5 - 10 | Faim Prise calorique | ∅ ∅ |
| Schroeder et al., 2009 | Céréales | S & I | 1 - 12 | Faim Prise calorique | ↘ ∅ |
| Willis et al., 2009 | Muffins | S & I | 2 – 9.6 | Faim | ↘ |
| Rigaud et al., 1987 | ? | ? | 7.3 | Faim Prise calorique | ↘ ∅ |
| Stevens et al., 1987 | Crackers | S & I | 23 | Prise calorique | ∅ |
| Effertz et al., 1981 | Crackers | S & I | 0 – 20.3 | Faim | ↘ |
| Pasman et al., 1997 (1) | Jus d'orange | S | 40 | Faim | ↘ |
| Pasman et al., 1997 (2) | Jus d'orange | S | 40 | Prise calorique | ↘ |
| Heini et al., 1998 | Boisson | S | 20 | Faim | ∅ |
| Howarth et al., 2003 | Boisson | S & I | 26.7 – 27.5 | Faim | ↘ |

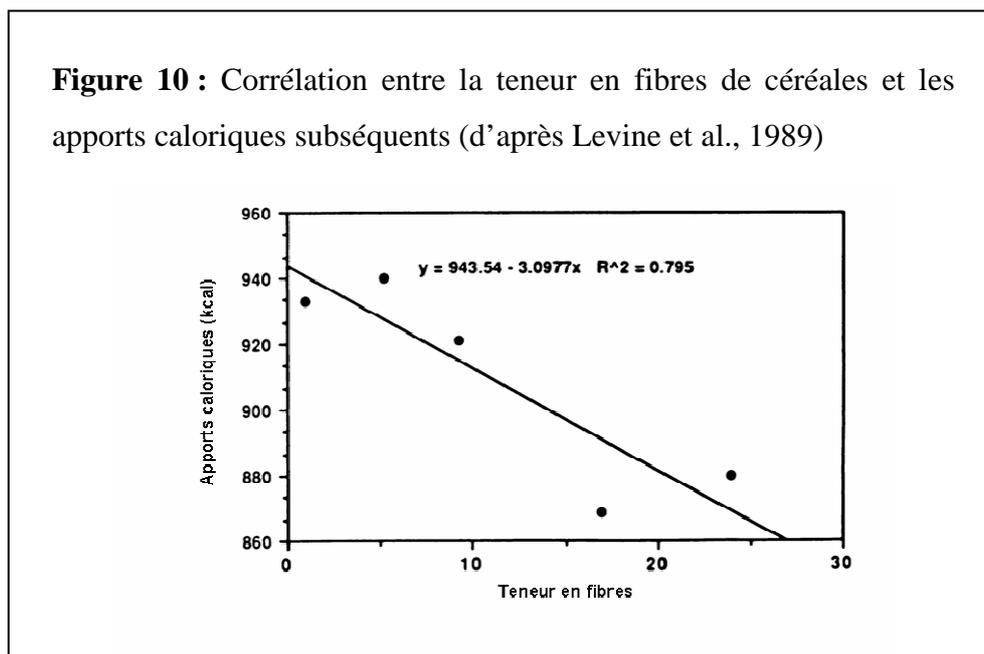
a- Revue des études a court terme

Les premières études qui se sont intéressées à l'influence des fibres sur la satiété datent de la fin des années 70. Il est intéressant de noter que ces études ont utilisé le pain comme support. Ainsi, dans l'étude de Grimes et Gordon (1978) les participants pouvaient consommer *ad libitum* soit du pain de mie blanc pauvre en fibres (*white bread*), soit du pain complet riche en fibres. Les auteurs ont mesuré les quantités consommées par les participants pour chaque type de pain. Les résultats ont montré que les participants consommaient davantage de pain blanc que de pain complet, le premier étant pourtant plus calorique que le second. Autrement dit, ces auteurs ont montré que les fibres accélèrent le processus de rassasiement. Cet effet des fibres sur le rassasiement passe très vraisemblablement par des signaux gastriques. En effet, Manthey et Vickers (1996) n'ont pas observé d'effet des fibres sur le rassasiement sensoriel spécifique.

En ce qui concerne l'influence des fibres sur la satiété post-prandiale, Lyly et al. (2009) ont comparé l'effet de la consommation de cinq aliments enrichis ou non en fibres sur la sensation de réplétion (*satiation*) pendant deux heures après l'ingestion de ces aliments. Les participants de cette étude étaient normopondéraux. Les aliments étaient du pain blanc, un jus de fruit ne contenant pas de fibres, un jus de fruit enrichi en guar, un jus de fruit enrichi en β -glucane et un jus de fruit enrichi en son de blé. Ces aliments étaient consommés à l'heure du petit-déjeuner et les rations étaient isocaloriques. Les résultats ont montré une augmentation de la sensation de réplétion après la consommation de la boisson enrichie en guar par rapport à la boisson contrôle. Aucun effet des fibres de β -glucane ou de son de blé n'a été observé sur la satiété. La viscosité de la boisson enrichie en guar étant plus élevée que la viscosité des autres boissons enrichies en fibres, les auteurs ont émis l'hypothèse que les fibres augmentaient la satiété via l'augmentation de la viscosité du bol alimentaire. De façon surprenante, les résultats de cette étude ont aussi montré que le pain, présentant une teneur en fibres plus faible que celle des boissons enrichies en fibres, engendrait pourtant une sensation de réplétion plus importante que les boissons. Il est possible que les fibres naturellement contenues dans le pain (comme la cellulose) et/ou l'interaction entre les fibres et la matrice du pain (amidon + gluten) potentialisent l'effet de satiétogène du pain, une telle matrice n'étant pas présente dans un modèle alimentaire plus simple qu'est la boisson. En ce sens, le pain serait donc un vecteur très intéressant pour enrichir un régime alimentaire en fibres.

In fine, ce résultat montre que l'effet des fibres sur la satiété peut être plus faible que l'effet d'un aliment par rapport un autre aliment, indépendamment de la teneur en fibres.

Levine *et al.* (1989) se sont intéressés à l'influence de la consommation des fibres sur la prise calorique au cours du repas suivant. Ces auteurs ont demandé à leurs participants de consommer cinq variantes de céréales présentant différentes teneurs en fibres (de 0 à 39%), au cours de différents petits-déjeuners. La masse de céréales consommée était la même pour toutes les variantes. Trois heures après la consommation de cette précharge, les participants se voyaient proposer un buffet composé de carottes, de céleri, de radis, de cornichons, de hamburgers, de chips, de pain, de margarine, de beurre de cacahuète, de fromage, de yaourt, de pêches, de jelly, de lait, de jus d'orange et de café. Les participants pouvaient consommer ce qu'ils voulaient. Les résultats ont montré que la prise calorique était plus faible lorsque les participants avaient consommé des céréales contenant 35 ou 39% de fibres au petit-déjeuner que des céréales contenant 0, 11 ou 18% de fibres (Figure 10).



En parallèle de ces travaux, d'autres études n'ont pas réussi à mettre en évidence un effet des fibres sur la sensation de faim/réplétion ou sur les prises alimentaires subséquentes. Ainsi, Delargy et al. (1997) ont comparé l'effet de la consommation de trois variantes de céréales au petit-déjeuner sur l'évolution de la sensation de faim pendant 24 heures. Ces trois variantes correspondaient à des céréales riches en fibres solubles (ajout de 22 g par petit-déjeuner de

gomme de plantain), à des céréales riches en fibres insolubles (ajout de 22 g par petit-déjeuner de son de blé) et à des céréales pauvres en fibres (ajout de 3 g de gomme de plantain et de 3 g de son de blé par petit-déjeuner). Les résultats n'ont montré aucun effet de la teneur en fibres, ni de la nature des fibres sur l'évolution de la sensation de faim au cours des 24 heures suivant l'ingestion. De même, Peters et al. (2009) n'ont pas montré d'effet de la teneur en fibres de substituts de repas sur la sensation de faim ou la prise alimentaire subséquente (quatre substituts ont été testés, leur teneur en fibres variant de 2,5 à 10 g par portion). Un certain nombre d'hypothèses ont été proposées dans la littérature pour expliquer l'absence d'effet observée dans certaines études. La nature des fibres est régulièrement invoquée : certaines seraient plus satiétogènes (par exemple, les fibres de guar) que d'autres (par exemple, les fibres de son de blé). Il semble aussi que la quantité de fibres ingérée au moment de la précharge doit atteindre un certain seuil pour qu'un effet soit observé. Cette quantité de fibres est déterminée par la teneur en fibres de l'aliment et par la masse de la ration d'aliment donnée aux participants. Ainsi, l'absence d'effet dans l'étude de Peters et al. (2009) pourrait être liée à l'ingestion d'une portion trop faible en fibres : la teneur en fibres de l'aliment le plus riches en fibres était certes de 10 g par portion mais la ration totale ingérée au moment de la précharge n'était que de 60 g.

b- Revue des études a long terme

Il est de plus en plus admis que l'enrichissement d'un régime alimentaire en fibres permet de diminuer à long terme la sensation de faim (Effertz et al., 1981 ; Rigaud et al., 1987 ; Pasman et al., 1997), les apports caloriques (Pasman et al., 1997 ; Howart et al., 2003) ou même faciliter/entraîner une perte de poids dans le cadre d'un régime (Burton-Freeman, 2000 ; Howart et al., 2001).

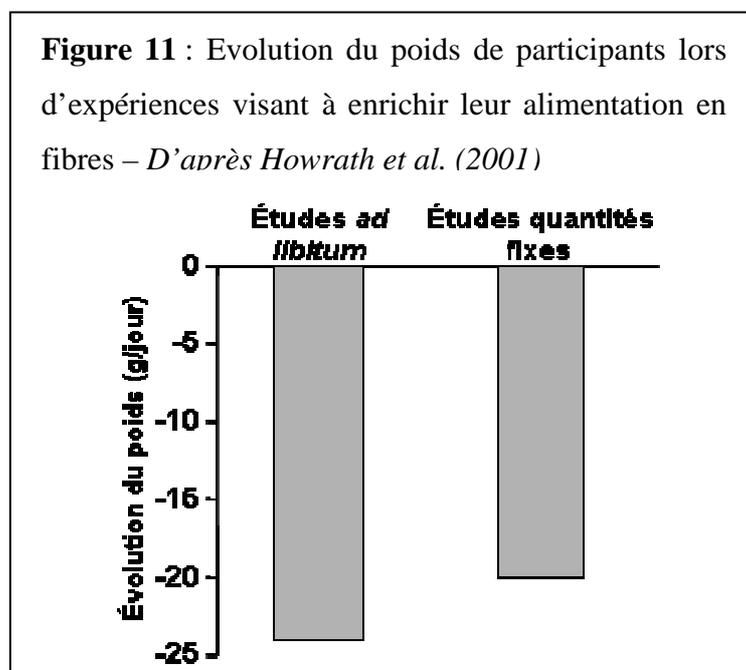
Pasman et al. (1997) ont comparé les prises alimentaires de 17 participants obèses pendant deux semaines, une semaine contrôle (les participants étaient libres de consommer les aliments de leur choix), et une semaine durant laquelle les participants devaient consommer chaque jour un jus d'orange contenant de 40 g de fibres au petit-déjeuner. Les résultats ont montré une diminution de la prise alimentaire dans la situation "fibres" par rapport à la situation contrôle, à partir du troisième jour. Dans une deuxième étude, ces auteurs ont reproduit cette étude (une semaine sans fibre, une semaine avec fibres) mais en demandant aux participants de suivre un régime hypocalorique (les apports caloriques étaient maintenus à environ 950 kcal – 4 MJ). Les résultats ont montré une diminution de la sensation de faim

dans la situation "fibres" par rapport à la situation contrôle, ce qui souligne l'intérêt d'un enrichissement du régime en fibres dans le cas d'un régime hypocalorique.

De même que pour les études à court terme, certaines études à long terme n'ont pas mis en évidence un effet des fibres la sensation de faim ou la prise alimentaire. Ainsi, dans l'étude de Heini et al. (1998) la consommation quotidienne d'une boisson contenant 20 g de fibres au petit-déjeuner n'a pas influencé la sensation de faim (étude menée sur cinq semaines). Cependant, ces auteurs ont noté une augmentation du taux circulant de cholécystokinine (CCK) au fur et à mesure de l'exposition aux fibres.

Dans la lignée des résultats obtenus à court terme par Delargy et al. (1997), Stevens et al. (1987) n'ont pas observé d'effet de la consommation quotidienne de crackers contenant 23 g de fibres de gomme de plantain et de son de blé sur la prise alimentaires de participants. Autrement dit, comme pour les études à court terme, l'effet des fibres sur la satiété à long terme semble dépendre au moins en partie de la nature des fibres.

Enfin en ce qui concerne le poids des participants, la revue proposée par Howarth et al.(2001) s'est intéressée à 12 études menées entre 1959 et 1993 au cours desquelles les participants consommaient les fibres *ad libitum* (Figure 11).



L'enrichissement en fibres dans ces études d'une durée moyenne de 4 mois entraînait une diminution moyenne de poids de 24 g / jour par rapport à une situation contrôle (une

alimentation pauvre en fibres correspondant soit à l'alimentation habituelle du participant, soit à une alimentation indiquée par les auteurs). Lorsque la quantité de fibres était fixe, aucune des 13 études analysées par cette revue n'a observée d'augmentation du poids et au contraire, huit d'entre elles ont mis en évidence une diminution significative du poids (de 20 g / jour). Ce résultat paraît cohérent car la diminution des apports caloriques pendant une durée suffisamment longue conduit à une diminution du poids.

c- Mode d'action des fibres sur la satiété

Plusieurs mécanismes ont été proposés pour expliquer l'effet satiétogène des fibres (Heaton 1973 ; Burton-Freeman, 2000 ; Howart et al., 2001 ; Slavin 2005). D'une part, l'enrichissement d'un aliment en fibres permet de diminuer la densité énergétique de cet aliment, les fibres étant des polymères de glucose peu ou pas digestibles (Rolls et al., 1999 ; Bell et al., 1998). D'autre part, les fibres rendent le bol alimentaire plus compact et augmentent le temps et l'effort nécessaire pour déstructurer un aliment en bouche (Heaton, 1973). Ceci stimule les sécrétions salivaires et gastriques qui contribuent à la distension gastrique (Rolls, 1995). Par ailleurs, en absorbant l'eau, les fibres solubles forment un gel visqueux augmentant la distension gastrique. L'augmentation de la viscosité du chyme (bol alimentaire + sucs gastrique) ralentit la vidange gastrique et prolonge le temps de transit dans l'intestin grêle (Howart et al., 2001). Ceci contribuerait à augmenter la sécrétion des hormones anorexigènes sécrétée par l'intestin (Cholecystokinine et Glucagon Like Peptid-1) (Gutwiller et al., 1999). Enfin, les fibres diminuent l'absorption des lipides et des protéines par la muqueuse intestinale en réduisant la surface de contact entre les nutriments et les sucs digestifs (Baer et al., 1997). En parallèle de ces effets sur le tractus digestif, les fibres retardent la réponse glycémique (Brennan, 2005). En effet, l'absorption des glucides se faisant de façon plus progressive, l'apparition du glucose dans le sang est plus lente ce qui contribue à retarder la réapparition de la faim en période postprandiale et l'initiation d'un nouvel acte alimentaire (Roberts, 2000).

d- Conclusion

En conclusion, la majorité des études ont effectivement montré que l'enrichissement de la ration en fibres augmentait la sensation de réplétion et diminuait les prises alimentaires subséquentes. Toutefois, il convient de souligner qu'il existe de grandes variations entre ces études quant à la quantité et la nature des fibres ingérées (Tableau 1). A ce jour, il existe peu

d'études ayant comparé l'effet satiétogène de différentes fibres à quantités consommées égales (voir par exemple Stevens et al., 1987 ; Delargy et al., 1997). En fait, il pourrait être intéressant de caractériser l'effet satiétogène de chaque type de fibres en développant une méthode standard s'inspirant par exemple de la mesure de l'Index Glycémique. Il serait aussi intéressant de développer des études précisant des interactions entre les fibres et les différentes matrices alimentaires, comme cela est fait par exemple pour le sel (Gobet, 2010).

Pour revenir au pain, Grimes et Gordon (1978) ont montré que le processus de rassasiement se mettait en place plus rapidement lors de la consommation de pain complet que lors de la consommation de pain blanc. Cependant, Byrson et al. (1979) n'ont pas mis en évidence de diminution de la prise calorique au déjeuner suite à la consommation d'un petit-déjeuner composé de pain complet par rapport à un petit-déjeuner composé de pain blanc. Il est possible que cette absence d'effet soit liée à une différence de la teneur en fibres (3% pour le pain blanc et 7,5% pour le pain complet) trop faible entre les pains. A la lumière de ces résultats, nous avons donc choisi de formuler des pains expérimentaux présentant une teneur en fibres supérieure à la teneur en fibres normalement retrouvée dans les pains complets ou les pains aux céréales du marché.

OBJECTIFS DE LA THESE

III. OBJECTIFS DE LA THESE

Cette thèse avait pour but de formuler et caractériser un pain satiétogène c'est-à-dire un pain susceptible de diminuer la sensation de faim et/ou les prises alimentaires subséquentes. Ce travail a comporté deux étapes : une première étape de formulation consistant à déterminer la recette du pain et à caractériser ses propriétés organoleptiques et une étape de caractérisation consistant à valider l'effet satiétogène de ce pain. L'étape de validation consistant à valider l'intérêt d'un pain satiétogène dans le cadre d'un régime chez des personnes en surpoids ou obèses, initialement prévue dans cette thèse, n'a malheureusement pas pu être réalisée dans le temps imparti (le protocole de cette étape est cependant décrit à la fin du document).

1) Objectif industriel du projet de thèse

D'un point de vue industriel, l'objectif de ce projet de thèse était de formuler un pain à la fois riche en fibres et bien accepté des consommateurs. Or, le fait d'enrichir un pain en fibres a pour effet de rendre la mie plus foncée ce qui peut entraîner une diminution de l'appréciation des consommateurs. En effet, les consommateurs français préfèrent les pains présentant une mie blanche aux pains présentant une mie foncée. Ainsi, 75% des français achètent une baguette – à mie blanche – lorsqu'ils entrent dans une boulangerie. Ce projet a donc nécessité de lever un verrou technologique, à savoir obtenir un pain enrichi en fibres présentant une mie claire. L'étape de formulation décrite dans le chapitre suivant a permis d'obtenir deux pains expérimentaux : un pain PF1 enrichi en fibres issues du blé mais présentant une mie de couleur claire proche d'un pain de mie blanc classique et un pain PF2 enrichi en fibres issues d'autres céréales présentant une mie plus sombre que le pain de mie classique mais toutefois plus claire qu'un pain de mie au seigle. A la suite de cette formulation, les caractéristiques organoleptiques de ces deux pains ont été décrites par un jury de consommateurs à l'aide de la technique du Profil Flash®. Par ailleurs, lors des étapes de caractérisation de l'effet satiétogène des pains, la note d'appréciation hédonique a été demandée aux participants au cours de chaque expérience.

2) Objectif recherche du projet de thèse

Afin de caractériser l'effet satiétogène des pains PF1 et PF2 préalablement formulés, ce projet a nécessité de lever un verrou scientifique, à savoir qu'il n'existe pas de protocole standard

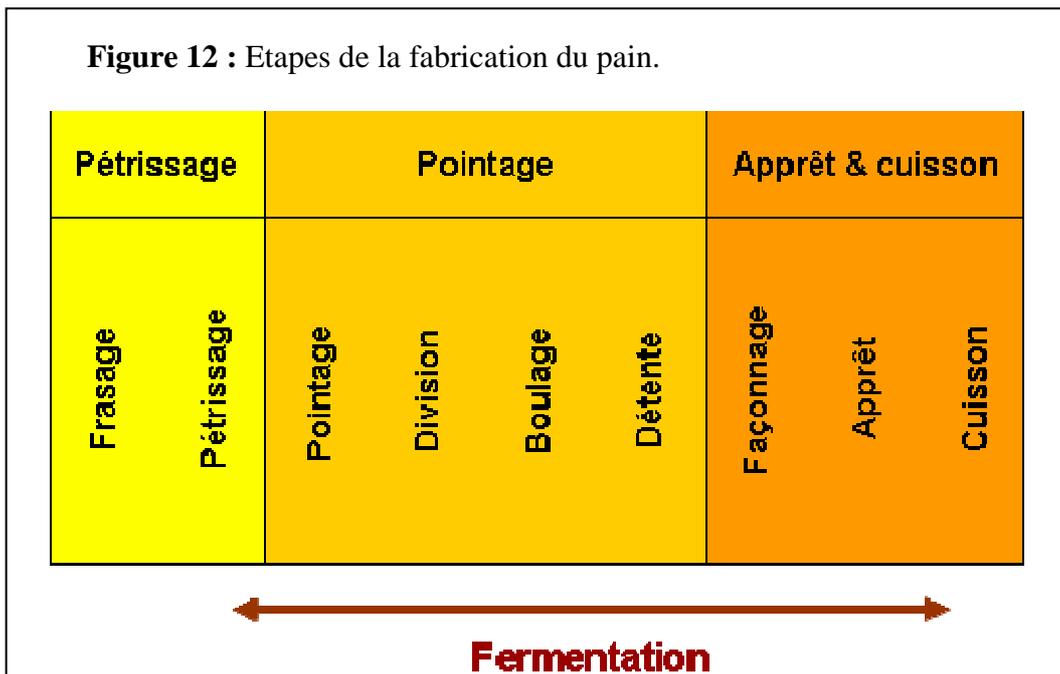
pour caractériser l'effet satiétogène d'un aliment. Plusieurs méthodes ont été proposées pour comparer les effets satiétogènes de différents aliments, certaines se basant sur des mesures déclaratives de faim, d'autres sur des mesures de prises alimentaires. Quelques unes ont utilisé ces deux méthodes. Cependant, aucune règle n'établit clairement à quel moment la mesure doit avoir lieu, quelle quantité doit être proposée et pendant combien de temps doit-on effectuer les mesures de faim et/ou de prise alimentaire. De plus, comme mentionné au préalable, certaines études s'intéressent à l'effet satiétogène d'un aliment au cours d'une seule exposition (études à court terme) tandis que d'autres regardent les effets de l'ingestion répétée d'un aliment (études à long terme). Dans ce travail de thèse, nous avons choisi d'associer systématiquement les mesures déclaratives de faim aux mesures comportementales de prise alimentaire après l'ingestion de pain au petit-déjeuner. Une première série d'expérience a porté sur l'effet satiétogène des pains PF1 et PF2 après une exposition (étude à court terme). Une deuxième série d'expérience a porté sur l'effet satiétogène des pains PF1 et PF2 après une exposition répétée (étude à long terme).

**PRODUCTION ET
CARACTERISATION DES PAIN
EXPERIMENTAUX**

IV. PRODUCTION ET CARACTERISATION DES PAINS EXPERIMENTAUX

1) Etapes de la panification

Le process de fabrication du pain comprend trois étapes : une première étape de pétrissage, une deuxième étape de pointage, et une troisième étape d'apprêt et de cuisson (Figure 12).



a- Pétrissage

Le pétrissage est la première étape du process. Une fois la farine (ou le mixe de farines) dans le pétrin, deux phases se succèdent. Tout d'abord une première phase de pétrissage appelée le frasage qui consiste à pétrir lentement afin de mélanger les ingrédients et d'hydrater la farine. L'eau s'incorpore au gluten et à l'amidon : la pâte se forme de manière grossière. La deuxième phase du pétrissage s'exécute à une vitesse plus rapide. Elle consiste à créer le réseau de gluten et à développer les qualités de la pâte (notamment l'élasticité et l'extensibilité). Les



vitesses du frasage et du pétrissage ont un rôle déterminant dans la texturation et la création du réseau de gluten.

b- Pointage

Il s'agit de la première étape de fermentation. La pâte est retirée du pétrin et est placée dans



une « chambre » à température et humidité contrôlée. Une température supérieure à 28°C favorise l'activité enzymatique de la levure tandis qu'une humidité importante permet d'éviter le dessèchement de la pâte. Cette phase dure environ une heure et demie. Une fois la phase de pointage terminée, le pain est divisé en pâtons correspondant

au poids désiré (400 grammes pour la baguette courante par exemple). Ces pâtons sont boulés de façon à ce qu'ils présentent un aspect régulier. Une période de détente d'environ 30 minutes permet la reconstitution des réseaux de gluten de chaque pâton.

c- Apprêt et cuisson

Les pâtons boulés sont ensuite façonnés afin de donner la forme finale au pain. La phase d'apprêt consiste à laisser reposer les pâtons façonnés de façon à ce que le pain gonfle. Le pain est ensuite enfourné pendant 20 à 30 minutes à 245°C environ.

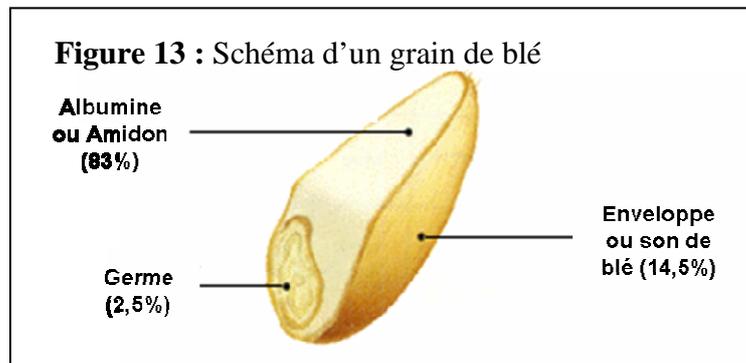


Les différentes étapes de la panification influencent les caractéristiques organoleptiques et nutritionnelles du produit fini, et cela même indépendamment des ingrédients utilisés. Ainsi, la baguette de consommation courante et la baguette de tradition française sont produites à partir des mêmes ingrédients mais l'étape de pétrissage comprend quatre minutes de frasage et dix minutes de pétrissage pour la baguette classique contre dix minutes de frasage et quatre minutes de pétrissage pour la baguette de tradition française. En conséquence, l'amidon contenu dans la baguette de tradition française est moins déstructuré que l'amidon contenu

dans la baguette de consommation courante. Pour preuve, l'Index Glycémique de la baguette de tradition française, traduisant la nature des sucres contenus dans le pain, est plus faible que la baguette de consommation courante (Rizkalla et al., 2007). En complément, ces deux pains présentent un goût et une texture différents.

2) Formulation et caractérisation des pains expérimentaux

Les travaux menés dans le cadre de cette thèse ont été réalisés avec deux pains expérimentaux et un pain contrôle (correspondant à un pain de mie blanc). Un premier pain (PF1) a été formulé en remplaçant une partie de la farine 65 par de la farine complète, c'est-à-dire de la farine résultant d'un broyage incomplet du grain de blé et donc contenant une fraction des fibres de l'enveloppe du grain de blé (le son – Figure 13).



Un second pain (PF2) a été formulé en ajoutant des graines de céréales susceptibles d'apporter des fibres (avoine, seigle...). Ces formulations ont conduit à la fabrication de deux pains de mie présentant approximativement la même teneur en fibres et le même rapport fibres solubles/insolubles. En revanche, l'utilisation de deux sources de fibres différentes (blé pour PF1, autres céréales (dont du blé) pour PF2) s'accompagne d'une modification des caractéristiques sensorielles des pains. En parallèle de ces deux pains, un pain de mie blanc contrôle (PM) a été produit en suivant le même process et la même recette à l'exception de l'inclusion de fibres. La composition nutritionnelle de ces trois pains est présentée dans le Tableau 4 (à titre de comparaison, ce tableau précise également la composition nutritionnelle de la baguette courante).

Tableau 4 : Composition nutritionnelle des trois pains expérimentaux en comparaison avec la baguette de consommation courante (pour 100 g).

| | Pain PM | Pain PF1 | Pain PF2 | Baguette |
|-------------------------|---------|----------|----------|----------|
| Glucides (g) | 51.2 | 37.7 | 36.8 | 51.2 |
| Lipides (g) | 3.4 | 3.2 | 3.8 | 5.8 |
| Protides (g) | 7.6 | 8.0 | 11.8 | 7.6 |
| Energie (kcal) | 265.8 | 211.6 | 228.6 | 287.4 |
| Fibres (g) | 2.4 | 10.4 | 12.8 | 3.8 |
| Solubles/insolubles (%) | 43/57 | 33/67 | 30/70 | 43/57 |

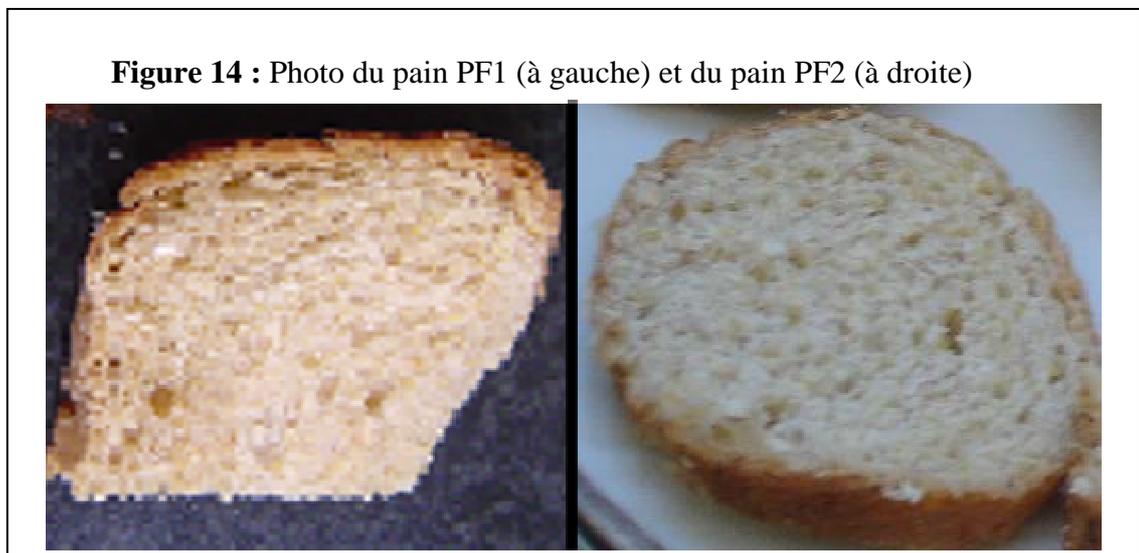
La caractérisation des propriétés sensorielles de ces pains a été réalisée par la technique du Profil Flash® (Dairou et Sifferman, 2002). Le profil sensoriel classique (QDA® Stone, 1992 ; Norme ISO 13299 :2005) résout le manque de consensus entre les dégustateurs quant à la verbalisation des sensations induites par un produit à l'aide d'un entraînement intensif de ces dégustateurs³. La technique du Profil Flash® résout ce manque de consensus par analyses statistiques sophistiquées (analyse Procrustéenne). En conséquence, la méthode du Profil Flash® est une méthode plus rapide puisqu'elle ne nécessite pas d'entraîner les dégustateurs pendant plusieurs séances. Cependant, si le Profil Flash® conduit à une représentation de l'espace produit relativement similaire à celle obtenue avec un profil conventionnel, la description verbale des produits reste moins précise qu'avec un profil conventionnel. La technique du Profil Flash® est directement inspirée du Profil Libre (Williams et Langron, 1983) à la différence que, le Profil Flash® repose sur une notation en comparatif (pour chaque descripteur, les dégustateurs classent les produits sur une échelle d'intensité) tandis que le Profil Libre repose sur une notation en monadique (pour chaque produit, les dégustateurs notent chaque descripteur sur une échelle d'intensité).

³ Cet entraînement a pour objectif d'aligner le vocabulaire entre les dégustateurs, c'est-à-dire de s'assurer que chaque descripteur renvoie à la même sensation.

a- Matériel et Méthode

Pains

Le Profil Flash® a été réalisé sur le pain de mie blanc (PM) et les deux pains enrichis en fibres (PF1 et PF2). Etant donné qu'il n'est pas recommandé de réaliser un Profil Flash® avec seulement trois produits, nous avons ajouté trois autres pains appartenant au même espace produit, à savoir le pain de mie blanc Jacquet (PM'), le pain de mie Tartine Maline® Jacquet (PF1') et le pain de mie aux fibres Valpiform (PF2'). Le pain PF1' a été répété deux fois afin de pouvoir évaluer la répétabilité intra-séance. La Figure 14 présente une photo de chacun de ces pains.



Sujets

Les trente deux dégustateurs normopondéraux et non restreints de l'étude « Evaluation du caractère satiétogène des pains riches en fibres » présentée ultérieurement dans le manuscrit ont été invités à revenir dans notre laboratoire deux ou quatre mois après cette étude pour réaliser le Profil Flash® des pains. En effet, les auteurs de cette méthode recommandent, dans la mesure du possible, de recruter des dégustateurs experts (c'est-à-dire des dégustateurs ayant déjà fait parti d'un jury de profil sensoriel). Ne disposant pas d'un tel jury sur Dijon, nous avons choisi de faire le Profil Flash® des produits avec des dégustateurs ayant été *a minima* familiarisés avec les produits à évaluer. Ces dégustateurs comprenaient 16 hommes et 16

femmes âgés entre 20 et 45 ans ($30,6 \pm 1,3$ ans). Ils ne présentaient aucune allergie alimentaire et n'avaient pas d'expérience préalable en profil sensoriel.

Déroulement

Les dégustateurs ont participé à deux séances, une séance d'entraînement et une séance de test. Ces deux séances se sont déroulées de la même façon mais seuls les résultats de la deuxième séance ont été pris en compte pour l'analyse statistique. A chaque séance, les dégustateurs recevaient sept échantillons de pain (le pain PF1' était répété deux fois) dans un ordre aléatoire. Lors de la première séance, les participants devaient goûter les échantillons et décrire les caractéristiques sensorielles permettant de faire des différences entre ces échantillons. Les participants étaient invités à éviter les termes hédoniques et à ne pas générer plusieurs termes pour décrire la même caractéristique sensorielle. Enfin, ils étaient invités à définir chaque terme, et en particulier les termes de texture (par exemple, « fondant : j'ai laissé fondre le produit sur ma langue »). Pour chaque terme (descripteur) généré, les participants devaient ensuite classer les échantillons du plus intense au moins intense sur une échelle pour la caractéristique considérée (si nécessaire, les bornes de l'échelle étaient définies par les dégustateurs eux-mêmes, par exemple « couleur : clair / foncé »). Les *ex aequo* étaient autorisés.

Ces séances ont eu lieu sous lumière blanche dans la salle de dégustation de l'UMR CSGA, c'est-à-dire dans une salle équipée de cabines individuelles, ventilée et climatisée (ISO 13299). Pour un participant donné, les séances avaient lieu à la même heure. Les participants avaient pour instruction de ne consommer aucun aliment ou aucune boisson durant l'heure précédant chaque séance. Les participants pouvaient se rincer la bouche après chaque échantillon avec de l'eau.

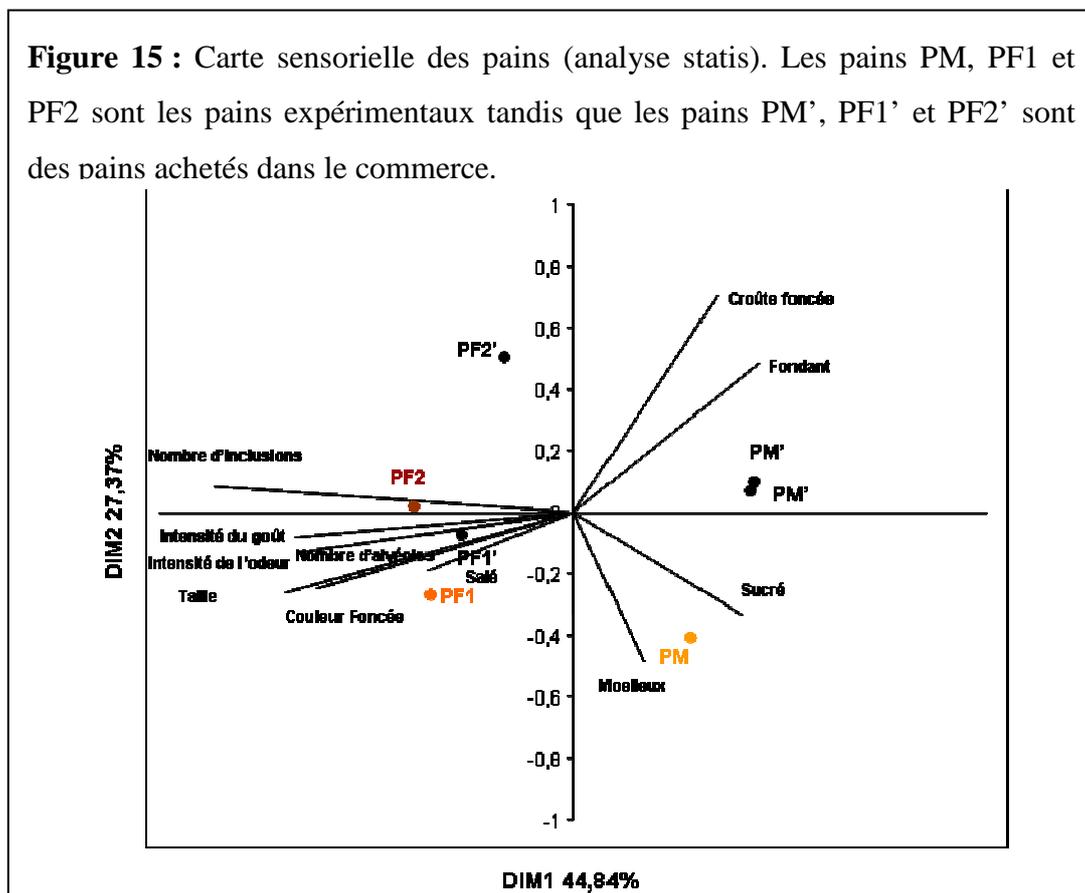
Analyse des données

Pour chaque participant et pour chaque descripteur, les résultats du classement ont été convertis en scores de 1 à 7 (1 pour le produit le plus proche de la borne inférieure et 7 pour le produit le plus proche de la borne supérieure). En cas d'*ex aequo*, le score correspondait à la moyenne des rangs supérieurs et inférieurs (par exemple, le score de 2,5 a été attribué pour un *ex aequo* entre les produits de rang 2 et 3). Les scores ont été ensuite analysés à l'aide de la méthode Statis (Schlich, 1992). Cette méthode recherche à pondérer les espaces produits

individuels de chaque participant de façon proportionnelle à leur accord avec le groupe (compromis).

b- Résultats

La Figure 4 présente la carte sensorielle résultant de l'analyse Statist. Le premier axe sépare clairement les pains de mie pauvres en fibres (PM et PM') des pains de mie enrichis en fibres (PF1, PF1', PF2, PF2'). Les pains de mie pauvres en fibres se caractérisent par un goût sucré, une texture fondante moelleuse. Les pains de mie riches en fibres se caractérisent quant à eux par une flaveur plus intense, une couleur de la mie plus foncée, une mie moins homogène (présence d'alvéoles, d'inclusions). Il est intéressant de noter que les résultats observés pour nos pains expérimentaux sont tout à fait cohérents avec ceux observés pour les pains de mie du commerce. Autrement dit, les profils sensoriels de nos pains de mie pauvres en fibres et riches en fibres sont cohérents avec les profils sensoriels de pains de mie équivalents achetés dans le commerce. Enfin, même si PF1 et PF2 apparaissent relativement proches sur cette carte sensorielle, le pain PF1 se caractérise par une texture un peu plus moelleuse, tandis que le pain PF2 se caractérise par un plus grand nombre d'inclusions et une couleur de mie un peu plus foncée (Figure 15). Autrement dit, le pain PF1 serait plutôt typé « pain complet » tandis que le pain PF2 serait plutôt typé « pain aux céréales ».



**VALIDATION DE L'EFFET
SATIETOGENE D'UN PAIN RICHE
EN FIBRES : ETUDES A COURT-
TERME.**

V. VALIDATION DE L'EFFET SATIETOGENE D'UN PAIN RICHE EN FIBRES : ETUDES A COURT-TERME

Cette première étape du travail de thèse avait pour objectif de valider ou non l'effet satiétogène d'un pain riche en fibres. En effet, au vu de la littérature, nous avons fait l'hypothèse qu'un pain riche en fibres entraînerait une diminution de la sensation de faim subséquente et des apports caloriques lors du repas suivant. Deux études ont été menées :

- une première étude avait pour objectif d'évaluer dans quelle mesure l'ingestion d'un pain riche en fibres consommé au petit-déjeuner s'accompagne d'une modification des attentes des consommateurs pour ce pain et/ou d'une modification de la prise alimentaire du pain *per se*.
- La deuxième étude avait pour objectif d'évaluer dans quelle mesure l'ingestion d'un pain riche en fibres s'accompagne d'une modification de l'appréciation et de l'appétence de produits alimentaires (autres que le pain) et/ou une modification des prises alimentaires au cours du repas suivant.

Ces deux études ont également permis de suivre l'évolution de la sensation de faim au cours de la matinée, après l'ingestion d'un pain riche en fibres consommé au petit-déjeuner. En particulier, nous avons distingué l'effet de la consommation d'un pain riche en fibres sur le rassasiement, c'est-à-dire la sensation ressentie après un repas consommé pour être convenablement repu, et sur la satiété, c'est-à-dire la période consécutive à ce repas et qui dure jusqu'à la prise alimentaire suivante.

Dans ces deux études, la condition « ingestion d'un pain riche en fibres » a été comparée à une condition contrôle, « ingestion d'un pain pauvre en fibres », condition durant laquelle les participants consommaient un pain pauvre en fibres.

1) Etude 1 : Effet de la consommation d'un pain riche en fibres sur les attentes des consommateurs et sur la prise alimentaire de ce pain

Pour cette première étude, le Profil Flash décrit précédemment nous a permis de sélectionner deux pains, un pain de mie pauvre en fibres (PM) et un pain de mie riche en fibres (PF2). Ce dernier présentait des caractéristiques susceptibles d'être associées à un pain complet par les consommateurs. Un premier objectif de cette étude était d'évaluer les attentes spontanées des consommateurs en ce qui concerne le caractère rassasiant de chacun de ces pains ainsi que leurs attentes hédoniques (groupe « non-exposé »). Un deuxième objectif était d'évaluer dans quelle mesure ces attentes étaient modifiées par une pré-exposition à chacun de ces pains (groupe « exposé »).

En effet, un certain nombre de travaux se sont intéressés à l'apprentissage d'une association entre un aliment et un effet physiologique associé, chez l'animal comme chez l'homme. Ce type d'apprentissage correspond à un apprentissage par conditionnement, au cours duquel un individu apprend à associer un stimulus aux conséquences liées à l'ingestion de ce stimulus. L'un des conditionnements le plus efficace est celui donnant lieu des vomissements. En effet, il suffit que ces symptômes apparaissent une seule fois après l'ingestion d'un aliment pour que l'individu développe une aversion profonde et tenace vis-à-vis de cet aliment, même s'il sait que ces symptômes n'ont pas été provoqués par l'aliment (Pelchat et Rozin, 1982). Ainsi, Domjan et Best (1980) ont observé une diminution de l'ingestion d'un aliment lorsque l'animal avait été au préalable exposé à cet aliment en présence d'un agent chimique le rendant malade (par exemple, l'exposition à des rayons γ). A l'inverse, lorsque l'ingestion d'un aliment s'accompagne d'un effet physiologique positif (apport d'énergie, compensation d'une carence nutritive, action thérapeutique...), l'appréciation hédonique d'un individu pour cet aliment augmente (Booth et al., 1982 ; Birch et al. 1990 ; Zellner, 1991 ; Johnson et al., 1991 ; Kern et al. 1993 ; Zandstra et al., 2002 ; Appleton et al., 2006 ; Brunstrom & Mitchell, 2007 ; Capaldi et al. 2007 ; Mobini et al., 2007 ; Yeomans et al., 2008). Ainsi Booth et al. (1982) ont exposé des participants à deux soupes de saveurs différentes, l'une pauvre en calories et l'autre riche en calories. Les participants ont ensuite évalué leur appréciation pour chacune des saveurs dans deux conditions physiologiques différentes, à jeun ou repu. Les résultats ont montré que la saveur préalablement associée à une forte teneur en calories était plus appréciée que l'autre saveur lorsque les participants avaient faim. En revanche, lorsque les participants étaient repus, c'est la saveur préalablement associée à la faible teneur en

calories qui devenait la plus appréciée. Dans une étude particulièrement intéressante, Yeomans et al.(2008) ont dissocié le conditionnement flaveur-nutriment, c'est-à-dire l'apprentissage d'une association entre une flaveur initialement neutre et un apport d'énergie, et le conditionnement flaveur-flaveur, c'est-à-dire l'apprentissage d'une association entre une flaveur initialement neutre et une flaveur déjà appréciée. Dans cette étude, le paradigme comprenait trois phases. Durant le pré-test, les participants ont donné une note d'appréciation pour la flaveur neutre (cette flaveur était un mélange aromatique de quatre arômes de fruits : canneberge, orange, kiwi, mandarine). Durant la phase de conditionnement, les participants ont été exposés à une boisson contenant cette flaveur et, selon le groupe, un composé énergétique ne présentant pas de saveur (maltodextrine, groupe flaveur-nutriment), un composé sucré n'apportant pas d'énergie (aspartame : groupe flaveur-flaveur), un composé sucré et apportant de l'énergie (sucrose : groupe flaveur-flaveur/flaveur-nutriment), ou aucun composé supplémentaire (groupe contrôle). Les participants devaient consommer ces boissons trois heures après le petit-déjeuner, quatre jours de suite. Durant le post-test, les participants ont à nouveau noté leur appréciation hédonique pour la flaveur. Il convient de souligner que durant le pré-test et le post-test, la flaveur était présentée sous forme de sorbet que les participants pouvaient consommer *ad libitum*, ce qui a permis aux auteurs de mesurer les quantités ingérées en plus de la note d'appréciation hédonique. Les résultats ont montré un effet du conditionnement flaveur-flaveur/flaveur-nutriment (sucrose) sur l'appréciation hédonique ainsi qu'un effet des conditionnements flaveur-flaveur/flaveur-nutriment et flaveur-nutriment (maltodextrine) sur les quantités de sorbet ingérées en post-test. Le conditionnement flaveur-flaveur (aspartame) n'a pas entraîné de modification d'appréciation ou d'ingestion différente de celle observée dans le groupe contrôle (effet simple exposition).

La majorité des travaux de la littérature portant sur le conditionnement s'est intéressée à l'apprentissage d'une association entre les caractéristiques organoleptiques d'un aliment et son apport énergétique. A notre connaissance, aucune étude ne s'est intéressée à l'apprentissage d'une association entre les caractéristiques sensorielles d'un aliment et son pouvoir rassasiant. Il nous a donc semblé intéressant d'exposer un premier groupe (groupe « exposé ») à un pain peu rassasiant (pain PM) au cours d'un petit-déjeuner et à un pain riche en fibres, donc supposé plus rassasiant (pain PF2) au cours d'un autre petit-déjeuner, puis d'observer l'impact de cette phase de conditionnement sur les attentes ultérieures des participants pour ces pains, et cela par rapport à un groupe contrôle, n'ayant pas été *a priori* exposé à ces pains (groupe « non-exposé »). Il est à noter qu'à la différence de l'étude de

Yeomans et al. (2008), nous n'avons pas pu réaliser un pré-test et un post-test, faute de pouvoir présenter un pain possédant strictement les caractéristiques sensorielles du pain PF2 mais sans fibres.

a- Matériel et méthode

Deux groupes de participants ont été recrutés. Un premier groupe (groupe « exposé ») a participé à deux séances d'exposition et à une séance test. Un deuxième groupe (groupe « non-exposé ») n'a participé qu'à la séance test. Durant les séances d'exposition, les participants ont consommé un pain riche en fibres (pain PF2) et un pain pauvre en fibres (pain PM) à l'occasion de deux petits-déjeuners (un type de pain par petit-déjeuner). Durant la séance test, nous avons évalué les attentes des participants en matière de rassasiement et d'appréciation hédonique pour chaque type de pain.

Les participants ont été répartis aléatoirement dans deux groupes : un groupe expérimental et un groupe contrôle. Les participants du groupe expérimental ont participé à trois petits déjeuners : deux petits-déjeuners d'apprentissage d'environ 30 minutes chacun (un pour le PF2, un pour le PM) et un petit-déjeuner de test d'environ une heure. Les deux premiers petits déjeuners ont eu lieu deux jours consécutifs (par exemple, lundi et mardi) et le troisième a eu lieu une semaine plus tard (par exemple, le lundi suivant). Les participants du groupe contrôle n'ont participé qu'à un petit-déjeuner équivalent au petit-déjeuner test du groupe expérimental. De ce fait, ils ont effectué le test sans avoir été pré-exposés aux pains. Quel que soit le groupe ou la séance considéré, les participants se rendaient au laboratoire à jeun.

Lors de la première séance pour le groupe expérimental ou lors de la seule séance pour le groupe contrôle, une fiche d'information et de consentement était lue avec les participants leur indiquant le déroulement des séances ainsi que les différentes évaluations et procédures prévues dans le cadre de cette expérience.

A chaque séance, les participants devaient compléter un questionnaire « petit-déjeuner » à différents moments de la matinée : avant le petit-déjeuner, après le petit-déjeuner et ensuite toutes les heures jusqu'à l'heure du déjeuner. Ce questionnaire avait pour but d'évaluer la sensation de faim, de stress, de fatigue et les différentes prises alimentaires au cours de la matinée.

Sujets

Soixante trois participants adultes normopondéraux ont été recrutés. Pour participer, les candidats devaient être âgés entre 20 et 45 ans et avoir l'habitude de prendre un petit-déjeuner incluant au moins un produit de panification (pain, viennoiserie, biscottes) tous les jours. Enfin, les candidats ne devaient pas présenter d'allergie pour les produits de l'étude, ne devaient pas être sous traitement médical, ne devaient pas fumer plus de cinq cigarettes par jour ni pratiquer plus de cinq heures de sport par semaine. Les femmes enceintes ou allaitant un bébé n'étaient pas non plus retenues. Chaque participant a complété la version française du Three Factors Eating Questionnaire (Stunkard & Messick, 1985) afin de déterminer son score de restriction alimentaire.

Les participants étaient répartis en deux groupes : un groupe « exposé » qui comprenait 13 hommes et 18 femmes (âge : 31 ± 7 ans, score de restriction : $6,5 \pm 3,5$) et un groupe « non-exposé » qui comprenait 10 hommes et 22 femmes (âge : 30 ± 7 ans, score de restriction : $6,4 \pm 3,1$). Les participants n'étaient pas informés du but réel de l'étude. Ils étaient cependant informés que l'étude portait sur l'influence de la consommation d'un petit-déjeuner sur la concentration et le stress ressentis au cours de la matinée. Ce faux prétexte était utilisé afin de permettre un apprentissage incident et un rappel implicite de l'association pain / pouvoir rassasiant.

Le protocole a été approuvé par le Comité de Protection de la Personne Est I, de Dijon. En accord avec ce dispositif, les participants ont reçu une fiche d'information sur l'étude et signé un formulaire de consentement éclairé. Les participants ont reçu une indemnisation de 10 euros par séance.

Produits

L'étude a été réalisée avec deux types de pain : un pain pauvre en fibres PM et un pain riche en fibres PF2, ces deux pains étant formulés par la société CERELAB® Gustalis (Longvic, France). La composition du pain PF2 était la suivante (pour 100 g de pain consommé) : 36,8 g de glucides (dont 12,8 g de fibres), 3,8 g de lipides et 11,8 g protéines. L'apport calorique est de 228,8 kcal pour 100 g. La composition du pain PM était la suivante (pour 100 g de pain consommé) : 51,2 g de glucides (dont 2,4 g de fibres), 3,4 g de lipides et 7,6 g de protéines. L'apport calorique était de 265,6 kcal pour 100 g.

Déroulement

Relevés alimentaires

Une semaine avant de commencer l'étude, tous les participants devaient relever la nature et la quantité de tous les aliments et boissons consommés pendant trois petits-déjeuners habituels pris à leur domicile. Une balance alimentaire Clatronic (KW204, Kempen, Allemagne, précision ± 1 g) leur était prêtée pour réaliser leurs pesées. Ces relevés ont ensuite été analysés afin de déterminer pour chaque participant une masse moyenne de pain, de confiture et un volume moyen de café consommé au petit-déjeuner.

Séances d'exposition (Séances 1 et 2 du groupe « exposé »)

A chaque séance, les participants recevaient un petit-déjeuner composé d'une assiette contenant le pain, un ramequin de confiture, une tasse de café et un verre de jus d'orange. La moitié des participants recevait le pain PM lors du premier petit-déjeuner et le pain PF2 lors du deuxième petit-déjeuner. L'autre moitié a reçu ces pains dans l'ordre inverse. Pour chaque participant, les quantités de pain et de confiture correspondaient aux quantités habituellement consommées par ce participant au petit-déjeuner. Les participants avaient pour instruction de consommer la totalité des aliments proposés. Avant et après chaque petit-déjeuner, ils devaient noter les items suivants sur des échelles visuelles analogiques :

-« A l'instant présent, quelle est votre envie de pratiquer une activité physique ? » - (« Pas du tout envie » - « Très envie ») ;

- « A l'instant présent, quelle est votre envie de dormir ? » (« Pas du tout envie » - « Très envie ») ;

- « A l'instant présent, quelle est votre faim ? » (« Pas du tout faim » - « Très faim ») ;

- « A l'instant présent, quel est votre niveau de stress ? » (« Pas du tout stressé » - « Très stressé ») ;

- « A l'instant présent, quelle est votre humeur ? » (« Très mauvaise humeur » / « Très bonne humeur »).

Les participants étaient ensuite libres de quitter le laboratoire mais devaient réévaluer ces cinq items toutes les heures, jusqu'à l'heure du déjeuner. Il est à noter que parmi ces cinq items, seul l'item « sensation de faim » était d'intérêt pour la présente étude (évolution de la

sensation de faim au cours de la matinée en fonction du pain consommé). Les autres items étaient des items leurres permettant d'accréditer le faux-prétexte de l'étude.

Séance test (séance 3 du groupe « exposé » et séance 1 du groupe « non-exposé »)

Les participants commençaient par effectuer un test *choix de tartines*. Pour chaque pain, chaque participant recevait une assiette contenant une masse de pain de deux fois supérieure à la masse habituellement consommée par ce participant au petit-déjeuner. Les instructions étaient les suivantes : « Nous allons vous présenter deux assiettes contenant des tranches de pains provenant de pains identiques à ceux consommés lors des séances précédentes (instructions pour le groupe « exposé ») / de pains différents (instructions pour le groupe « non-exposé »). Pour chaque type de pains, nous vous demandons de vous préparer une assiette avec le nombre de tartines que vous souhaitez consommer lors du petit-déjeuner qui sera pris à la fin de la séance. Une assiette sera tirée au sort parmi les deux assiettes que vous allez préparer : l'assiette tirée au sort vous sera présentée pour votre petit-déjeuner d'aujourd'hui. S'il n'y a pas assez de tranches dans une assiette, n'hésitez pas à nous en redemander. » Après avoir pesé le contenu de chaque assiette, l'expérimentateur procédait au tirage au sort.

Les participants ont ensuite effectué un test de *notation sur échelles*. Ce test consistait à évaluer chaque pain selon quatre conditions différentes : une condition *visuelle* (en regardant l'aliment), une condition *olfactive* (yeux bandés, en *sentant* pain), une condition *gustative* (yeux bandés, en *goûtant* le pain) et enfin une condition *globale* (situation de consommation normale ou les participants pouvaient voir et goûter le pain sans contrainte). Pour chaque condition et pour chaque pain, les participants évaluaient leur appréciation hédonique du pain, le caractère rassasiant du pain et la digestibilité du pain (« Quel est votre degré d'appréciation de ce pain » (« Je n'apprécie pas du tout » à « J'apprécie beaucoup ») ; « D'après vous, le pain proposé dans cette assiette est... » (« Très peu rassasiant » à « Très rassasiant ») ; « D'après vous, ce pain est-il... » (« Facile à digérer » à « Difficile à digérer »)). La moitié des participants commençait par la condition visuelle puis effectuait les conditions olfactives et gustatives. L'autre moitié des participants procédait dans l'ordre inverse. Tous terminaient par la condition globale. Pour finir, les participants recevaient un petit-déjeuner composé de l'assiette tirée au sort dans le cadre du test *choix de tartines*, d'un ramequin de confiture, d'une tasse de café et d'un verre de jus d'orange. Comme pour les séances d'exposition, les participants devaient noter cinq items : leur envie de pratiquer une activité physique, leur

envie de dormir, leur niveau de faim, leur niveau de stress et leur humeur au début et à la fin de la séance. Seules les données de faim mesurées au début de la séance ont été exploitées.

Conditions expérimentales

Pour le groupe « exposé » les deux séances d'exposition ont lieu sur deux jours consécutifs et la séance test a lieu une semaine après. Tous les participants devaient venir au laboratoire à jeun. Les séances ont eu lieu à l'UMR CSGA de l'INRA de Dijon, dans une salle ventilée, climatisée et équipée de cabines individuelles. Les questionnaires utilisés lors des séances ont été préparés à l'aide du système Fizz® (BioSysteme, Couternon, France) permettant une saisie automatique des réponses des participants dans un fichier informatique.

Analyse des données

Les scores recueillis sur les échelles visuelles analogiques ont été transformés en notes allant de 0 (borne gauche) à 10 (borne droite). Les analyses de la variance (ANOVA) ont été réalisées avec la procédure GLM du logiciel SAS (type ss3). Lorsqu'un effet était significatif, une comparaison multiple des moyennes a été effectuée à l'aide de la méthode des *lsmeans*.

b- Résultats

Mesures de la sensation de faim au début de chaque séance

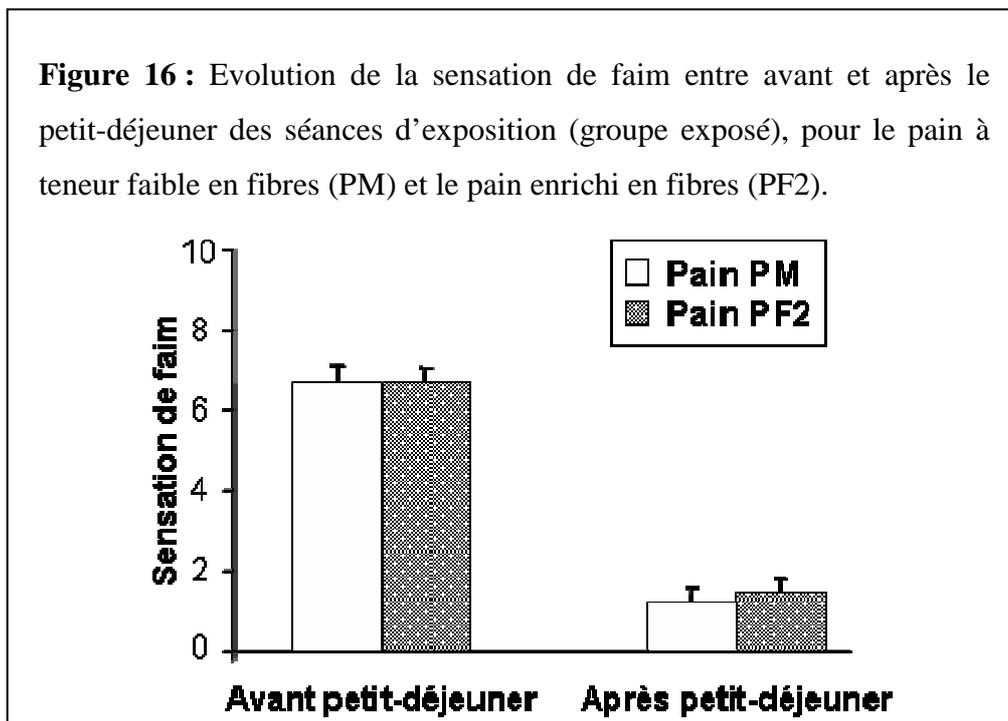
Afin de vérifier que les participants du groupe « exposé » sont arrivés dans les mêmes conditions aux trois séances (deux séances d'exposition et une séance test), une ANOVA à un facteur, le facteur *séance* a été réalisée sur les notes de faim recueillies au début de chaque séance. Les résultats n'ont pas montré d'effet *séance* sur les notes de faim ($F=0.42$; $p>.05$).

Par ailleurs, afin de vérifier que les participants du groupe « exposé » et du groupe « non-exposé » sont arrivés dans les mêmes conditions à la séance test, les notes de faim recueillies au début de cette séance ont été soumises à une ANOVA à un facteur, le facteur *groupe*. Les résultats de cette analyse n'ont pas montré d'effet *groupe* sur les notes de faim ($F=2,14$; $p>.05$).

Evolution de la sensation de faim après la consommation d'un pain riche en fibres versus d'un pain pauvre en fibres au petit-déjeuner (séances d'exposition)

Effets de la teneur en fibres des pains sur le rassasiement

Les notes de faim recueillies avant et après les petits-déjeuners des séances d'exposition (groupe « exposé » uniquement) ont été soumises à une ANOVA avec le facteur *pain* et le facteur *moment de l'évaluation* en facteurs fixes et avec le facteur *sujet* en aléatoire. Cette ANOVA a mis en évidence un effet *moment de l'évaluation* ($F=1275,8$; $p<.001$) mais pas d'effet *pain* ($F=0,77$; $p>.05$) ni d'interaction *pain*moment de l'évaluation* ($F=0,58$; $p>.05$). D'après la comparaison multiple des moyennes, la sensation de faim est plus faible après le petit-déjeuner qu'avant, et ce, quel que soit le pain considéré (Figure 16).

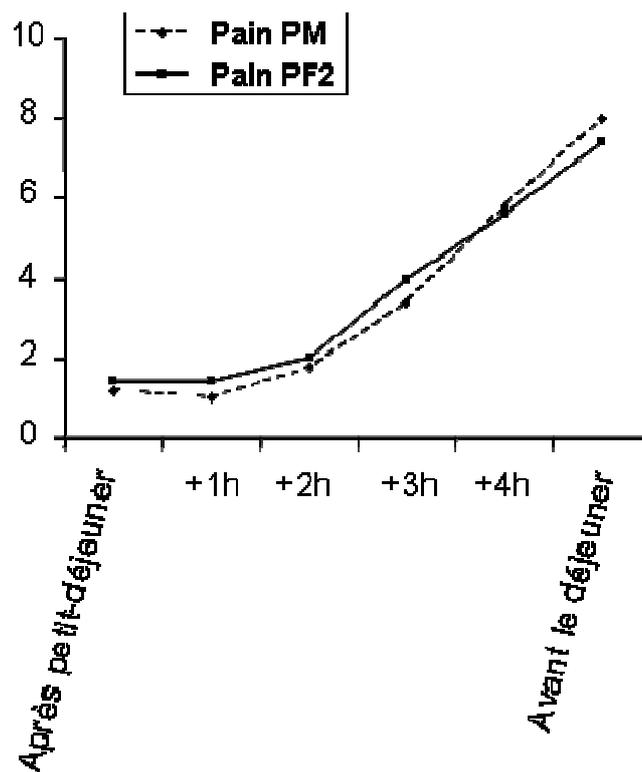


Effets de la teneur en fibres des pains sur la satiété

L'évolution des notes de faim recueillies après les petits-déjeuners d'exposition a été modélisée en utilisant un modèle linéaire mixte avec l'effet *pain* comme effet fixe et les effets *temps* et *sujet* comme effets aléatoires. En ce qui concerne la partie aléatoire, nous avons recherché une structure de corrélation adaptée pour rendre compte des éventuelles corrélations entre les mesures effectuées à différents temps pour un participant donné. Nous avons choisi la structure de corrélation de type *compound symmetry* (cs) conduisant au critère d'Akaike (AIC) le plus faible pour la majorité des jeux de données. Ces analyses statistiques ont été effectuées avec la procédure MIXED du logiciel SAS (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA).

L'analyse de la variance marginale a mis en évidence un effet *moment de l'évaluation* ($F=663,6$; $p<.001$) aussi bien pour le terme linéaire que pour le terme quadratique (*moment de l'évaluation*moment de l'évaluation*) ($F=60,5$; $p<.001$). Cette analyse n'a pas mis en évidence d'effet *pain* significatif ($F=0,18$; $p>.05$) mais une interaction *pain*moment de l'évaluation* presque significative ($F=2,63$; $p=.10$). Comme le montre la Figure 17, les notes de faim augmentent au fil de la matinée, d'abord lentement puis de plus en plus rapidement (parabole). Cette remontée de faim tend à être plus lente pour le pain riche en fibres (PF2) que pour le pain pauvre en fibres (PM).

Figure 17 : Evolution de la sensation de faim suite à la consommation des petits-déjeuners d'exposition (groupe expérimental). La sensation de faim est relevée immédiatement après le petit-déjeuner, une heure, deux heures, trois heures et quatre heures après le petit-déjeuner et juste avant le déjeuner.



Résultats du test choix de tartines

Tableau 5 : Test « choix de tartines » : résultats de l'ANOVA réalisée sur le nombre et le poids des tranches prises par les participants.

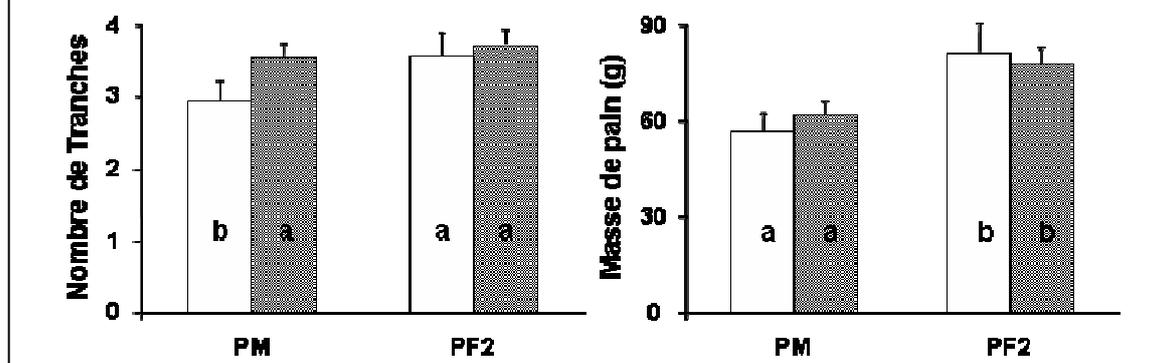
| | | Nombre de tranches choisies | Poids de pain choisi |
|--------------------|---|-----------------------------|----------------------|
| Groupe | F | 13.2** | 0.13 |
| Pain | F | 14.2** | 63.9** |
| Groupe*Pain | F | 4.95* | 3.00 |

La figure 18 représente le nombre et le poids moyen des tranches prises par les participants de chaque type de pain et pour chaque groupe (PM et PF2) au cours du test « choix des tartines ». Ces paramètres ont été soumis à une ANOVA avec l'effet *pain* et l'effet *groupe* comme effet fixe et l'effet *sujet(groupe)* comme effet aléatoire (Tableau 5).

En ce qui concerne le nombre de tranches, l'ANOVA a mis en évidence un effet *pain*, un effet *groupe* et une interaction *pain*groupe* (respectivement $F=13,2$; $p<.001$, $F=14,2$; $p<.001$ et $F=4,95$; $p<.05$). D'après une analyse de comparaisons multiples des moyennes, les participants des deux groupes ont pris autant de tranches du pain riche en fibres (PF2). En revanche, les participants du groupe « exposé » ont pris plus de tranches du pain pauvre en fibres que les participants du groupe « non-exposé ».

En ce qui concerne le poids, l'ANOVA a mis en évidence un effet *pain*. L'interaction *pain*groupe* est presque significative ($F=$; $p=.09$). Au sein des deux groupes, le poids des tranches prises par les participants était plus important pour le pain riche en fibres (PF2) que pour le pain pauvre en fibres (PM). Pour ce dernier, on retrouve la tendance observée avec le nombre de tranches, à savoir que le poids des tranches prises par les participants du groupe « exposé » tend à être plus important que celui des tranches prises par les participants du groupe « non-exposé ».

Figure 18 : Test « choix de tartines » : nombre et poids moyens des tranches prises par les participants du groupe « non-exposé » (en blanc) et du groupe « exposé » (en gris) pour chaque pain. Pour chaque paramètre, les moyennes associées à la même lettre ne sont pas significativement différentes ($p > .05$).



Résultats du test notation sur échelles

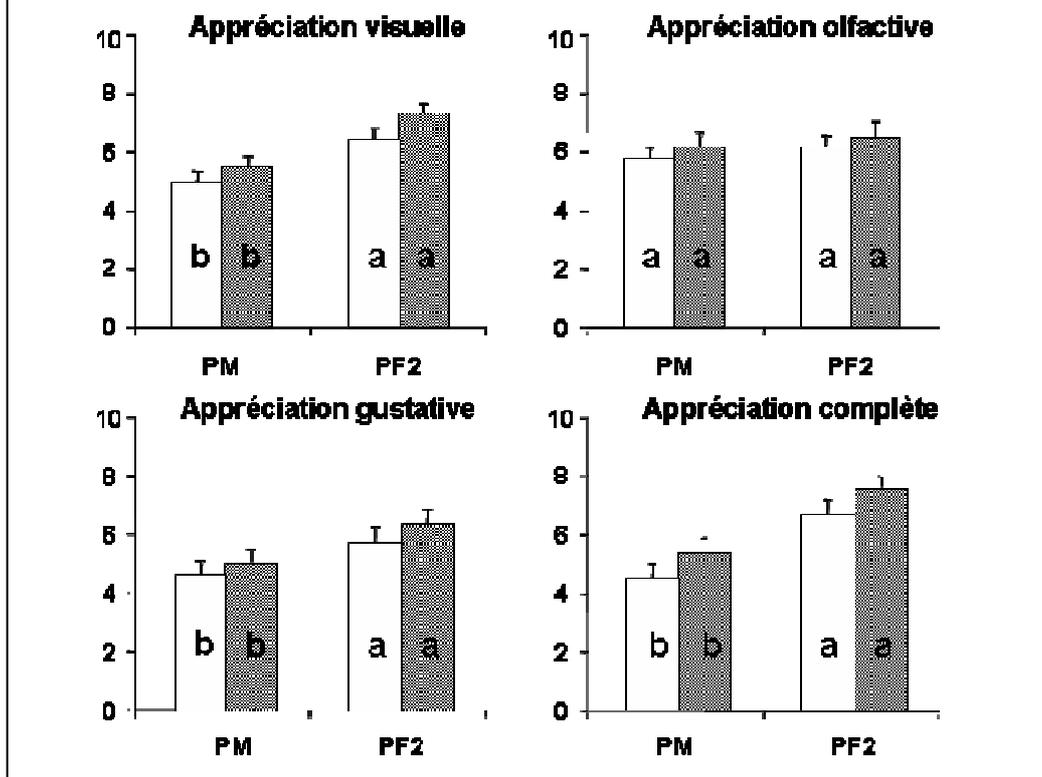
Tableau 4 : Test de « notation sur échelles » : résultat de l'ANOVA effectuée sur les notes d'appréciation et de rassasiement.

| | | Visuelle | Olfactive | Gustative | Globale |
|--------------|------------------------------------|--------------|-----------|-------------|-------------|
| APPRECIATION | F_{groupe} | 2.7 | 0.76 | 1.10 | 3.81 |
| | ρ_{groupe} | ns | ns | ns | * |
| | F_{pain} | 23.7 | 1.06 | 9.99 | 34.6 |
| | ρ_{pain} | ** | ns | * | ** |
| | $F_{\text{groupe}*\text{pain}}$ | 0.21 | 0.01 | 0.33 | 0.00 |
| | $\rho_{\text{groupe}*\text{pain}}$ | ns | ns | 0.57 | ns |
| RASSASIEMENT | F_{groupe} | 0.10 | 0.02 | 0.02 | 2.83 |
| | ρ_{groupe} | ns | ns | ns | ns |
| | F_{pain} | 12.24 | 2.08 | 19.7 | 47.4 |
| | ρ_{pain} | ** | ns | ** | ** |
| | $F_{\text{groupe}*\text{pain}}$ | 0.27 | 0.12 | 1.09 | 2.05 |
| | $\rho_{\text{groupe}*\text{pain}}$ | ns | ns | ns | ns |

Les Figures 19 et 20 présentent les notes d'appréciation et de rassasiement données par les participants pour chacune des conditions d'évaluation suivantes : une condition visuelle, une condition olfactive, une condition gustative et une condition globale (regroupant les trois premières) pour chaque pain et pour chaque groupe. Pour chaque condition, ces notes ont été

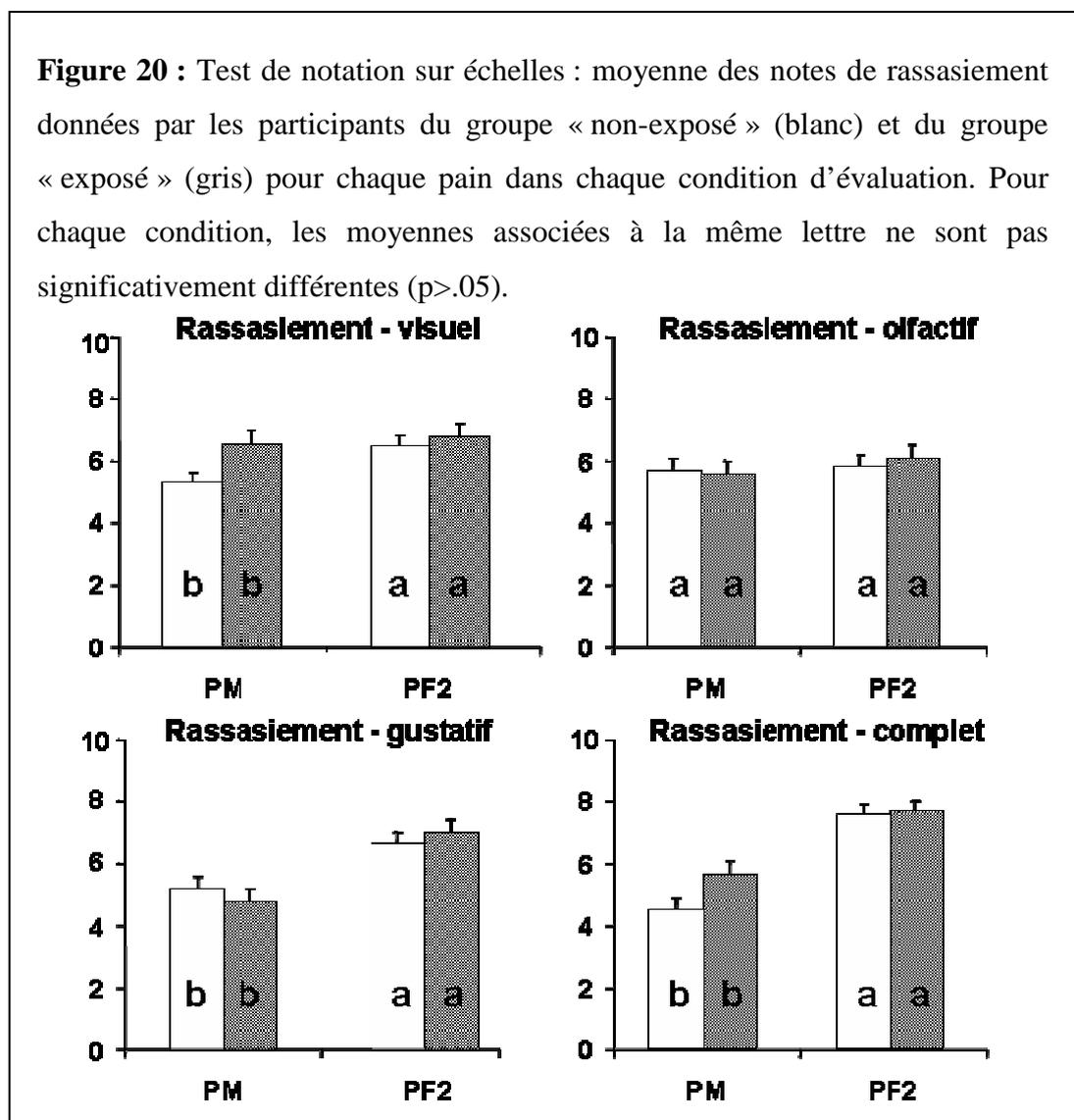
soumises à une ANOVA avec l'effet *pain* et l'effet *groupe* comme effets fixes et l'effet *sujet(groupe)* comme effet aléatoire (Tableau 4).

Figure 19 : Test de notation sur échelles : moyenne des notes d'appréciation données par les participants du groupe « non-exposé » (blanc) et du groupe « exposé » (gris) pour chaque pain dans chaque condition d'évaluation. Pour chaque condition, les moyennes associées à la même lettre ne sont pas significativement différentes ($p > .05$).



L'ANOVA a mis en évidence un effet *pain* sur les notes d'appréciation et de rassasiement dans les conditions visuelle, gustative et globale. Dans ces trois conditions, le pain riche en fibres (PF2) a été plus apprécié et jugé plus rassasiant que le pain pauvre en fibres (PM). En ce qui concerne les notes d'appréciation, un effet groupe significatif est observé dans la condition globale et presque significatif ($p = .10$) dans la condition visuelle. Les participants du groupe « exposé » ont donné des notes d'appréciation plus élevées que les participants du groupe « non-exposé », révélant probablement un effet simple d'exposition. Ce résultat n'est pas observé sur les notes de rassasiement. Enfin, ni les notes d'appréciation, ni les notes de rassasiement ne sont associées à une interaction *groupe*pain* significative.

Le pain PF2 a été plus apprécié par les participants que le pain PM aussi bien lors de l'exposition visuelle (PM : $M=5.2$; $\sigma=0.3$ et PF2 : $M=6.9$; $\sigma=0.3$), que dans la condition gustative (PM : $M=4.8$; $\sigma=0.3$ et PF2 : $M=6.0$; $\sigma=0.3$) et dans la condition globale (PM : $M=4.9$; $\sigma=0.3$ et PF2 : $M=7.1$; $\sigma=0.3$). Aucune différence n'a été observée entre les pains selon la condition olfactive. De plus, aucune différence n'est apparue au niveau des interactions *groupe*pain* quelle que soit la condition d'exposition des participants aux pains. L'ensemble de ces résultats suggère que la pré-exposition des participants aux deux pains lors des séances d'apprentissage semble avoir amélioré leur qualité organoleptique, autrement dit, les participants connaissant les pains les ont préférés.



En ce qui concerne l'aspect rassasiant des pains, l'ANOVA n'a pas permis de mettre en évidence d'effet groupe significatif (Figure 20). Le pain PF2 a été jugé comme plus rassasiant

que le pain PM selon la condition d'évaluation visuelle (PM : $M=5.5$; $\sigma=0.3$ et PF2 : $M=6.9$; $\sigma=0.3$), gustative (PM : $M=5.2$; $\sigma=0.3$ et PF2 : $M=7.1$; $\sigma=0.3$) et globale (PM : $M=5.1$; $\sigma=0.3$ et PF2 : $M=7.7$; $\sigma=0.3$). Aucune interaction *groupe*pain* n'est apparue significative quelle que soit la condition d'exposition.

c- Discussion

Cette étude a permis d'une part de comparer l'effet satiétogène (rassasiement et satiété) de deux pains présentant des teneurs en fibres différentes (2,4% et 12,8%). D'autre part, cette étude a permis d'évaluer les attentes spontanées des consommateurs en ce qui concerne le caractère rassasiant de chacun de ces pains ainsi que leurs attentes hédoniques. Enfin, cette étude a permis d'évaluer dans quelle mesure ces attentes étaient modifiées par une pré-exposition à chacun de ces pains (groupe « exposé »).

Contrairement à nos attentes, cette étude n'a pas mis évidence de différences liées à la consommation d'un pain riche en fibres *versus* d'un pain pauvre en fibres au petit-déjeuner sur le rassasiement et la satiété. Le seul effet significatif observé est une réaugmentation de la sensation de faim au cours de la matinée, plus lente pour le pain riche en fibres que pour le pain pauvre en fibres. Des résultats similaires ayant été obtenus dans le cadre de la deuxième étude, l'influence de la teneur en fibres des pains de notre étude sur le rassasiement et la satiété sera discutée à la fin de ce premier chapitre.

Par ailleurs, les participants du groupe « non-exposé » ont jugé le pain riche en fibres plus rassasiant et ont davantage apprécié ce pain que le pain pauvre en fibres et ce, que l'évaluation se fasse d'après l'aspect des pains (observation visuelle) ou d'après leur la saveur (dégustation des pains). Autrement dit, les caractéristiques d'aspect et les caractéristiques sensorielles en bouche des deux pains choisis comme modèle d'étude induisent des attentes physiologiques et des réponses hédoniques différentes. Le résultat sur les attentes physiologiques est *a priori* étonnant, car pour que les participants reçoivent des masses identiques de chacun des pains, le volume servi de pain pauvre en fibres était plus important que le volume servi de pain riche en fibres. Ainsi, dans la condition visuelle, le nombre de tartines servies était le même pour les deux pains mais le volume de chaque tartine était environ trois fois plus important pour le pain pauvre en fibres que pour le pain riche en fibres. Malgré cette différence de volume, les participants ont jugé le pain riche en fibres plus rassasiant. En ce qui concerne l'effet de la teneur en fibres sur la réponse hédonique, les

données de la littérature montrent que les aliments riches en fibres sont en général moins appréciés que les aliments pauvres en fibres à la fois pour des raisons sensorielles, que pour des raisons post-ingestives négatives. Le résultat inverse observé dans notre étude est encourageant pour la suite du travail. En effet, ces résultats ont démontré que le pain riche en fibres formulé dans le cadre de ce projet était bien accepté par les consommateurs.

Enfin, un effet de l'exposition aux pains a été observé sur les attentes ultérieures des consommateurs, mais ce uniquement pour le « test tartines » et uniquement pour le pain pauvre en fibres. En effet, les participants du groupe « exposé » se sont servis plus de tartines du pain pauvre en fibres que les participants du groupe « non-exposé ». Autrement dit, l'exposition n'a pas entraîné de modification du nombre de tartines choisies par les participants pour le pain riche en fibres (jugé plus rassasiant et plus apprécié par les participants), mais une augmentation du nombre de tartines pour le pain pauvre en fibres (jugé moins rassasiant et moins apprécié par les participants). Il convient toutefois de rappeler que lors de la séance test, les participants étaient à jeun. Comme dans l'étude menée par Booth (1981), il aurait été intéressant de comparer les réponses de participants à jeun avec les réponses de participants repus. Nous pouvons effectivement émettre l'hypothèse, que si les participants avaient été repus dans le groupe « exposé », ils se seraient servis moins de tartines du pain riche en fibres que les participants du groupe « non-exposé ». Aucun effet de l'exposition n'a été observé sur l'évaluation du caractère satiétogène des pains lorsque ce dernier est mesuré sur des échelles visuelles analogiques. Une explication possible pourrait être que le *test choix de tartines* relève davantage de mécanismes *implicite* tandis que le *test de notation sur échelles* relève davantage de mécanismes *explicites*. En effet, comme le rappelle Issanchou et al. (2002), les attentes des consommateurs relèvent essentiellement des mécanismes *implicites*. En effet, lorsque nous choisissons un aliment parmi plusieurs, nous n'avons pas spécialement l'habitude de nous poser explicitement la question de « combien j'aime cet aliment ? » ou de « combien cet aliment va-t-il me rassasier ? ». De la même façon, Yeomans et al.(2008) a observé davantage d'effets du conditionnement sur des quantités consommées que sur des notations sur échelles.

d- Conclusion

En conclusion, même si cette étude n'a pas permis de valider l'effet satiétogène d'un pain riche en fibres, les résultats se révèlent intéressants car ils ont montré que ce pain était bien accepté et jugé plus rassasiant par les consommateurs. Il convient de rappeler qu'une bonne

acceptation était un élément important dans la formulation et la validation d'un pain riche en fibres destiné à être commercialisé. Par ailleurs, il semble qu'une exposition préalable à un pain riche en fibres *versus* un pain pauvre en fibres induise un changement dans les choix *implicites* des participants vis-à-vis du pain pauvre en fibres. Pour conforter ces résultats il serait intéressant d'une part de comparer les résultats obtenus chez des participants à jeun *versus* des participants repus et d'autre part d'exposer les participants à chacun des pains sur une période plus longue, comme l'a fait Yeomans et al. (2008).

2) Etude 2 : Evaluation du caractère satiétogène des pains riches en fibres

Cette étude a porté sur quatre pains, deux pains riches en fibres (dont le pain testé dans l'étude 1) et deux pains pauvres en fibres. L'objectif était de comparer l'effet de la consommation de ces pains sur la satiété et les prises alimentaires subséquentes afin de sélectionner le pain le plus satiétogène pour la suite du travail de thèse. Pour cela, trente deux dégustateurs normopondéraux ont été invités à consommer chaque pain au cours de différents petits-déjeuners. Pour chaque petit-déjeuner, nous avons d'une part suivi l'évolution de la sensation de faim au cours de la matinée et d'autre part, enregistré la prise alimentaire au cours d'une collation servie trois heures après le petit-déjeuner. Il convient de souligner que l'étude 1 s'est intéressée à l'effet de la consommation d'un pain riche en fibres sur la re-consommation *de ce pain* tandis que l'étude 2 s'est intéressée à l'effet de la consommation d'un pain riche en fibres sur les prises alimentaires environnantes.

D'un point de vue méthodologique, la littérature propose deux types de paradigmes, un paradigme à court terme et un paradigme à long terme pour étudier l'effet de l'enrichissement d'un aliment en fibres sur la sensation de faim et/ou les prises alimentaires subséquentes. Le paradigme à « court terme » (Grimes et Gordon, 1980 ; Levine et al., 1989 ; Porikos et Hagamen, 1986 ; Chow et al., 2007 ; Lyly et al., 2009) consiste à servir une ration enrichie en fibres à des participants à jeun (phase de précharge ou *preload* en anglais) puis à observer l'évolution de la sensation de faim et/ou de la prise alimentaire au cours d'un repas proposé aux participants dans des conditions contrôlées (intervalle de temps fixé entre la précharge et le repas, nature et composition d'aliments proposés). Par exemple, Levine *et al.* (1989) ont proposé à leurs participants de consommer cinq variantes de céréales présentant des teneurs différentes en fibres (de 0 à 39%), au cours de différents petits-déjeuners. La masse de céréales consommée était la même pour toutes les variantes. Trois heures après la consommation de la précharge, les participants se voyaient proposer un buffet (composé de yaourts, de hamburgers, de pain, de jelly, de margarine, de beurre de cacahuète, de fromage, de pêches, de carottes, de radis, de céleri, de cornichons, de condiments, de chips, de lait, de jus d'orange et de café) qu'ils pouvaient consommer *ad libitum* (mesure des apports caloriques). Les résultats ont montré que la sensation de faim n'était pas influencée par la teneur en fibres de la précharge. En revanche, les apports caloriques étaient plus faibles pour les céréales contenant le plus de fibres (35 et 39%) par rapport aux céréales contenant pas ou

peu de fibres (0, 11 et 18%). Le paradigme à « long terme » (Heaton et al., 1973 ; Rigaud et al., 1987 ; Stevens et al., 1987 ; Pasman et al., 1997) consiste à supplémenter l'alimentation quotidienne par un aliment riche en fibres sur une période relativement longue (une semaine, un mois...) et à regarder l'effet de cet ajout sur la sensation de faim, les prises caloriques quotidiennes et éventuellement le poids. Ainsi, dans une étude menée chez des femmes obèses, Pasman *et al.* (1997) ont montré que l'ajout quotidien de 40 g de fibres dans du jus d'orange pendant une semaine entraîne une diminution de la prise alimentaire de 19% par rapport à une situation contrôle.

Pour cette première partie du travail de thèse, nous avons choisi d'évaluer l'effet satiétogène des pains enrichis en fibres à l'aide du premier paradigme dit « à court terme ». En l'occurrence nous avons proposé aux participants de consommer quatre pains présentant différentes teneurs en fibres au petit-déjeuner puis nous avons évalué l'évolution de leur sensation de faim au cours de la matinée et leur prise calorique trois heures après cette précharge. En parallèle, cette étude nous a permis d'évaluer l'effet de la teneur en fibres sur le rassasiement sensoriel spécifique, l'état métabolique des participants et le système de récompense alimentaire (le *liking* et le *wanting*).

Le rassasiement sensoriel spécifique a été défini par Le Magnen (1956) comme la diminution relative du plaisir pour un aliment consommé *ad libitum* par rapport au plaisir pour des aliments non consommés. Ce mécanisme a été très largement étudié par Rolls et ses collaborateurs (Rolls et al., 1981 ; Rolls, 1986 ; Hetherington & Rolls, 1989). Cette diminution du plaisir pour l'aliment consommé aurait deux fonctions « écologiques » : d'une part elle inciterait l'être humain à varier son alimentation au cours d'un repas et d'autre part, elle lui permettrait d'éviter une intoxication alimentaire liée à la surconsommation d'un seul aliment (McCrary et al., 1999 ; Raynor & Epstein, 2001). Il a été montré que ce rassasiement sensoriel spécifique pouvait dépendre des caractéristiques de l'aliment. Ainsi Guinard et Brun (1998) ont montré que le rassasiement sensoriel spécifique était plus important pour un aliment plus dur et plus long à mâcher (en l'occurrence un sandwich à base de baguette et de jambon de pays) que pour un aliment plus mou et plus facile à mâcher (un sandwich à base de pain de mie et de jambon blanc). Les auteurs ont interprété cet effet par une augmentation du temps de stimulation en bouche dans le cas de l'aliment le plus dur. Par ailleurs, Hetherington *et al.* (2002) ont montré que le rassasiement sensoriel spécifique était plus important pour un aliment très palatable (en l'occurrence le chocolat) que pour un aliment moins palatable (pain

beurré). Dans la présente étude, nous avons voulu savoir si nos différents pains affectaient le rassasiement sensoriel spécifique.

En parallèle de l'évolution de la sensation de faim, nous nous sommes intéressés à l'évolution du quotient respiratoire (QR) après la consommation de pains présentant différentes teneurs en fibres. En effet, le quotient respiratoire qui correspond au rapport du volume de CO₂ expiré sur le volume d'O₂ inspiré, reflète le type de nutriments que le participant est en train d'oxyder. Une valeur du quotient respiratoire proche de 0,7 reflète un métabolisme plutôt lipidique, une valeur du quotient respiratoire proche de 0,85 reflète un métabolisme plutôt protidique et une valeur du quotient respiratoire proche de 1 reflète un métabolisme plutôt glucidique (Harrys et Benedict, 1919). Dans le cadre de la consommation d'un pain pauvre en fibres (index glycémique élevé), les glucides simples⁴ sont rapidement libérés et absorbés : le métabolisme est essentiellement glucidique. En revanche, dans le cadre de la consommation d'un pain riche en fibres, ces dernières vont encapsuler les macronutriments dans le chyme intestinal et ainsi retarder la libération et l'absorption de ces macronutriments. On peut donc faire l'hypothèse que les glucides simples contenus dans cet aliment seront libérés plus tardivement, ce qui ralentira d'autant plus le métabolisme glucidique. Le maintien de la glycémie à 1 g/L nécessitera donc d'utiliser les réserves du tissu adipeux grâce au mécanisme de néoglucogenèse, à savoir la biosynthèse du glucose à partir de lipides. En résumé, l'oxydation lipidique pourrait se prolonger dans le temps suite à la consommation d'une précharge riche en fibres par rapport à une précharge pauvre en fibres, la libération et l'utilisation des macronutriments étant ralentie.

Enfin, un dernier objectif de cette étude était d'observer dans quelle mesure la consommation de pains présentant différentes teneurs en fibres influence chaque composante du « système de récompense alimentaire ». En effet, d'après Berridge et Robinson (2003), « le système de récompense » comprendrait deux composantes susceptibles d'affecter le comportement alimentaire : le plaisir (*liking*) et l'appétence (*wanting*). Le plaisir (*liking*) correspondrait à la partie affective du mécanisme de récompense : un stimulus entraîne une réaction affective positive ou négative. L'appétence (*wanting*) correspondrait à la motivation du participant pour consommer un aliment, à un moment donné. Ces deux composantes font appel à des structures cérébrales distinctes. En effet, les structures cérébrales impliquées dans les réponses de plaisir se situent au niveau du cortex orbitofrontal et font appel à des neurones GABA-

⁴ Du fait de leur taille, les glucides simples sont les premiers macronutriments des aliments à être métabolisés et absorbés par l'organisme.

ergiques. Les structures cérébrales impliquées dans les réponses d'appétence se situent au niveau du noyau accumbens et font appel à des neurones dopaminergiques. Cette dissociation entre les composantes de plaisir et d'appétence a été largement étudiée dans le cadre de recherches sur la drogue (Berthoud, 2007). Dans le domaine alimentaire, quelques travaux ont mis en évidence une dissociation entre ces composantes suite à la consommation d'un repas (Zandstra *et al.*, 2000 ; Small *et al.*, 2001 ; Finlayson, 2008 ; Jiang 2008 ; Plailly, *soumis*). Ainsi, Small *et al.* (2001) ont montré que lorsque les participants consomment du chocolat jusqu'à satiété, les notes d'appétence diminuent plus vite que des notes de plaisir. Dans une étude plus récente, Plailly *et al.* (*submitted*) ont également montré une diminution des notes d'appétence pour des odeurs alimentaires après un repas plus important que la diminution des notes hédoniques pour ces mêmes odeurs.

a- Matériel et méthodes

Tous les participants ont été invités à participer à cinq petits-déjeuners expérimentaux : un pour la baguette, un pour le pain de mie (PM), un pour le pain PF2 et deux pour le pain PF1. Pour chaque petit-déjeuner, les participants devaient noter leur appréciation pour le pain consommé ce jour-là, leur sensation de faim, l'appréciation pour les odeurs de quatre aliments (*liking*) et leur appétence pour six aliments présentés sous forme de photographies (*wanting*). Le quotient respiratoire (QR), technique de calorimétrie indirecte, était également mesuré auprès de chaque participant.

Sujets

Trente deux participants adultes normopondéraux et non restreints ont été recrutés. Pour participer, les candidats devaient être âgés entre 20 et 45 ans, avoir un IMC compris entre 19 et 25 kg/m² et avoir l'habitude de prendre un petit-déjeuner incluant au moins un aliment solide tous les jours. Les candidats devaient également obtenir un score de restriction inférieur à 9, des scores de désinhibition et de faim inférieurs à 11 (Stunkard & Messick, 1985). Enfin, les candidats ne devaient pas présenter d'allergie alimentaire, ne devaient pas être sous traitement médical, ne devaient pas fumer plus de cinq cigarettes par jour ni pratiquer plus de cinq heures de sport par semaine. Les femmes enceintes ou allaitant un bébé n'étaient pas non plus retenues. Chaque candidat a été rencontré au cours d'un entretien individuel afin de vérifier qu'il satisfaisait aux critères d'inclusion. C'est à l'occasion de cet entretien qu'il remplissait la version française du *Three Factors Eating Questionnaire* permettant de calculer un score de restriction. Ce questionnaire a été développé par Stunkard et Messick en 1985 et

comprend 51 questions portant sur 3 dimensions : la restriction, la désinhibition et la faim. Le score contrôlé est celui de restriction cognitive qui varie de 0 à 21. Un score de restriction supérieur à 9 signifie que l'individu contrôle son alimentation, focalisant sur la restriction consciente de son comportement alimentaire. Au final, notre panel comprenait 16 hommes et 16 femmes âgés de 21 à 44 ans ($30,6 \pm 1,3$ ans), avec un IMC variant de 19,1 à 24,8 kg/m² ($22,0 \pm 0,3$ kg/m²), ayant un score de restriction variant de 2 à 9 (moyenne $6,1 \pm 0,4$), de désinhibition variant de 0 à 11 (moyenne $4,7 \pm 0,5$) et un score de faim variant de 0 à 11 ($3,9 \pm 0,5$).

Une fois retenus, les participants devaient noter et peser tous les aliments et boissons consommés pendant trois petits-déjeuners habituels consécutifs pris à leur domicile. Ces relevés étaient ensuite analysés à l'aide du logiciel Bilnut (S.C.D.A. Nutrisoft, Cerelles, France) afin de déterminer l'apport calorique habituel pour chaque participant lors d'un petit-déjeuner.

Le protocole a été approuvé par le Comité de Protection de la Personne Est I, de Dijon. En accord avec ce dispositif, les participants ont reçu une fiche d'information sur l'étude et signé un formulaire de consentement éclairé. Les participants ont reçu une indemnisation de 120 euros pour leur participation.

Pains

Quatre pains ont été sélectionnés pour cette étude : une baguette (Point Chaud / Elancia, Gevrey-Chambertin, France) et les trois pains de mie sélectionnés pour le travail expérimental (Gustalis, Longvic, France), la baguette (B) et l'un des pains de mie (PM) présentant une teneur en fibres faible et les deux autres pains de mie présentant une teneur en fibres élevée (PF1 et PF2). Le tableau 3 présente la composition de ces pains. Par ailleurs le pain PF1 se rapproche plutôt d'un pain de mie blanc plutôt familier, le pain PF2 correspond plutôt à un pain aux céréales moins familier pour les participants et le pain PM correspond au pain de mie blancs du commerce.

Déroulement

Les participants ont participé à cinq séances à raison d'une séance par semaine, sur cinq semaines consécutives. Quatre de ces séances différaient selon la nature du pain présenté lors du petit-déjeuner (l'ordre de présentation de ces séances suivait un carré latin). Du beurre et de la confiture ont été ajoutés à chaque pain afin que les teneurs en calories soient équivalentes entre les petits-déjeuners et équivalentes à l'apport calorique habituel de chaque

participant (Tableau 7). De plus, les pains présentant des densités très différentes, les différences de masse ingérée entre les pains ont été compensées par l'ingestion d'eau. Le Tableau 8 présente un exemple de la composition des petits-déjeuners pour un participant ayant l'habitude de consommer 292,6 kcal au petit-déjeuner. Cependant, comme le montre ce tableau, nous n'avons pas réussi à équilibrer à la fois les apports caloriques et les apports en macronutriments entre les petits-déjeuners. Ainsi pour le participant présenté dans le tableau 1, les petits-déjeuners formulés pour les pains PF1 et PF2 étaient composés de 60% de glucides et 25% de lipides tandis que les petits-déjeuners formulés pour les pains PM et B étaient composés de 70% de glucides et 20% de lipides. Une cinquième séance a donc été ajoutée afin d'évaluer l'influence de la composition en macronutriments des tartines indépendamment du contenu en fibres. Pour cela, des tartines du pain PF1 ont été préparées en ajoutant plus de confiture et moins de beurre (tartines PF1'). Cette cinquième séance a eu lieu soit avant (la moitié des sujets) soit après (l'autre moitié des sujets) les quatre autres. Le tableau 8 présente les quantités de pain et de chaque type de macronutriments pour un participant consommant 292,6 kcal habituellement.

Tableau 7 : Composition des tartines

| | PM | PF1 | PF2 | B |
|------------------------------|-----------|------------|------------|----------|
| Quantité de pain (g) | 150 | 163 | 170 | 170 |
| Quantité de beurre (g) | 8.0 | 13.0 | 8.0 | 11.0 |
| Quantité de confiture (g) | 14.6 | 20.0 | 25.0 | 15.0 |
| Teneur en calories (en kcal) | 499 | 498 | 513 | 558 |
| Glucides (%) | 70 | 60 | 62 | 71 |
| Lipides (%) | 21 | 29 | 23 | 18 |
| Protides (%) | 9 | 11 | 16 | 11 |

Tableau 8 : Exemple de composition des petits-déjeuners : cas d'un participant ayant l'habitude de consommer 292,6 kcal au petit-déjeuner

| | PM | PF1 | PF2 | B |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Quantité de pain (en g) | 88 | 96 | 96 | 89 |
| Quantité de beurre (en g) | 5.0 | 8.0 | 14.1 | 5.7 |
| Quantité de confiture (en g) | 8.5 | 7.6 | 4.5 | 7.8 |
| Teneur en calories (en Kca) | 292.7 | 293.3 | 289.7 | 292.1 |
| Volume d'eau (en g) | 123.5 | 113.4 | 110.5 | 122.5 |

Afin que les participants soient dans des conditions physiologiques similaires entre les petits-déjeuners, nous leur demandions de consommer un repas standard la veille de chaque séance. Ce repas était constitué d'une boîte de conserve de raviolis, d'un fromage blanc (100 g) et d'une compote (100 g). Par ailleurs, nous demandions aux participants de consommer ce repas avant 22 heures et de ne pas pratiquer d'activité physique dans la soirée. Enfin, le jour de la séance nous demandions aux participants de venir à jeun au laboratoire en évitant tout effort physique (si possible les participants devaient venir en bus ou en voiture).

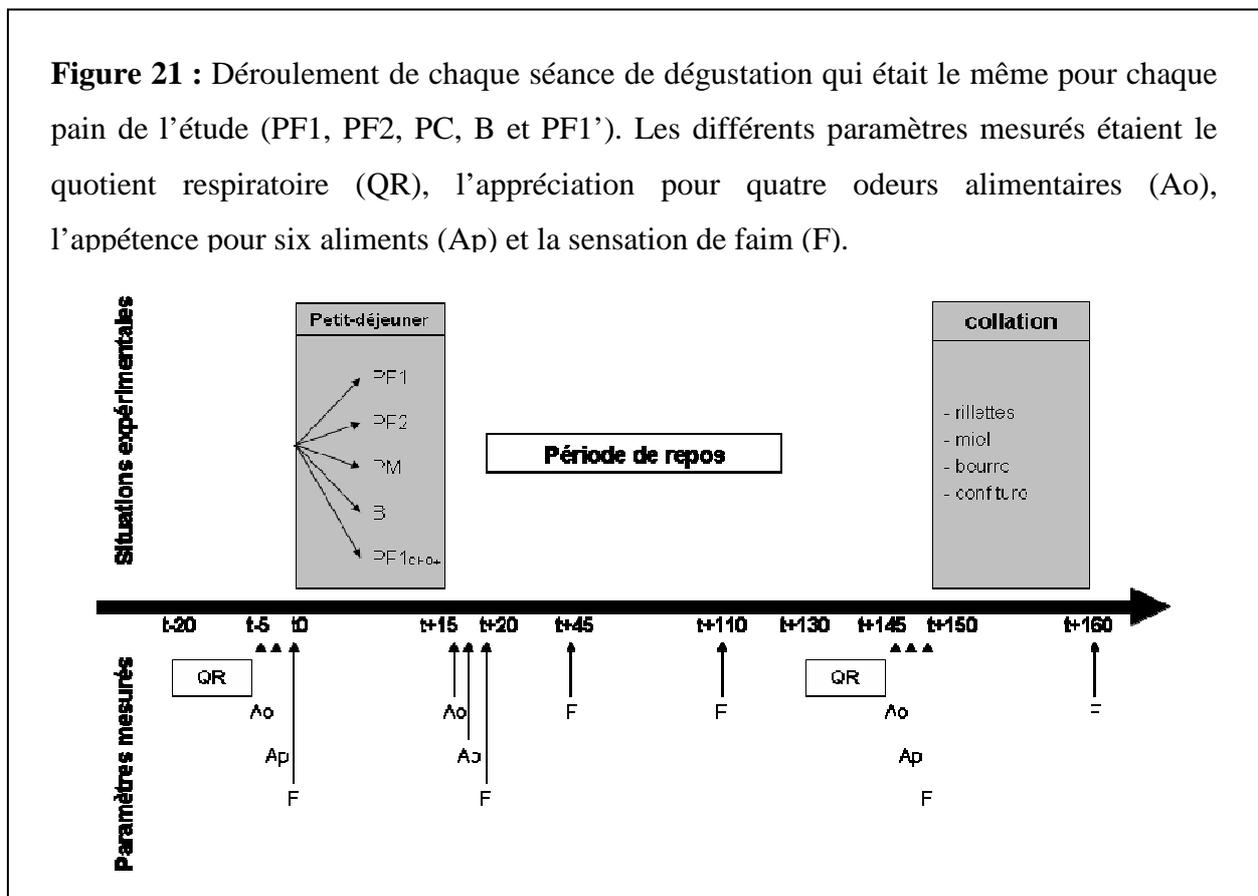
Selon les disponibilités des participants, les séances débutaient à 7h30, 7h50 ou 8h10 (pour un participant donné, l'heure était la même pour toutes les séances). La Figure 21 présente le déroulement de chaque séance. Après 10 minutes de repos dans un lit, une première mesure du quotient respiratoire (QR) était effectuée (durée 15 minutes). Puis, ils devaient évaluer leur sensation de faim, leur appréciation hédonique pour quatre odeurs alimentaires (test de *liking*), leur appétence pour six aliments (test de *wanting*). Les participants recevaient ensuite leur petit-déjeuner. Ils évaluaient alors le plaisir procuré par la consommation des tartines à la première et à la dernière bouchée. Une fois le petit-déjeuner terminé, ils évaluaient de nouveau leur sensation de faim, leur appréciation pour quatre odeurs alimentaires et leur appétence pour six aliments. Les participants devaient ensuite rester calmement allongés pendant deux heures. Ils pouvaient somnoler, lire ou écouter de la musique mais ne pouvaient pratiquer aucune activité physique. Au cours de ce temps de repos, les participants ont évalué leur sensation de faim 30 minutes et 90 minutes après le petit-déjeuner. A la fin de cette période, leur QR était de nouveau mesuré et les participants évaluaient une dernière fois leur sensation de faim, leur appréciation pour les quatre odeurs alimentaires et leur appétence pour

six aliments. Une collation composée de toasts de confiture de fraise, de miel, de beurre et de rillettes était proposée aux participants. Le pain utilisé pour préparer ces toasts était différent des pains expérimentaux (pain de mie Harrys©). Les participants étaient libres de consommer autant de toasts qu'ils le souhaitaient. L'expérimentateur relevait le nombre et la nature des toasts consommés. Les participants quittaient alors le laboratoire.

Mesure de QR

Chaque mesure durait 15 minutes, les participants étant en position allongée. Un masque bucco-nasal était posé sur leur visage (Hans Rudolf Inc., Kansas City, MO, USA). Chaque participant avait pour consigne de se relaxer et de respirer le plus calmement possible. L'analyse des gaz était réalisée en temps réel et à chaque cycle respiratoire, en utilisant un circuit de système ouvert (Vmax SPECTRA 29S, Sormedics Corp., Yorba Linda, Californie, USA). Les dix premières minutes de mesure permettaient au participant de s'habituer à la contrainte liée au masque. Seules les cinq dernières minutes de mesure étaient prises en compte pour déterminer le QR. Avant chaque mesure le système était calibré avec deux mélanges de gaz de composition constante.

Figure 21 : Déroulement de chaque séance de dégustation qui était le même pour chaque pain de l'étude (PF1, PF2, PC, B et PF1'). Les différents paramètres mesurés étaient le quotient respiratoire (QR), l'appréciation pour quatre odeurs alimentaires (Ao), l'appétence pour six aliments (Ap) et la sensation de faim (F).



Mesure de la sensation de faim.

Les participants évaluaient leur sensation de faim sur une échelle visuelle analogique bornée à gauche par « Je n'ai pas du tout faim » et à droite par « J'ai extrêmement faim ».

Mesure de l'appréciation de quatre odeurs alimentaires

Les participants recevaient quatre flacons contenant 10 g de quatre aliments différents (du beurre, de la mayonnaise, du miel et du sirop d'érable). Chaque flacon était identifié avec le nom de l'aliment. Les participants avaient pour instruction de sentir chaque odeur pendant 5 secondes puis d'évaluer leur plaisir à sentir cette odeur sur une échelle visuelle analogique bornée à gauche par « Extrêmement déplaisant » et à droite par « Extrêmement plaisant ». L'ordre de présentation des odeurs était équilibré entre les participants (carré latin de Williams) mais pour un participant donné cet ordre était toujours le même.

Mesure de l'appétence de six aliments

Les participants recevaient six photos (100 mm x 150 mm) d'aliments. Ces aliments étaient des corn-flakes, du jambon blanc, un œuf sur le plat, une pomme, du riz et un yaourt nature. Les participants devaient regarder chaque photo pendant 5 secondes puis évaluer leur envie de consommer cet aliment sur une échelle visuelle analogique bornée à gauche par « Pas du tout envie » et à droite par « Extrêmement envie ». L'ordre de présentation des photos était équilibré entre les participants (carré latin de Williams) mais pour un participant donné cet ordre était toujours le même.

Analyse des données

Les scores recueillis sur les échelles visuelles analogiques de 100 mm ont été transformés en notes allant de 0 (borne gauche) à 10 (borne droite). L'évolution des différents paramètres (notes d'appréciation des pains au moment du petit-déjeuner, notes de faim, notes d'appréciation des odeurs alimentaires, notes d'appétence des aliments et QR) durant l'exposition a été modélisée en utilisant un modèle linéaire mixte avec l'effet *condition* comme effet fixe, et les effets *temps* et *sujet* comme effets aléatoires. En ce qui concerne la partie aléatoire, nous avons recherché une structure de corrélation adaptée pour rendre compte des éventuelles corrélations entre les mesures effectuées à différents temps pour un participant donné. Nous avons choisi la structure de corrélation de type *compound symmetry* (cs) conduisant au critère d'Akaike (AIC) le plus faible pour la majorité des jeux de données. Ces analyses statistiques ont été effectuées avec la procédure MIXED du logiciel SAS (SAS

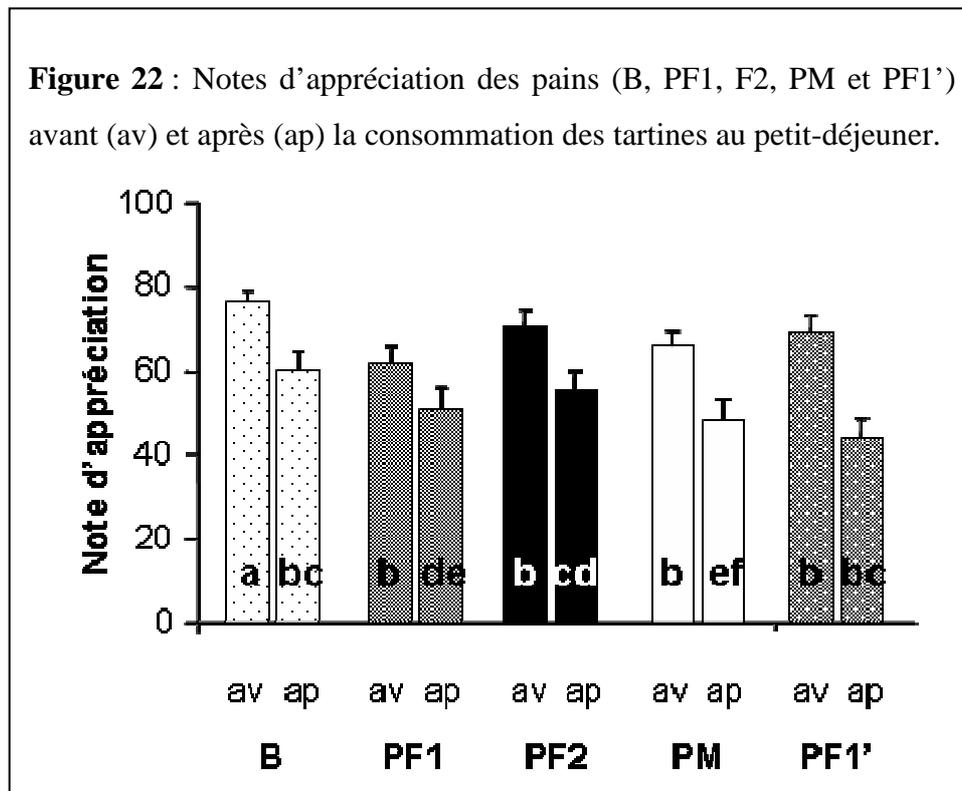
Institute Inc., Cary, NC, USA). Les ANOVAs ont été réalisées avec la procédure GLM du logiciel SAS (type ss3). Dans ce document, les données sont présentées sous la forme de moyennes \pm erreur standard.

b- Résultats

Tous les paramètres étaient mesurés à différents moments de la matinée. Ainsi, le QR était mesuré deux fois (avant le petit-déjeuner, avant la collation), la sensation de faim était mesurée cinq fois (avant le petit-déjeuner, après le petit-déjeuner, une heure après leur arrivée, deux heures après leur arrivée, avant la collation), le *liking* olfactif était mesuré trois fois (avant le petit-déjeuner, après le petit-déjeuner, avant la collation) et le *wanting* était mesuré trois fois (avant le petit-déjeuner, après le petit-déjeuner, avant la collation).

Effet sur le rassasiement

Les notes d'appréciation hédonique des tartines relevées au début et à la fin de chaque petit-déjeuner sont présentées dans la Figure 22. Ces notes ont été soumises à une ANOVA avec le facteur *pain* et le facteur *moment de l'évaluation* en facteurs fixes et avec le facteur *sujet* en aléatoire. Cette ANOVA a mis en évidence un effet *pain* ($F=5.02$; $p<.0001$), un effet *moment de l'évaluation* ($F=36.48$; $p<.0001$) et une interaction *pain*moment de l'évaluation* ($F=2.58$; $p<.05$). D'après une comparaison multiple des moyennes, les tartines faites à partir de baguette ont été plus appréciées que les tartines faites à partir du pain PF2, ces dernières étant elles-mêmes plus appréciées que les tartines faites à partir des trois autres pains (PM, PF1 et PF1'). Par ailleurs, l'appréciation de ces tartines est plus faible à la fin du petit-déjeuner qu'au début, et ce, quel que soit le pain. L'interaction *pain*moment de l'évaluation* vient du fait que les tartines PF1' sont plus appréciées que les tartines PF1 avant le petit-déjeuner alors qu'aucune différence n'est observée entre ces deux types de tartines après le petit-déjeuner. Une ANOVA faite sur la différence entre les notes recueillies au début et à la fin des petits-déjeuners a montré un effet *pain* ($F=2.58$; $p<.05$). La diminution d'appréciation est plus importante pour les tartines PF1' (différence=-24.625 ; $\sigma=3.16$) que pour les tartines PF1 (différence=-10.66 ; $\sigma=3.16$), les différences pour les autres tartines étant intermédiaires (PF2 : différence=-14.94 ; $\sigma=3.16$, B : différence=-15.84 ; $\sigma=3.16$, PM : différence=-24.62 ; $\sigma=3.16$).



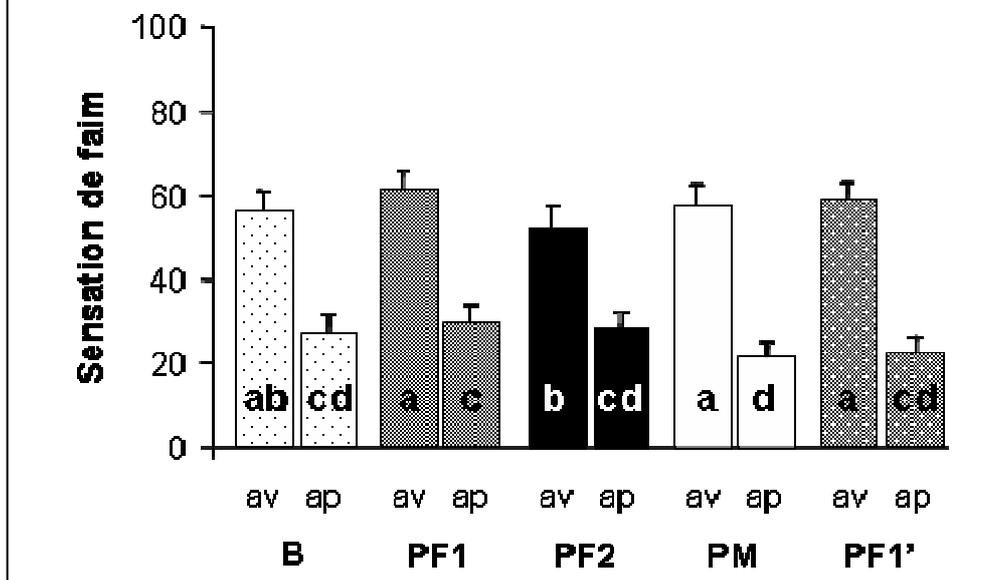
Effet sur la satiété

Sensation de faim

Effets des différentes tartines sur la sensation de faim immédiatement après le petit-déjeuner

Les notes de la sensation de faim avant et après le petit-déjeuner ont été soumises à une ANOVA avec le facteur *pain* et le facteur *moment de l'évaluation* en facteurs fixes et avec le facteur *sujet* en aléatoire. Cette ANOVA a mis en évidence un effet *moment de l'évaluation* ($F=48.87$; $p<.001$) et une interaction *pain*moment de l'évaluation* ($F=3.01$; $p<.05$). L'effet *pain* n'est pas significatif ($F=0.81$; $p>.05$). D'après la comparaison multiple des moyennes, la sensation de faim est plus faible après le petit-déjeuner qu'avant, et ce, quel que soit le pain considéré (Figure 23). L'interaction *pain*moment de l'évaluation* vient du fait qu'après le petit-déjeuner la sensation de faim est plus faible suite à la consommation du pain PM que suite à la consommation du pain PF1 ($p<.05$) et dans une moindre mesure que suite à la consommation du pain PF2 ($p=.07$).

Figure 23 : Valeurs de la sensation de faim avant (av) et après (ap) consommation de chaque pain (B, PF1, PF2, PM, PF1') au petit-déjeuner.



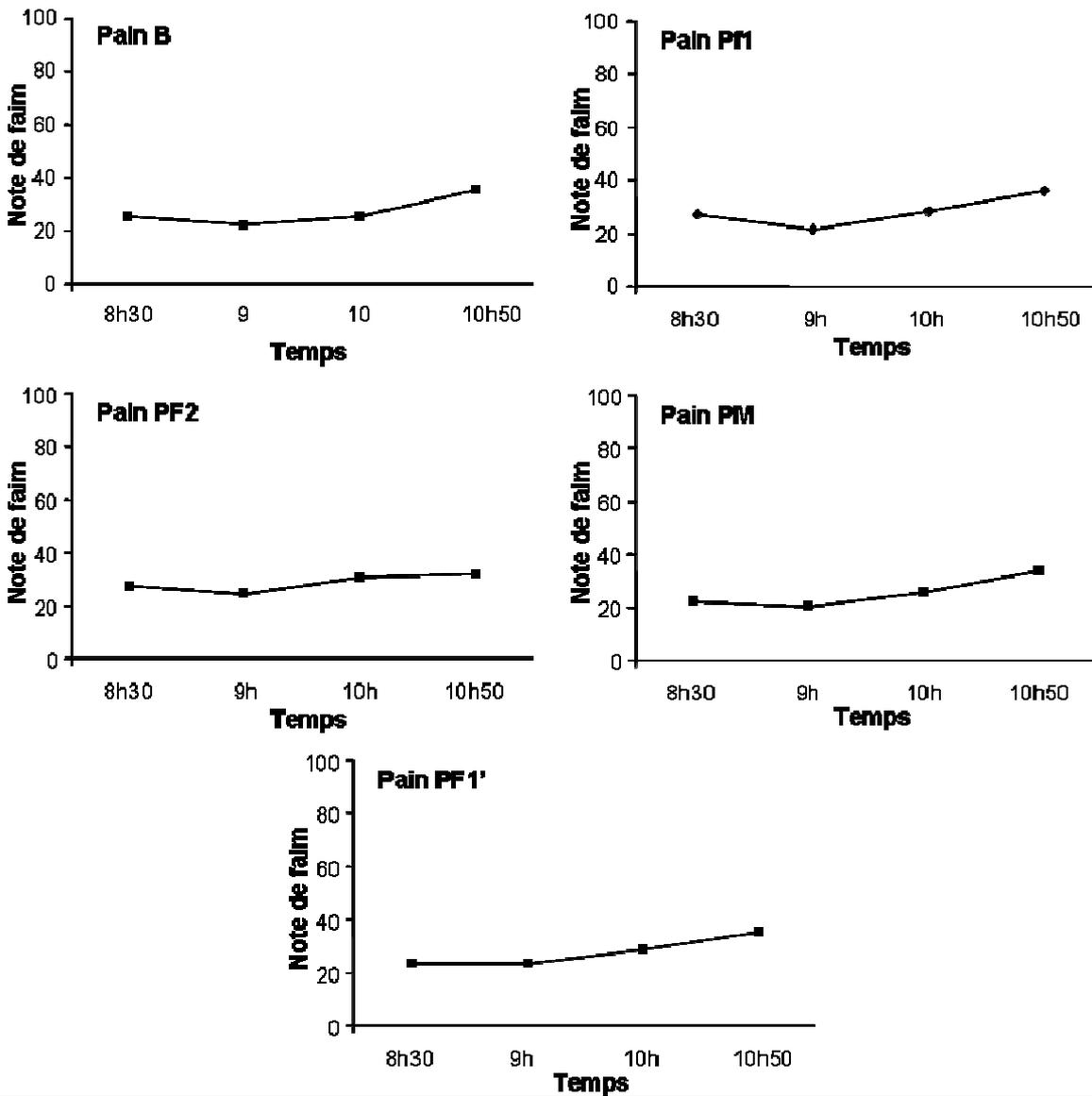
Une ANOVA faite sur la différence entre les notes de faim recueillies au début et à la fin des petits-déjeuners a montré un effet *pain* ($F=3.01$; $p<.05$). La diminution de la sensation de faim est plus importante pour les tartines PF1' (différence=-36.60 ; $\sigma=3.16$) et PM (différence=-35.65 ; $\sigma=3.16$) que pour les tartines B (différence=-28.38 ; $\sigma=3.16$) et les tartines PF2 (différence=-23.25 ; $\sigma=3.16$), les tartines PF1 étant intermédiaires (différence=-30.34 ; $\sigma=3.16$).

Effet des différentes tartines sur l'évolution de la sensation de faim au cours de la matinée

L'évolution de la sensation de faim après le petit-déjeuner et au cours de la matinée a été modélisée en utilisant un modèle linéaire mixte avec l'effet *pain* comme effet fixe et les effets *moment de l'évaluation* et *sujet* comme effets aléatoires. En ce qui concerne la partie aléatoire, nous avons recherché une structure de corrélation adaptée pour rendre compte des éventuelles corrélations entre les mesures effectuées à différents temps pour un participant donné. Nous avons choisi la structure de corrélation de type *compound symmetry* (CS) conduisant au critère d'Akaike (AIC) le plus faible (5305.4). Ces analyses statistiques ont été effectuées avec la procédure MIXED du logiciel SAS. L'analyse de la variance marginale n'a pas montré d'effet *pain* significatif ($F=1.71$; $p>.05$). En revanche, cette analyse a mis en évidence un effet *moment de l'évaluation* ($F=40.04$; $p<.001$) à la fois pour le terme linéaire et pour le terme quadratique (*moment de l'évaluation*moment de l'évaluation*) ($F=16.21$;

$p < .001$). Comme on pouvait s'y attendre la faim réaugmente au fil de la matinée mais cette remontée apparaît plus lente pour le pain PF2 que pour les autres pains (Figure 24).

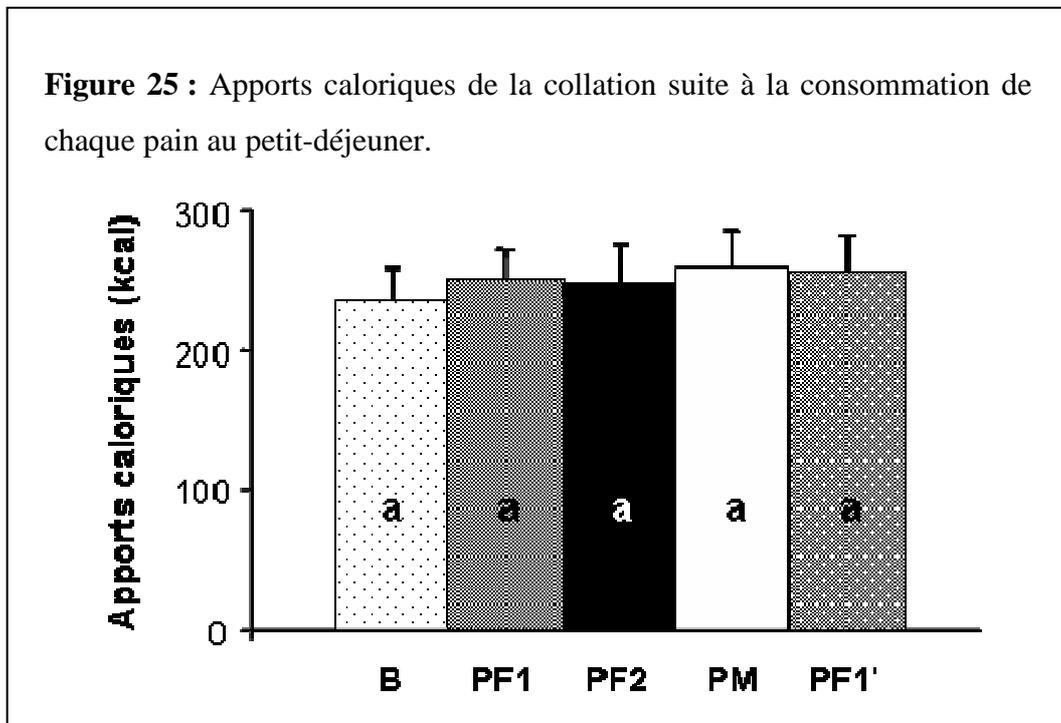
Figure 24 : Evolution de la sensation de faim suite à la consommation d'un petit-déjeuner composé de chaque type de pain (B, PF1, PF2, PM, PF1').



Prise alimentaire lors de la collation

Les apports caloriques consommés au cours de la collation sont présentés dans la Figure 25. Ces apports ont été déterminés par l'analyse des toasts consommés à l'aide du logiciel Bilnut puis ont été soumis à une ANOVA avec le facteur *pain* comme facteur fixe et le facteur *sujet* comme facteur aléatoire.

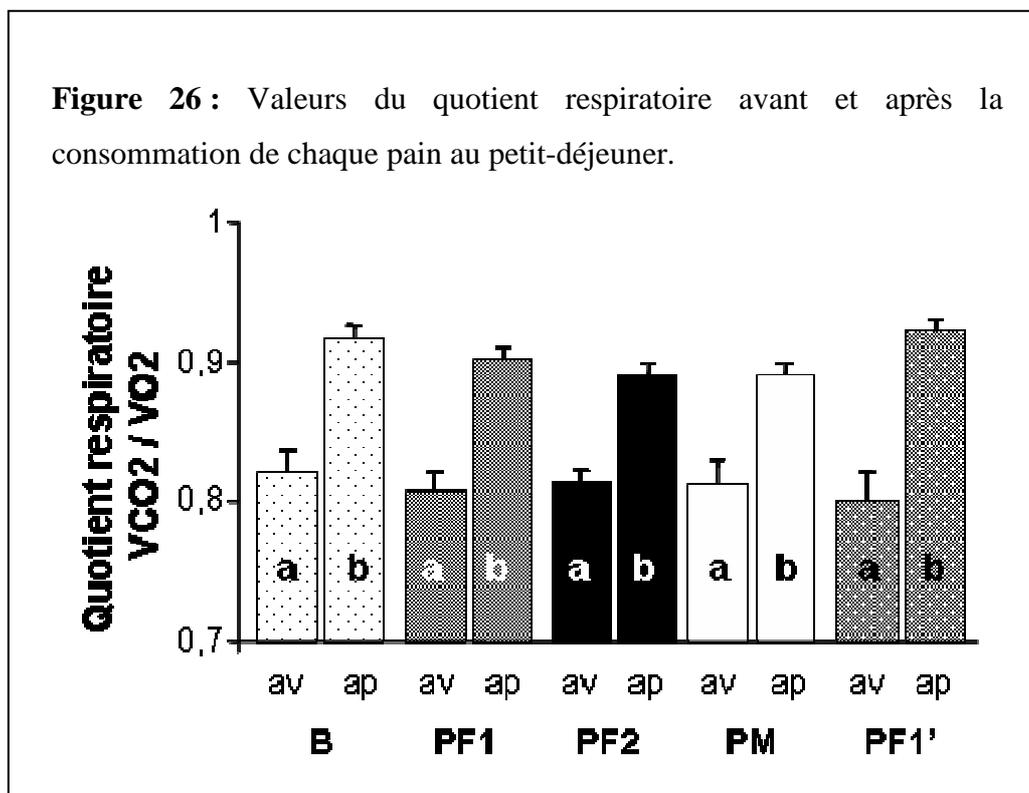
Cette ANOVA n'a pas permis de mettre en évidence d'effet *pain* ($F=0.14$; $p>.05$). D'après la comparaison multiple des moyennes, la prise calorique est la même quel que soit le pain consommé lors du petit déjeuner.



Effet sur l'état métabolique

La Figure 26 montre les valeurs du QR juste avant le petit-déjeuner et à 11 heures pour chaque condition. Ces valeurs ont été soumises à une ANOVA avec les facteurs *pain* et *moment de mesure* en facteurs fixes et le facteur *sujet* en aléatoire. Cette ANOVA n'a pas permis de mettre en évidence d'effet *pain* ($F=0.44$; $p>.05$) ni d'interaction *pain*moment de mesure* ($F=1.02$; $p>.05$). Cependant, le facteur *moment de mesure* ($F=96.58$; $p<.001$) apparaît significatif. Il apparaît que le quotient respiratoire est passé d'une valeur plus proche de 0,7 ($M=0.81$; $\sigma=0.01$) avant le petit-déjeuner à une valeur plus proche de 1 ($M=0.90$; $\sigma=0.01$) à la fin de la matinée. Ces résultats indiquent qu'à jeun, les participants oxydaient majoritairement des lipides. En effet, une valeur du QR proche de 0.7 indique une activité de néoglucogenèse permettant la biosynthèse de glucides dans le foie à partir de précurseur non glucidiques, dans un but de maintien de la glycémie à une valeur proche de 1 g.L⁻¹. En revanche, à la fin de la matinée, les participants oxydaient majoritairement des glucides, suite à la consommation d'un petit-déjeuner, composé en grande partie de glucides. Cependant, le type de pain consommé n'a pas influencé ces variations de QR.

Figure 26 : Valeurs du quotient respiratoire avant et après la consommation de chaque pain au petit-déjeuner.



Effet sur le système de récompense

Evaluation de l'appréciation de quatre odeurs alimentaires (liking)

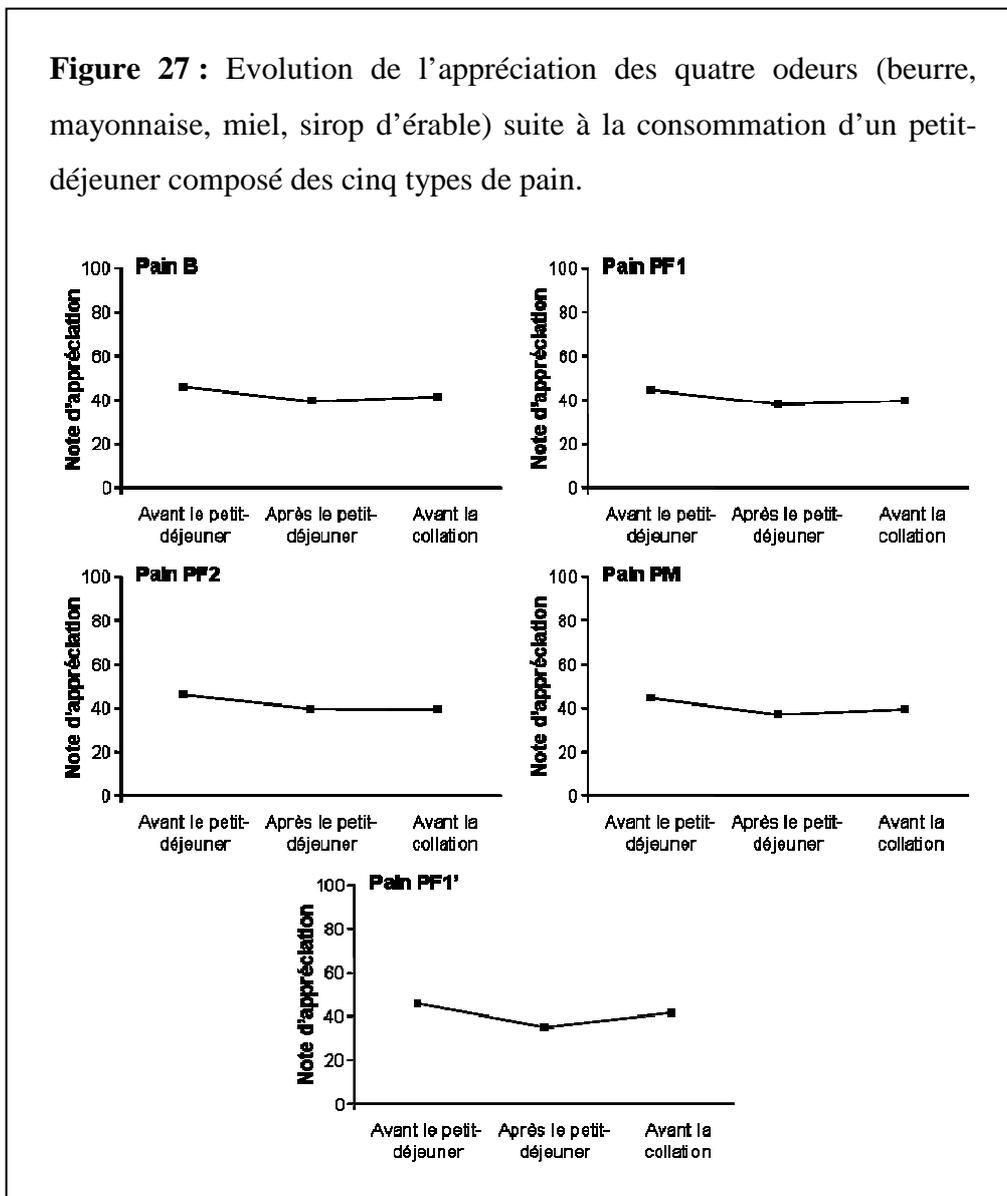
L'évolution de l'appréciation des quatre odeurs alimentaires (*liking*) est présentée dans la Figure 27. Ces notes d'appréciation ont été soumises à une ANOVA avec les facteurs *pain*, *odeur* et *moment de l'évaluation* en facteurs fixes et le facteur *sujet* en aléatoire. Cette ANOVA n'a pas permis de mettre en évidence d'effet *pain* ($F=0.26$; $p>.05$) ni d'interaction *pain*moment de l'évaluation* ($F=1.55$; $p>.05$). Un effet *odeur* ($F=17.36$; $p<.001$), un effet *moment de l'évaluation* ($F=25.69$; $p<.001$) et un effet *odeur*moment de l'évaluation* ($F=4.53$; $p<.001$) sont observés. D'après la comparaison multiple des moyennes, les notes d'appréciation ont diminué après le petit-déjeuner (avant petit-déjeuner: $M= 45.3$; $\sigma=0.49$; après : $M=37.7$; $\sigma=0.49$) puis ont réaugmenté au fil de la matinée sans pour autant retrouver le niveau avant le petit-déjeuner ($M=40.2$; $\sigma=0.49$).

La moyenne des notes d'appréciation de ces quatre odeurs alimentaires a permis d'observer que les odeurs de beurre et de miel (respectivement $M=49.2$; $\sigma=0.82$ et $M=49.2$; $\sigma=0.82$) ont

été préférées à l'odeur de sirop d'érable ($M=42.8$; $\sigma=0.82$) qui elle-même a été préférée à l'odeur de mayonnaise ($M=23.2$; $\sigma=0.82$).

En ce qui concerne l'évolution de l'appréciation des odeurs au cours de la matinée, deux patterns différents ont été observés. Tout d'abord, en ce qui concerne le sirop d'érable, le beurre et le miel, l'appréciation diminue suite à la consommation du petit-déjeuner et reste ensuite au même niveau jusqu'à la fin de la matinée. En ce qui concerne la mayonnaise, l'appréciation diminue suite à la consommation du petit-déjeuner puis réaugmente au cours du reste de la matinée pour réatteindre un niveau d'appréciation similaire au niveau initial.

Figure 27 : Evolution de l'appréciation des quatre odeurs (beurre, mayonnaise, miel, sirop d'érable) suite à la consommation d'un petit-déjeuner composé des cinq types de pain.



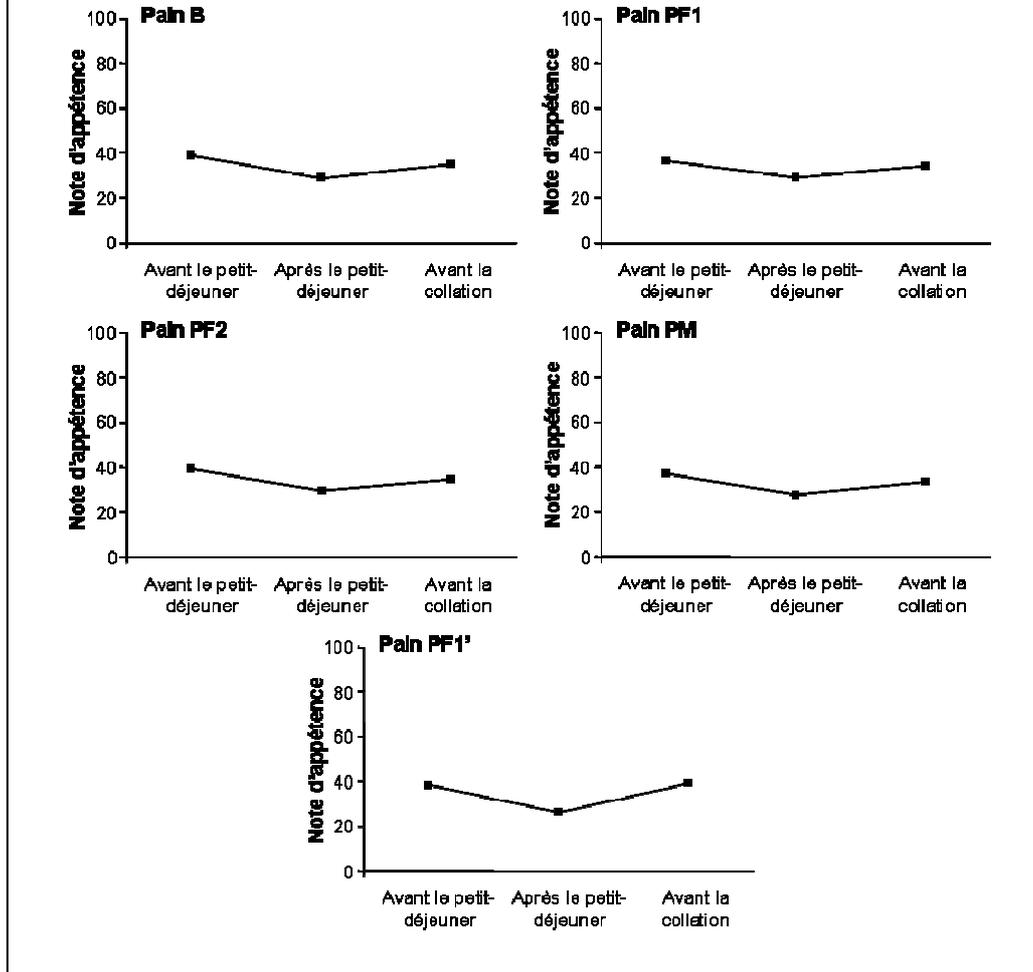
Evaluation de l'appétence de six aliments (wanting)

L'évolution de l'appétence pour les six aliments présentés sous forme de photos (*wanting*) est présentée dans la Figure 28. Ces notes d'appréciation ont été soumises à une ANOVA avec les facteurs *pain*, *aliment* et *moment de l'évaluation* en facteurs fixes et le facteur *sujet* en aléatoire. Cette ANOVA a permis de mettre en évidence un effet *aliment* ($F=18.83$; $p<.001$), un effet *moment de l'évaluation* ($F=15.01$; $p<.001$), une interaction *pain*moment de l'évaluation* ($F=2.88$; $p<.05$) et une interaction *aliment*moment de l'évaluation* mais pas d'effet *pain* ($F=0.65$; $p>.05$). D'après la comparaison multiple des moyennes, les notes d'appétence ont diminué après le petit-déjeuner (avant petit-déjeuner: $M=38.2$; $\sigma=0.45$; après : $M=35.3$; $\sigma=0.45$) puis ont réaugmenté au fil de la matinée ($M=28.2$; $\sigma=0.45$). L'interaction *pain*moment de l'évaluation* vient du fait que pour les tartines PF1 et PF1', les notes d'appétence à la fin de la matinée sont redevenues équivalentes aux notes avant le petit-déjeuner, alors que pour les autres tartines les notes d'appétence à la fin de la matinée restent inférieures aux notes avant petit-déjeuner.

En ce qui concerne l'effet *aliment*, le yaourt et la pomme étaient plus appétissants (respectivement $M=48.2$; $\sigma=0.63$ et $M=47.9$; $\sigma=0.63$) que l'œuf et les corn-flakes (respectivement $M=30.7$; $\sigma=0.63$ et $M=30.2$; $\sigma=0.63$) qui eux-mêmes ont été notés comme plus appétissants que le jambon ($M=25.4$; $\sigma=0.63$). Le riz a été jugé comme l'aliment le moins appétant de tous ($M=20.9$; $\sigma=0.63$).

En ce qui concerne l'évolution de l'appétence au cours de la matinée, trois patterns différents ont été observés. D'une part, l'appétence pour le jambon, l'œuf, le riz et le yaourt diminue suite à la consommation du petit-déjeuner et réaugmente significativement durant la matinée sans pour autant atteindre le niveau initial. D'autre part, l'appétence pour les corn-flakes diminue suite à la consommation du petit-déjeuner et ne réaugmente pas au fil de la matinée, restant inférieure à la valeur initiale. Enfin, l'appétence pour la pomme diminue également suite à l'ingestion du petit-déjeuner, et réaugmente au fil de la matinée pour atteindre, à la fin de la matinée, un niveau d'appétence similaire à celui d'avant le petit-déjeuner.

Figure 28 : Evolution de l'appétence pour six aliments (corn-flakes, jambon, œuf, pomme, riz, yaourt) suite à la consommation d'un petit-déjeuner composé des cinq types de pain.



c- Discussion

Cette étude a permis d'observer l'effet de la consommation de quatre pains, deux pains présentant une teneur faible en fibres (2-4%) et deux pains présentant une teneur élevée en fibres (10-12%) au petit-déjeuner sur la satiété à travers la mesure de la sensation subjective de faim et des apports caloriques lors d'une collation proposée trois heures plus tard, sur le rassasiement sensoriel spécifique, l'état métabolique des participants et les composantes du système de récompense, à savoir l'appréciation et l'appétence.

Contrairement à ce que nous attendions, l'ingestion de pains riches en fibres au petit-déjeuner n'a pas entraîné une diminution de la faim plus importante suite à ce petit-déjeuner par

rapport à la consommation des pains pauvres fibres et n'a pas diminué les apports caloriques lors d'une collation prise trois heures après ce petit-déjeuner. Seule l'ingestion du pain PF2 au petit-déjeuner a été accompagnée d'une réaugmentation de faim légèrement plus lente au cours de la matinée que l'ingestion des autres pains. Une première hypothèse pour expliquer ce résultat est que les petits-déjeuners présentaient des teneurs en macronutriments différentes d'un pain à l'autre, en particulier entre les petits-déjeuners à base de pains pauvres en fibres et ceux à base de pains riches en fibres. Ceci a pu masquer l'effet de la teneur en fibres sur la satiété. Au début de l'étude, nous avons fait le choix de présenter des petits-déjeuners isocaloriques aux participants. Or, équilibrer les petits-déjeuners à la fois d'un point de vue isocaloriques et d'un point de vue des macronutriments imposait de proposer aux participants des tartines relativement « improbables » (avec des couches très épaisses de confiture). Afin de vérifier l'existence ou non d'un effet des macronutriments, nous avons néanmoins proposé un petit-déjeuner à base de pain riche en fibres mais à teneur en macronutriments équivalente aux petits-déjeuners à base de pains pauvres en fibres. Aucune différence n'a été observée entre les conditions PF1 et PF1' sur la satiété induite ni sur la prise alimentaire subséquente. De plus, la comparaison de PF1' avec PM et B n'a pas permis de mettre en évidence de différence entre les pains aussi bien au niveau de la diminution de la sensation de faim consécutive à la consommation du petit-déjeuner, l'évolution de la faim à la suite de la matinée qu'au niveau des apports caloriques lors de cette collation. Ce résultat confirme que la teneur en fibres n'a pas influencé le pouvoir satiétogène des petits-déjeuners, même lorsque ces derniers présentaient des compositions en macronutriments similaires.

Dans la littérature, si un certain nombre d'auteurs ont montré l'effet de la teneur en fibres sur la satiété et la prise alimentaire subséquente (Grimes et Gordon, 1978 ; Levine et al., 1989, Porikos et Hagamen, 1986 ; Chow et al., 2007 ; Lyly et al., 2009), d'autres auteurs n'ont, comme nous, observé aucun effet (Bryson et al. 1979 ; Burley et al., 1987 ; Hlebowicz et al., 2007). Une explication possible de la divergence de ces résultats pourrait être l'écart entre la teneur en fibres des aliments expérimentaux et des aliments contrôles. En effet, il est possible qu'un effet satiétogène des fibres ne soit observé que lorsqu'elles sont présentes en grandes quantités dans l'aliment. En accord avec cette hypothèse, Levine et al. (1989) ont montré que l'ingestion de céréales contenant 35 et 39% de fibres diminuait effectivement la prise alimentaire par rapport à des céréales ne contenant pas de fibres. En revanche, cet auteur n'a pas observé une réduction de la prise alimentaire après l'ingestion de céréales contenant 11 et 18% de fibres (voir figure 1, page 49). Dans notre cas, les teneurs en fibres du pain étaient de

10 à 12%. Il est donc possible qu'un enrichissement en fibres de l'ordre de 10 à 12% dans le pain ne soit pas suffisant pour augmenter le pouvoir satiétogène de ce pain, ou tout du moins, pour révéler cet effet satiétogène à l'occasion d'une seule exposition. A ce stade, il convient de rappeler que l'objectif du projet était de formuler un pain enrichi en fibres mais qui reste acceptable pour le consommateur et qu'il n'était donc pas possible de proposer des pains présentant des teneurs beaucoup plus élevées en fibres. Cette hypothèse n'est que partiellement confirmée par une analyse précise des données de la littérature. En effet, le Tableau 9 présente les quantités de fibres ingérées dans des conditions pauvres en fibres et dans des conditions riches en fibres pour un certain nombre d'études comparables à la nôtre (une seule exposition, comparaison d'une condition riche *versus* pauvre en fibres sur la sensation de faim et/ou sur la prise alimentaire subséquente). Excepté pour l'étude de Levine et al. (1989), la différence de teneurs en fibres entre les aliments testés dans ces études était comparable, voire même plus faible que celle testée dans notre étude. Si trois de ces études n'ont effectivement pas mis en évidence d'effet satiétogène plus important suite à la consommation des aliments enrichis en fibres que des aliments pauvres en fibres, trois autres ont au contraire permis d'observer un tel effet. En parallèle de la teneur en fibres, il est possible que toutes les fibres n'aient pas le même pouvoir satiétogène. Ainsi, Willis et al. (2009) ont montré une diminution de la sensation de faim plus importante après la consommation de muffins enrichis en β -glucane d'orge, en son de maïs ou en amidon résistant qu'après la consommation de muffins enrichis en poly-dextrose.

Tableau 9 : Teneurs et quantité de fibres ingérées dans des études menées dans des conditions comparables (une seule exposition, comparaison d'aliments riches et pauvres en fibres).

| Etude | Aliment | Teneur (%) | Quantité (g) | Effet (faim/apports caloriques) |
|------------------------|--|-------------------------|-------------------------|------------------------------------|
| Bryson et al. 1987 | Pain blanc vs pain complet | 3 / 7.5 | Ad lib | - |
| Porikos & Hagamen 1986 | Sandwiches au rosbif | NA | 5.2 / 0.2 | + |
| Burley et al. 1987 | Céréales du petit-déjeuner | NA | 12 / 3 | - |
| Levine et al. 1989 | Céréales | 0 / 11 / 18 | 0 / 6.3 / 10.3 | - |
| | | 35 / 39 | 20 / 22 | + |
| Chow et al. 2007 | Barres nutritionnelles au petit-déjeuner | 8.5 / 11.4 | 6.4 / 9.1 | + |
| Lyly et al. 2009 | Jus de fruits | 0 / 1.95 / 2.6 | 0 / 7.8 / 10.5 | + (aire sous la courbe) |
| Nous | Pains | 2.4 / 2.4 / 10.4 / 12.8 | 3.4 / 3.4 / 15.8 / 19.6 | - |

En ce qui concerne les autres paramètres mesurés, d'une part notre étude n'a pas mis en évidence d'effet de la teneur en fibres sur le rassasiement sensoriel spécifique. De façon similaire, Manthey et Vickers (1996) avaient testé l'influence de l'enrichissement en fibres d'aliments (soupe, muffin) sur l'évolution de l'appréciation pour ces aliments entre le début et la fin de leur ingestion. Les auteurs n'avaient observé aucun effet de la teneur en fibres sur le rassasiement sensoriel spécifique sachant que pour un aliment donné, les versions pauvres et riches en fibres ne présentaient aucune différence de texture et de flaveur. Dans une autre étude, Johnson et Vickers (1991) ont sélectionné quatre produits de la panification à savoir du pain blanc perçu par les participants comme étant pauvre en fibres et pauvre en calories, un croissant pauvre en fibre et riche en calories, du pain complet riche en fibres et pauvre en calories et du muffin au son et au raisin riche en fibres et en calories. Les participants ont participé à quatre séances. A chaque séance, ils devaient consommer 400 kcal de chaque aliment (300 kcal apportés par l'aliment et 100 kcal par du beurre) et noter leur appréciation

au début et à la fin de l'ingestion. Les résultats ont montré un rassasiement sensoriel spécifique plus élevé pour les produits riches en fibres (pain complet et muffin) que pour les pains pauvres en fibres (baguette et croissant). Néanmoins, si les portions servies aux participants étaient équivalentes au niveau calorique, elles ne l'étaient pas d'un point de vue de la masse. Les participants ont eu tendance à consommer une portion plus importante dans le cas des pains riches en fibres (122 g pour le pain complet et 114 g pour le muffin) que dans le cas des pains pauvres en fibres (112 g pour le pain blanc et 71 g pour le croissant). Il est donc possible que la différence entre ces deux types de pains observée au niveau de la diminution du plaisir après ingestion soit davantage liée à des différences de masse ingérée qu'à la teneur en fibres.

D'autre part, nos résultats n'ont pas mis en évidence d'effet de la teneur en fibres sur l'état métabolique. De la même façon, Keogh et al. (2006) n'avaient pas observé de différence entre un petit-déjeuner composé de pain enrichi en fibres (issue d'une variété particulière d'orge) et un petit-déjeuner composé d'un pain contrôle (formulé avec de la farine de blé) sur la mesure du quotient respiratoire. Autrement dit, il semble que l'enrichissement de la ration en fibres n'ait pas d'effet sur le quotient respiratoire par rapport à une ration contrôle (pauvre en fibres). Il est néanmoins possible que la présence de confiture sur les tartines présentées aux participants au cours de notre étude ait masqué l'effet des fibres contenues dans le pain.

Enfin, comme on pouvait s'y attendre, les notes d'appréciation et d'appétence ont diminué après le petit-déjeuner puis ont réaugmenté au fil de la matinée. Cependant, aucun effet différentiel de la teneur en fibres sur les composantes d'appréciation et d'appétence du système de récompense n'a été observé. Plusieurs auteurs ont montré que l'état physiologique (repus, satiété) influençait de façon différentielle l'appréciation et l'appétence (Finlayson et al. 2006, Plailly et al. *soumis*). Dans notre cas, l'ingestion de pains enrichis en fibres n'ayant pas entraîné une diminution de la faim plus importante que l'ingestion de pains pauvres en fibres, il est assez cohérent de ne pas observer d'effet de la teneur en fibres sur les composantes d'appréciation et d'appétence. Par ailleurs, le choix de stimuli différents entre les mesures d'appréciation et d'appétence a été inspiré par une étude précédente. Néanmoins, il aurait peut-être été plus judicieux d'avoir les mêmes stimuli, voire de tester l'appréciation et l'appétence pour les pains eux-mêmes.

En parallèle de ces résultats, notre étude a permis de montrer que dans l'ensemble, les quatre pains testés ont été bien appréciés des consommateurs (notes d'appréciation à la première

bouchée supérieure à 50 sur une échelle allant de 0 à 100). De façon attendue, la baguette était le pain le plus apprécié des participants mais les résultats ont également montré que l'un des pains enrichis en fibres, PF2, était plus apprécié que le pain de mie classique. Bien que les achats de pain complet ne représentent que 30% (d'après une étude de marché réalisée en 2009 par la Fédération des entreprises de boulangerie-pâtisserie françaises), les participants ne semblent pas rejeter le « goût » de pains enrichis en fibres.

d- Conclusion

En conclusion, nous n'avons pas observé d'effet satiétogène différent entre un pain riche en fibres (10-12%) et un pain pauvre en fibres (2-4%). Cette étude n'a pas non plus permis de mettre en évidence d'effet de la teneur en fibres sur le quotient respiratoire ou sur l'évolution de l'appréciation et de l'appétence. Néanmoins, un résultat encourageant vient du fait que le pain plus enrichi en fibres a été particulièrement apprécié des consommateurs, plus encore qu'un pain de mie classique.

Pour la suite de ce travail de thèse, il a été décidé de conserver ces modèles de pains (il nous a semblé difficile d'ajouter davantage de fibres dans les pains proposés sans altérer leur appréciation) mais d'exposer les participants plusieurs jours de suite à ces pains.

**VALIDATION DE L'EFFET
SATIETOGENE D'UN PAIN RICHE
EN FIBRES : ETUDE A LONG-
TERME.**

VI. VALIDATION DE L'EFFET SATIETOGENE D'UN PAIN RICHE EN FIBRES : ETUDE A LONG TERME

L'objectif de cette deuxième partie du travail de thèse était de remplacer le petit-déjeuner habituel de participants par une quantité isocalorique de pain enrichi en fibres et ce sur plusieurs jours, afin d'étudier l'effet de cette consommation répétée de pain enrichi en fibres sur la satiété et les prises alimentaires subséquentes. Le choix du petit-déjeuner a été motivé par les travaux De Castro (2007). Ce dernier a en effet montré qu'une consommation importante de glucides durant la matinée entraînait une diminution des prises alimentaires durant le reste de la journée.

Un premier résultat attendu de cette étude était que la consommation d'un petit-déjeuner enrichi en fibres diminuerait la sensation de faim au cours de la matinée et les prises alimentaires subséquentes. De plus, l'objectif de cette étude était aussi de regarder dans quelle mesure un tel effet se maintiendrait au fil des jours, c'est à dire tout au long de la consommation répétée du pain enrichi en fibres. En effet, plusieurs études ont montré que la consommation répétée – monotone – d'un aliment induit une diminution de plaisir pour cet aliment (Rolls et de Waal, 1985 ; Schutz et Pilgrim, 1958 ; Siegel et Pilgrim, 1958). En conséquence, nous pourrions nous attendre à ce que la consommation répétée d'un pain enrichi en fibres entraîne une diminution du plaisir associé à la consommation de ce pain – au petit-déjeuner, cette diminution de plaisir pouvant à son tour avoir des effets adverses sur le comportement alimentaire. Une telle question est à l'évidence d'intérêt pour qui souhaite promouvoir un meilleur contrôle de son poids ou un régime amaigrissant à travers la consommation d'un aliment « fonctionnel » tel qu'un aliment enrichi en fibres.

Cette partie du travail de thèse comprend deux études, la première avec le pain PF1 et la seconde avec le pain PF2. Il est à noter que le pain PF1 correspondait à un pain de mie blanc, relativement familier pour des consommateurs français mais peu associé aux fibres. A l'inverse, le pain PF2 correspondait plutôt à un pain aux céréales, moins familier au sein de la population française mais plus spontanément associé à la présence de fibres. La réplication de cette étude avec les deux pains permettra donc d'évaluer dans quelle mesure l'effet des fibres sur la sensation de faim et les prises alimentaires subséquentes était dépendant ou non du type de pain proposé aux participants.

Deux groupes de participants (un groupe par type de pain) ont participé à deux périodes d'exposition de deux semaines chacune. Dans la condition expérimentale, les participants ont consommé un petit-déjeuner exclusivement constitué de pain enrichi en fibres (PF1 ou PF2 selon les groupes). Pour chaque participant, la quantité de pain consommée correspondait à un apport calorique équivalent à celui habituellement consommé par le participant lors de son petit-déjeuner. Dans la condition contrôle, les participants consommaient une toute petite portion de pain enrichi en fibres (10 g) puis complétaient leur petit-déjeuner avec les aliments et les boissons de leur choix. La quantité de fibres apportée par ces 10 g de pain étant négligeable, cette condition a permis de contrôler l'effet possible d'une exposition répétée aux caractéristiques sensorielles du pain indépendamment de l'effet des fibres. Pour chaque condition, l'appréciation du pain, le niveau de faim et les prises alimentaires ont été mesurés et enregistrés à intervalles réguliers.

A l'occasion de l'étude menée sur le pain PF2, deux méthodes permettant d'évaluer les prises alimentaires journalières ont été comparées, à savoir la méthode des relevés alimentaires consistant à demander aux participants de noter et de peser les aliments et boissons consommés sur un carnet et une méthode consistant à demander aux participants de venir prendre un repas standard au laboratoire au début et à la fin de chaque phase exposition. L'avantage de cette deuxième méthode est qu'elle permet d'avoir un contrôle plus précis de la nature et de la quantité des aliments mangés au cours de la journée (les pesées étant réalisées par l'expérimentateur), le menu étant le même aux différents points de mesure. L'inconvénient de cette deuxième méthode est que l'environnement des repas pris en laboratoire s'écarte de conditions naturelles de consommation.

a- Matériel et méthode

Sujets

Deux groupes de 16 et 22 participants adultes normopondéraux et non restreints ont été respectivement recrutés pour le groupe exposé au pain PF1 et le pour groupe exposé au pain PF2. Pour participer, les candidats devaient être âgés de 20 à 45 ans, avoir un IMC compris entre 19 et 25 kg/m² et avoir l'habitude de prendre un petit-déjeuner incluant au moins un aliment solide tous les jours. Les candidats devaient également obtenir un score de restriction inférieur à 9 au *Three Factors Eating Questionnaire* (Stunkard & Messick, 1985). Enfin, les candidats ne devaient pas présenter d'allergie pour les produits de l'étude, ne devaient pas être

sous traitement médical et ne devaient pas fumer plus de cinq cigarettes par jour. Les femmes enceintes ou allaitant un bébé n'étaient pas non plus retenues. Chaque candidat a été rencontré au cours d'un entretien individuel afin de vérifier qu'il satisfaisait aux critères d'inclusion. C'est à l'occasion de cet entretien qu'il remplissait la version française du *Three Factors Eating Questionnaire* permettant de calculer un score de restriction. Ce questionnaire a été développé par Stunkard et Messick, 1985.

Pour le pain PF1, le panel comprenait 8 hommes et 8 femmes âgées de 20 à 37 ans (26 ± 1 ans), avec un IMC variant de 19,1 à 24,9 kg/m² ($22,8 \pm 0,5$ kg/m²) et ayant un score de restriction variant de 2 à 8 ($4,62 \pm 0,5$). Pour le pain PF2, le panel comprenait 11 hommes et 11 femmes âgées de 23 à 45 ans (30 ± 1 ans), avec un IMC variant de 19,7 à 26,1 kg/m² ($22,2 \pm 0,4$ kg/m²) et ayant un score de restriction variant de 1 à 8 (moyenne $4,4 \pm 0,4$).

Les participants n'étaient pas informés de l'objectif réel de l'étude. Ils étaient invités à participer à l'étude sous un « faux prétexte » : nous les informions que l'étude portait sur l'évaluation d'un pain lorsque ce pain est consommé pendant un mois. Les participants étaient indemnisés pour un mois de participation.

Le protocole de l'étude a été validé par Comité de Protection de la Personne Est I (n° 2009/11) et par l'AFSSAPS (n°2008-A01101-54). En accord avec ce dispositif, les participants ont reçu une fiche d'information sur l'étude (description des tests et des produits) et signé un formulaire de consentement éclairé.

Produit

L'étude a été réalisée avec le pain PF1 et le pain PF2, ces deux pains étant fournis par la société CERELAB® Gustalis (Longvic, France). La composition du pain PF1 était la suivante (pour 100 g de pain consommé) : 37,7 g de glucides (dont 10,4 g de fibres), 3,2 g de lipides et 8,0 g de protéines. L'apport calorique était de 211,4 kcal pour 100 g. La composition du pain PF2 était la suivante (pour 100 g de pain consommé) : 36,8 g de glucides (dont 12,8 g de fibres), 3,8 g de lipides et 11,8 g protéines. L'apport calorique est de 228,8 kcal pour 100 g.

Déroulement

Relevés alimentaires

Avant de commencer l'étude, les participants devaient relever la nature et la quantité de tous les aliments et boissons consommés pendant trois petits-déjeuners habituels pris à leur domicile. Une balance alimentaire Clatronic (KW204, Kempen, Allemagne, précision $\pm 1g$) leur était prêtée pour effectuer ces pesées. Ces relevés étaient ensuite analysés à l'aide du logiciel Bilnut (S.C.D.A. Nutrisoft, Cerelles, France) afin de déterminer l'Apport Calorique Moyen (ACM) consommé par chaque participant lors d'un petit-déjeuner.

Phases d'exposition

L'étude était composée de deux périodes d'exposition, de quinze jours chacune. Dans la condition contrôle, les participants consommaient 10 g de pain expérimental à chaque petit-déjeuner puis complétaient ce dernier avec leurs aliments et boissons habituels. Dans la condition expérimentale, les participants consommaient à chaque petit-déjeuner l'équivalent en pain de leur ACM. Durant cette phase, les participants devaient consommer le pain nature, sans ajout de beurre ou de confiture. En plus du pain, ils n'étaient autorisés qu'à consommer uniquement leur boisson habituelle, par exemple du café (cette boisson n'était pas prise en compte dans le calcul de l'ACM). La moitié des participants commençait par la condition contrôle et poursuivait par la condition expérimentale. L'autre moitié des participants procédait dans l'ordre inverse.

Les participants recevaient un sachet de pain surgelé pour chaque jour d'exposition. Ils avaient pour consigne de décongeler le pain en le plaçant la veille du jour de consommation à température ambiante. Les petits-déjeuners étaient pris à domicile et les participants avaient pour consigne de ne pas partager leurs rations avec les autres membres de leur famille.

A chaque petit-déjeuner, les participants devaient évaluer le plaisir que leur procurait la consommation du pain à la première bouchée. Ils devaient également évaluer leur sensation de faim avant ce petit-déjeuner, juste après, à 10 heures et à midi. Après les petits-déjeuners du deuxième, sixième, dixième et quatorzième jour de chaque phase d'exposition, les participants devaient en plus évaluer leur appréciation et leur envie de consommer quinze aliments présentés sur une liste (jambon, emmental, yaourt nature, confiture, biscuit salé, riz blanc, pomme, céréales Corn-Flakes, cookies, tomates, miel, ketchup, lait, haricots vers). Ces différentes évaluations se faisaient sur des échelles visuelles analogiques de 100 mm bornées à chaque extrémité (« Extrêmement plaisant / extrêmement déplaisant », « Je n'ai pas faim du tout / j'ai extrêmement faim », « Pas envie du tout / Extrêmement envie »). Les participants

relevaient la nature et la quantité de tous les aliments et boissons consommés au cours de la journée lors du deuxième, sixième, dixième et quatorzième jour de chaque phase d'exposition.

Pour l'étude PF2, une deuxième méthode d'évaluation des prises alimentaires a consisté à mesurer les quantités consommées au cours de repas pris dans des conditions contrôlées. Pour cela, le premier et le dernier jour de chaque période d'exposition, les participants ont pris leur déjeuner (entre 11h45 et 12h15) et leur dîner (entre 18h45 et 19h10) au laboratoire. Avant l'étude, chaque participant a choisi un menu de déjeuner et un menu de dîner en choisissant parmi une liste d'aliments proposés, comprenant une entrée (des carottes râpées, du céleri, des concombres à la crème et de la rosette avec des cornichons), un plat de résistance (des lasagnes au bœuf, des tagliatelles au saumon, de la poêlée campagnarde (pomme de terre rissolées et bœuf), de la poêlée de légumes, du couscous et du hachis Parmentier) et un dessert (de la crème dessert au chocolat, du fromage blanc (avec du sucre ou de la confiture, à la convenance du participant), de la compote de pommes, du fromage Comté et des clémentines). Un participant recevait ensuite ces deux menus (celui du déjeuner et celui du dîner) à chacune de ses venues en laboratoire et nous mesurons les quantités consommées pour chaque plat. Les aliments étaient servis dans des saladiers de façon à permettre une consommation *ad libitum*.

Analyse des données

Les scores recueillis sur les échelles ont été transformés en notes allant de 0 (borne gauche) à 10 (borne droite). Les relevés de consommations effectués durant les phases d'exposition ont été analysés à l'aide du logiciel Bilnut (S.C.D.A. Nutrisoft, Cerelles, France) afin de déterminer les apports caloriques journaliers totaux et par repas (petit-déjeuner, déjeuner, dîner) ainsi que les apports journaliers glucidiques, lipidiques et protéiques.

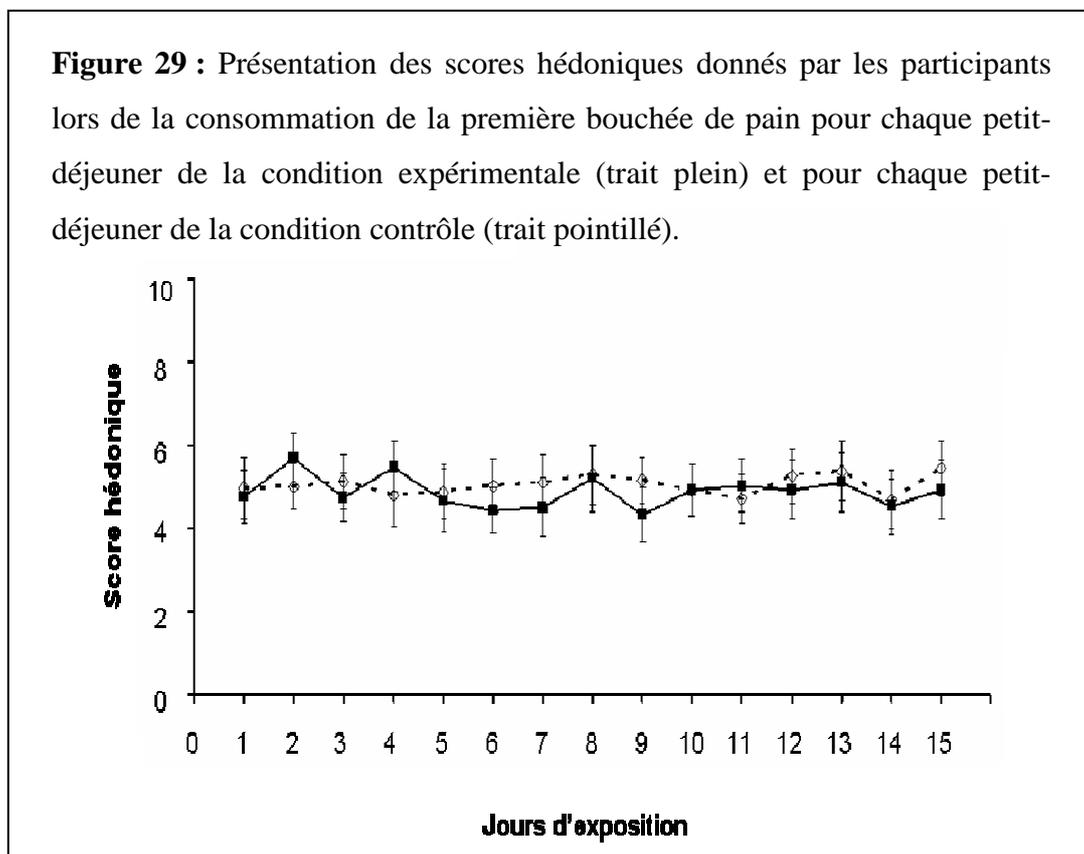
L'évolution des différents paramètres (score de plaisir, scores de faim, apports caloriques, glucidiques, lipidiques et protéiques, scores d'appréciation et d'envie de consommer quinze aliments) durant l'exposition a été modélisée en utilisant un modèle linéaire mixte avec l'effet *condition* comme effet fixe, et les effets *temps* et *sujet* comme effets aléatoires. En ce qui concerne la partie aléatoire, nous avons recherché une structure de corrélation adaptée pour rendre compte des éventuelles corrélations entre les mesures effectuées à différents temps pour un participant donné. Nous avons choisi la structure de corrélation de type *compound symmetry* (cs) conduisant au critère d'Akaike (AIC) le plus faible pour la majorité des jeux de

données. Seuls les facteurs linéaires ont été conservés dans les modèles finaux (et présentés ci-dessous), les facteurs quadratiques ($temps^2$ et $temps^2 \times condition$) n'étant jamais significatifs. Ces analyses statistiques ont été effectuées avec la procédure MIXED du logiciel SAS (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA).

b- Résultats pour le pain PF1

Effets sur l'appréciation hédonique du pain

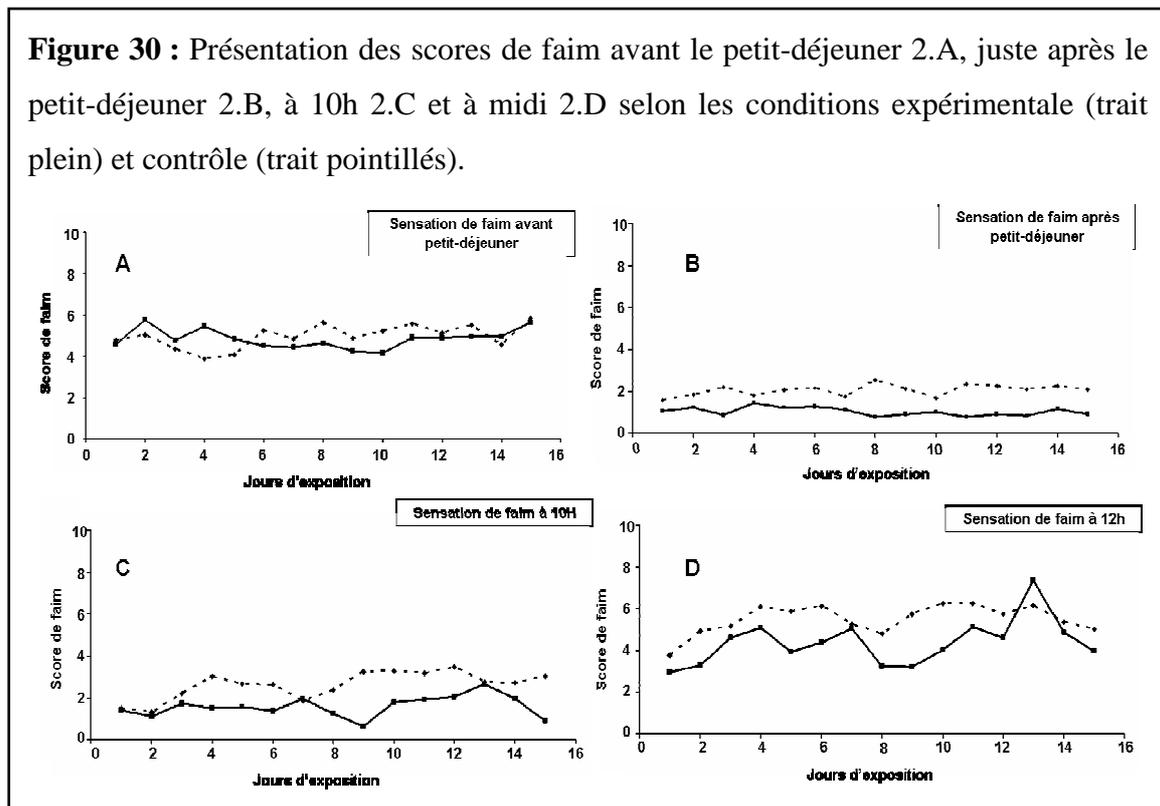
La Figure 29 présente l'évolution des scores de plaisir donnés par les participants lors de la consommation de la première bouchée de pain à chaque petit-déjeuner en fonction de la condition d'exposition. L'ANOVA marginale obtenue avec le modèle linéaire généralisé n'a pas mis en évidence d'effet *condition* ($F=1.81$; $p>.05$), *temps* ($F=0.00$; $p>.05$) ou $temps \times condition$ ($F=1.05$; $p>.05$) significatif. En moyenne, le plaisir procuré par la première bouchée de pain au petit-déjeuner n'est pas différent entre la condition expérimentale ($M=5.1$; $\sigma=2.6$) et la condition contrôle ($M=4.9$; $\sigma=2.6$). Par ailleurs, l'appréciation hédonique de ce pain n'évolue pas au cours des deux semaines d'exposition, même dans la condition expérimentale.



Effets sur la sensation de faim

La figure 30 présente l'évolution des scores de faim donnés par les participants juste avant chaque petit-déjeuner, juste après le petit-déjeuner, à 10 heures et à midi, pour chaque condition d'exposition. D'après l'ANOVA marginale obtenue avec le modèle linéaire généralisé, le facteur *condition* n'est pas associé à un effet significatif sur les scores de faim mesurés avant les petits-déjeuners ($F=0.29$; $p>.05$). En revanche, ce facteur est associé à un effet très significatif sur les scores de faim mesurés juste après les petits-déjeuners ($F=69.67$; $p<.001$), à 10 heures ($F=49.90$; $p<.001$) et à midi ($F=14.77$; $p<.01$). Ceci est illustré sur la Figure 31 qui représente la moyenne des scores de faim à chaque temps de mesure pour chaque condition. Comme le montre cette figure, la consommation exclusive de PF1 au cours d'un petit-déjeuner entraîne une diminution de la sensation de faim plus importante qu'un petit-déjeuner composé de plusieurs aliments ainsi qu'une réaugmentation plus lente de la sensation de faim au cours de la matinée.

Par ailleurs, un effet *temps* significatif est observé sur les scores de faim mesurés à 10 heures ($F=11.27$; $p<.01$) et à midi ($F=6.08$; $p<.05$) mais pas sur les scores de faim mesurés juste avant ($F=3.53$; $p>.05$) ou juste après ($F=0.07$; $p>.05$) les petits déjeuners. L'interaction *condition* \times *temps* n'est jamais significative.



Effets sur la prise énergétique au cours de la journée

Les apports caloriques ont été mesurés quatre fois au cours de chaque période d'exposition (J2, J6, J10 et J14). Nous nous sommes donc intéressés dans un premier temps à l'évolution des apports caloriques totaux et par repas, pour chaque condition d'exposition (Figure 32). Le tableau 1 présente les résultats de l'Analyse de la Variance marginale (ANOVA) obtenus avec le modèle linéaire généralisé sur ces apports.

Tableau 10 : Résultats de l'analyse de variance marginale (ANOVA) obtenu avec le modèle linéaire généralisé sur les apports caloriques au cours de la journée.

| | Condition | | Temps | | Temps*Condition | |
|-----------------------|-----------|----------|-------|----------|-----------------|----------|
| | F | <i>p</i> | F | <i>p</i> | F | <i>p</i> |
| Totaux | 127.39 | <.001 | 4.31 | <.05 | 1.81 | ns |
| Petit-déjeuner | 0.01 | ns | 0.07 | ns | 0.22 | ns |
| Déjeuner | 2.79 | ns | 4.49 | <.05 | 0.71 | ns |
| Dîner | 5.57 | <.05 | 0.84 | ns | 1.05 | ns |

En ce qui concerne les apports journaliers totaux, l'ANOVA marginale a révélé un effet *condition* significatif (Tableau 1). En moyenne, les apports journaliers totaux sont plus faibles dans la condition expérimentale ($M=1668$ kcal ; $\sigma=510$) que dans la condition contrôle ($M=1845$ kcal ; $\sigma=719$). Par ailleurs, comme le montre la figure 4.A, ces apports diminuent au fur et à mesure de l'exposition (effet *temps* significatif). Il semble que cette diminution soit plus importante pour la condition expérimentale que pour la condition contrôle mais l'ANOVA n'a pas révélé d'interaction significative entre l'effet *condition* et l'effet *temps*.

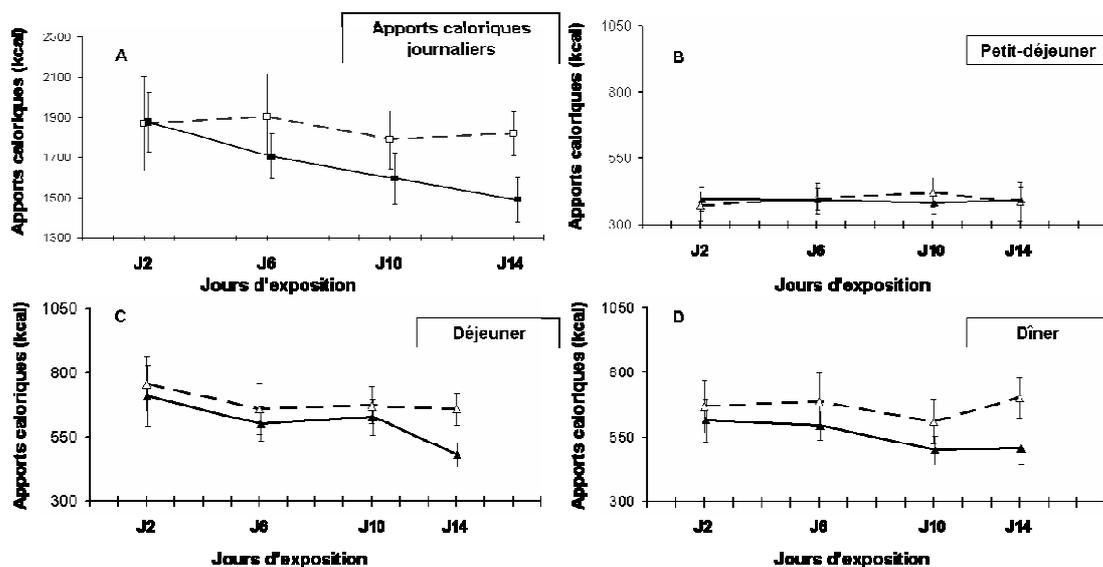
En ce qui concerne les apports au petit-déjeuner, l'ANOVA marginale n'a pas mis en évidence d'effet *condition*, *temps* ou *temps*×*condition* significatif (Tableau 10). Les apports caloriques des petits-déjeuners de la condition expérimentale ($M=392$ kcal ; $\sigma=173$) ne sont pas différents des apports caloriques des petits-déjeuners de la condition contrôle ($M=394$ kcal ; $\sigma=241$). Par ailleurs, ces apports n'évoluent pas au cours du temps. Autrement dit, ces

résultats permettent de valider que l'apport de calories lors des petits-déjeuners expérimentaux était équivalent à l'apport de calories lors des petits-déjeuners contrôles, durant lesquels les participants complétaient les 10 g de pain imposé avec leurs aliments et boissons habituels (donc déjeuners proches d'un petit-déjeuner habituel).

En ce qui concerne les deux autres repas de la journée, un effet *condition* significatif est observé pour le dîner mais pas pour le déjeuner. Les apports caloriques étaient plus faibles lors des dîners de la condition expérimentale ($M=554$ kcal ; $\sigma=258$) que lors des dîners de la condition contrôle ($M=667$ kcal ; $\sigma=370$). Un effet *temps* significatif est observé pour le déjeuner, avec une diminution des apports caloriques au fil du temps pour ce repas. L'interaction *temps* \times *condition* n'est jamais significative.

L'ensemble de ces résultats indique donc que lorsque les participants remplacent leur petit-déjeuner habituel par une consommation exclusive de pain, et ce pendant plusieurs jours d'affilée, ils réduisent leurs apports caloriques journaliers essentiellement en réduisant les apports caloriques du dîner.

Figure 32 : Evolution des apports caloriques durant l'exposition, pour chaque condition (exposition expérimentale en trait plein, exposition contrôle en trait pointillés). La figure 4.A présente les apports totaux sur l'ensemble de chaque journée de mesure tandis que les figures 4.B, 4.C et 4.D présentent le détail de ces apports par repas (petit-déjeuner, déjeuner, dîner).



Effets sur les apports en macronutriments

En parallèle de l'analyse des apports caloriques, nous avons également étudié l'évolution des apports glucidiques, lipidiques et protéiques consommés à chaque repas, pour chaque condition d'exposition. Le tableau 11 présente les résultats de l'Analyse de la Variance marginale (ANOVA) obtenus avec le modèle linéaire généralisé sur ces apports.

Tableau 11 : Résultats de l'analyse de variance marginale (ANOVA) obtenus avec le modèle linéaire généralisé sur les trois macronutriments.

| | | condition | | Temps | | interaction | |
|-----------------|-----------------------|--------------|-----------------|-------|----------------|-------------|------|
| | | F | p | F | p | F | p |
| GLUCIDES | Total | 0.24 | 0.63 | 0.90 | 0.34 | 0.54 | 0.46 |
| | Petit-déjeuner | 10.93 | <.05 | 0.57 | 0.45 | 1.12 | 0.29 |
| | Déjeuner | 3.88 | 0.07 | 0.09 | 0.67 | 0.02 | 0.89 |
| | Dîner | 0.54 | 0.47 | 0.25 | 0.62 | 0.07 | 0.79 |
| LIPIDES | Total | 8.51 | <.05 | 2.91 | 0.09 | 0.57 | 0.45 |
| | Petit-déjeuner | 55.39 | <.001 | 0.24 | 0.63 | 0.52 | 0.47 |
| | Déjeuner | 4.89 | <.05 | 5.07 | <.05 | 0.11 | 0.74 |
| | Dîner | 2.47 | 0.14 | 0.00 | 0.97 | 0.06 | 0.80 |
| PROTIDES | Total | 0.20 | 0.66 | 0.45 | 0.50 | 0.42 | 0.52 |
| | Petit-déjeuner | 11.86 | <.05 | 0.46 | 0.50 | 0.01 | 0.91 |
| | Déjeuner | 0.02 | 0.90 | 0.13 | 0.71 | 3.23 | 0.07 |
| | Dîner | 0.84 | 0.38 | 2.40 | 0.12 | 0.58 | 0.45 |

Un effet *condition* significatif est observé sur les apports glucidiques, lipidiques et protéiques du *petit-déjeuner* (Tableau 11). Comme on pouvait s'y attendre, les participants ont

consommé plus de glucides lors des petits-déjeuners expérimentaux, composés exclusivement de pain ($M=71.90$ g ; $\sigma=32.94$), que lors des petits-déjeuners contrôles ($M=59.40$ g ; $\sigma=36.99$). De même, le pain étant riche en protéines, les apports protéiques au petit-déjeuner sont plus importants dans la condition expérimentale ($M=13.90$ g ; $\sigma=6.57$) que dans la condition contrôle ($M=11.35$ g ; $\sigma=8.16$). À l'inverse, les apports lipidiques sont plus faibles dans la condition expérimentale ($M=9.71$ g ; $\sigma=6.06$) que dans la condition contrôle ($M=5.06$ g ; $\sigma=2.84$). En effet, dans la condition expérimentale, les participants avaient pour instruction de consommer le pain nature (donc sans beurre). De plus, il est possible que les participants dans la condition *peu monotone* aient complété leurs petits-déjeuners par des aliments riches en lipides, tels que des viennoiseries.

En ce qui concerne le déjeuner, il est intéressant de noter un effet *condition* significatif sur les apports glucidiques et lipidiques mais pas sur les apports protéiques. À l'inverse des résultats du petit-déjeuner, les participants ont consommé moins de glucides mais plus de lipides lors des déjeuners de la condition expérimentale ($M=58.08$ g ; $\sigma=36.63$) que de la condition contrôle ($M=70.55$ g ; $\sigma=48.03$) et plus de lipides dans la condition expérimentale ($M=22.15$ g ; $\sigma=16.31$) que dans la condition contrôle ($M=9.71$; $\sigma=6.06$). Aucun effet *condition* significatif n'est observé sur les apports glucidiques, lipidiques et protéiques du dîner. Ces résultats laissent penser que les participants compenseraient un apport important en glucides et faible en lipides lors du petit-déjeuner en diminuant les apports glucidiques et en augmentant les apports lipidiques lors du repas suivant (du déjeuner). En revanche, aucune compensation n'est observée pour l'apport protéique : un apport plus élevé au petit-déjeuner n'induit pas d'apport plus faible au déjeuner.

Un effet *temps* significatif est observé sur l'apport lipidique du déjeuner. Ce résultat est à rapprocher de l'effet *temps* significatif observé sur les apports caloriques du déjeuner (Figure 4). Il semble donc que les participants aient diminué leurs apports lipidiques au fur et à mesure des déjeuners, ce qui se traduirait logiquement par une diminution des valeurs d'apports caloriques.

Aucun effet significatif *condition*, *temps* ou *condition* \times *temps* n'est observé sur les apports glucidiques, lipidiques et protéiques du dîner (Tableau 11).

Effets sur les scores d'appréciation et d'envie de consommer quinze aliments

En plus des relevés alimentaires effectués à J2, J6, J10 et J14 de chaque période d'exposition, les participants devaient également évaluer leur appréciation et leur envie de consommer quinze aliments présentés sur une liste de mots. Le Tableau 12 présente les résultats de l'Analyse de la Variance marginale (ANOVA) obtenus avec le modèle linéaire généralisé sur les scores obtenus pour chaque aliment. D'après l'examen de ce tableau, il ne semble pas que ces scores suivent un pattern de réponse particulièrement marquant. On peut juste noter un effet *condition* significatif sur les scores d'appréciation de deux aliments sucrés et particulièrement associés au petit-déjeuner, à savoir le miel et la confiture de fraise (Figure 33.A). Les participants ont donné des scores d'appréciation plus faible pour ces deux aliments dans la condition expérimentale comparativement à la condition contrôle. Il semblerait donc que la consommation d'un petit-déjeuner très riche en glucides se traduise par une diminution de l'appréciation pour des aliments glucidiques. Par ailleurs, on peut noter un effet *temps* significatif sur l'envie de consommer du yaourt et du lait se traduisant par une diminution de l'envie de consommer ces produits au fil du temps (Figure 33.B).

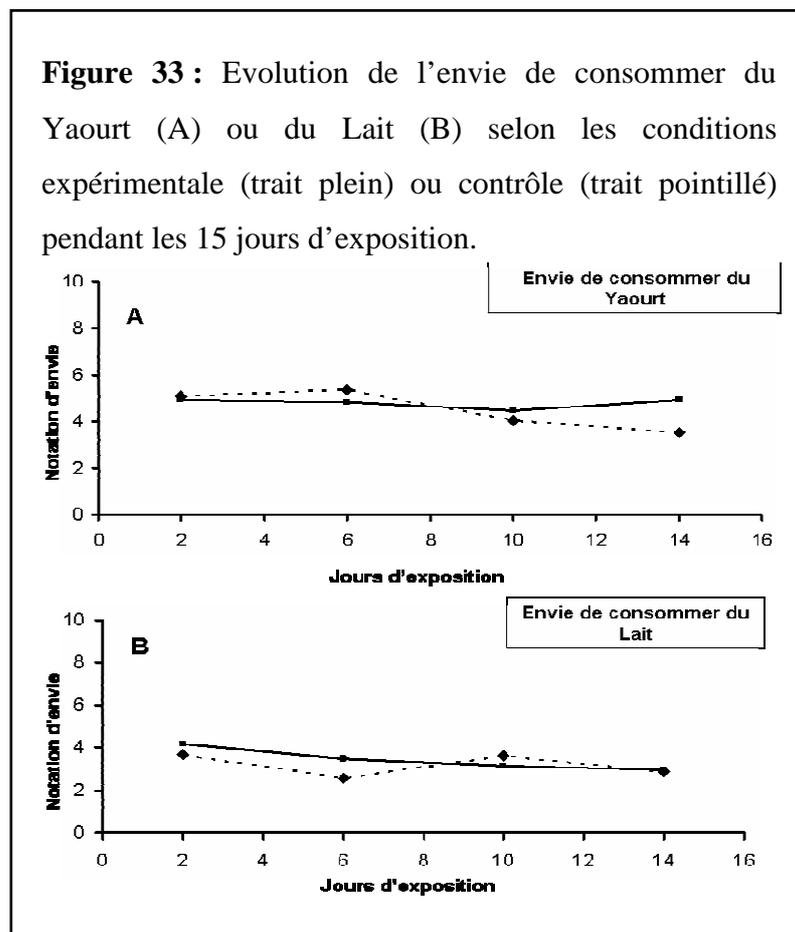


Tableau 12 : Résultats de l'Analyse de la Variance marginale (ANOVA) obtenus avec le modèle linéaire généralisé sur les scores d'appréciation et de consommer les 15 aliments.

| | Appréciation | | | | | | Envie | | | | | |
|----------------------------|--------------|----------------|-------|------|-------------|-------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|------|
| | Condition | | Temps | | Interaction | | Condition | | Temps | | Interaction | |
| | F | p | F | p | F | p | F | p | F | p | F | p |
| Confiture de fraise | 3.83 | 0.07 | 0.06 | 0.81 | 5.09 | 0.02 | 1.08 | 0.31 | 0.00 | 0.98 | 0.16 | 0.68 |
| Cookies | 1.02 | 0.33 | 4.31 | 0.04 | 0.03 | 0.86 | 0.06 | 0.82 | 0.80 | 0.37 | 0.64 | 0.42 |
| Corn Flakes | 0.00 | 0.99 | 0.25 | 0.61 | 0.69 | 0.41 | 1.22 | 0.29 | 0.24 | 0.63 | 1.86 | 0.18 |
| Emmental | 0.44 | 0.51 | 0.59 | 0.44 | 0.12 | 0.73 | 0.14 | 0.71 | 0.81 | 0.37 | 0.24 | 0.62 |
| Haricots Verts | 0.00 | 0.97 | 0.04 | 0.84 | 0.01 | 0.93 | 2.98 | 0.10 | 0.07 | 0.79 | 0.01 | 0.91 |
| Jambon | 2.52 | 0.13 | 0.28 | 0.60 | 1.16 | 0.28 | 0.18 | 0.68 | 0.16 | 0.69 | 0.14 | 0.71 |
| Ketchup | 0.01 | 0.91 | 0.27 | 0.60 | 0.27 | 0.60 | 0.03 | 0.86 | 0.05 | 0.82 | 0.02 | 0.89 |
| Lait | 2.15 | 0.16 | 3.57 | 0.06 | 0.20 | 0.66 | 1.09 | 0.31 | 4.23 | 0.04 | 0.90 | 0.34 |
| Miel | 7.78 | <.01 | 0.17 | 0.68 | 0.63 | 0.43 | 0.02 | 0.90 | 0.25 | 0.62 | 0.21 | 0.65 |
| Pomme Golden | 0.00 | 0.99 | 0.31 | 0.58 | 2.05 | 0.15 | 0.94 | 0.35 | 6.65 | <.05 | 0.42 | 0.52 |
| Riz blanc | 0.32 | 0.58 | 0.91 | 0.34 | 0.11 | 0.74 | 2.57 | 0.13 | 0.09 | 0.77 | 0.00 | 0.98 |
| Tomates | 0.60 | 0.45 | 1.55 | 0.22 | 0.56 | 0.45 | 9.35 | <.05 | 1.45 | 0.23 | 0.96 | 0.33 |
| Tuc | 1.31 | 0.27 | 1.19 | 0.28 | 0.72 | 0.39 | 0.01 | 0.91 | 0.83 | 0.36 | 0.38 | 0.54 |
| Yaourt Nature | 0.01 | 0.93 | 0.18 | 0.67 | 0.74 | 0.39 | 0.90 | 0.36 | 3.82 | <.05 | 3.10 | 0.08 |

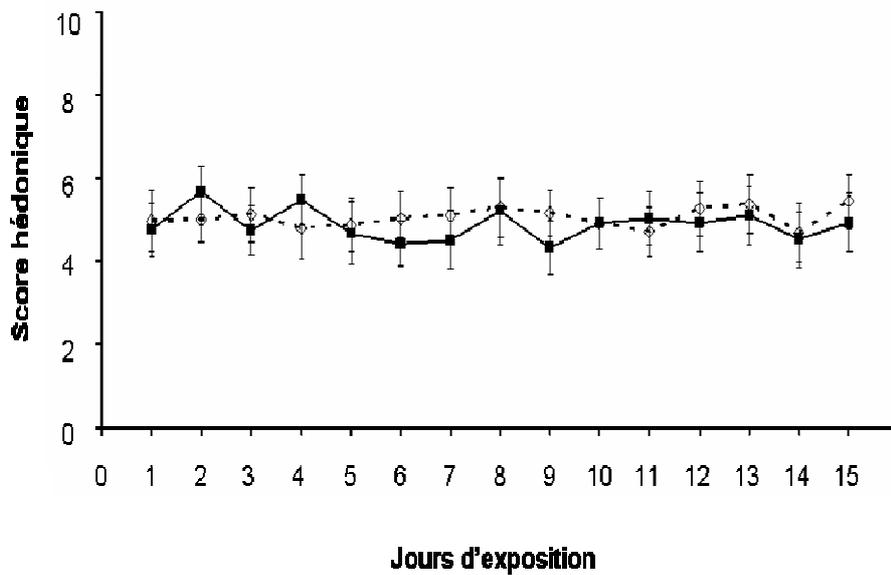
c- Résultats Pour le pain PF2

Effets sur l'appréciation hédonique du pain

La Figure 34 représente l'évolution des scores de plaisir donnés par les participants lors de la consommation de la première bouchée de pain à chaque petit-déjeuner en fonction de la condition d'exposition. L'ANOVA marginale obtenue avec le modèle linéaire généralisé a permis de mettre en évidence d'effet *condition* significatif ($F=56.82$; $p<.001$) mais pas d'effet *temps* ($F=1.19$; $p>.05$) ni *temps* \times *condition* ($F=3.58$; $p>.05$) significatif. En moyenne, le plaisir procuré par la première bouchée de pain au petit-déjeuner est différent entre la

condition expérimentale ($M=5.1$; $\sigma=2.7$) et la condition contrôle ($M=6.0$; $\sigma=2.7$). Par ailleurs, l'appréciation hédonique de ce pain n'évolue pas au cours des deux semaines d'exposition, même dans la condition expérimentale.

Figure 34 : Présentation des scores hédoniques donnés par les participants lors de la consommation de la première bouchée de pain pour chaque petit-déjeuner de la condition expérimentale (trait plein) et pour chaque petit-déjeuner de la condition contrôle (trait pointillé).



Effets sur la sensation de faim

La Figure 35 présente l'évolution des scores de faim donnés par les participants juste avant chaque petit-déjeuner, juste après, à 10 heures et à midi, pour chaque condition d'exposition. D'après l'ANOVA marginale obtenue avec le modèle linéaire généralisé, le facteur *condition* n'est pas associé à un effet significatif sur les scores de faim mesurés avant les petits-déjeuners ($F=0.29$; $p>.05$). En revanche, ce facteur est associé à un effet très significatif sur les scores de faim mesurés juste après les petits-déjeuners ($F=69.7$; $p<.001$), à 10 heures ($F=49.9$; $p<.001$) et à midi ($F=14.8$; $p<.01$). Ceci est illustré sur la figure 36 qui présente la moyenne des scores de faim à chaque temps de mesure pour chaque condition. Comme le montre cette figure, la consommation exclusive de PF2 au cours d'un petit-déjeuner entraîne une diminution de la sensation de faim plus importante qu'un petit-déjeuner composé de

plusieurs aliments. La réaugmentation de la sensation de faim est également plus lente au cours de la matinée.

Par ailleurs, un effet *temps* significatif est observé sur les scores de faim mesurés à 10 heures ($F=11.27$; $p<.01$) et à midi ($F=6.08$; $p<.05$) mais pas sur les scores de faim mesurés juste avant ($F=3.53$; $p>.05$) ou juste après ($F=0.07$; $p>.05$) les petits déjeuners. L'interaction *condition*×*temps* n'est jamais significative.

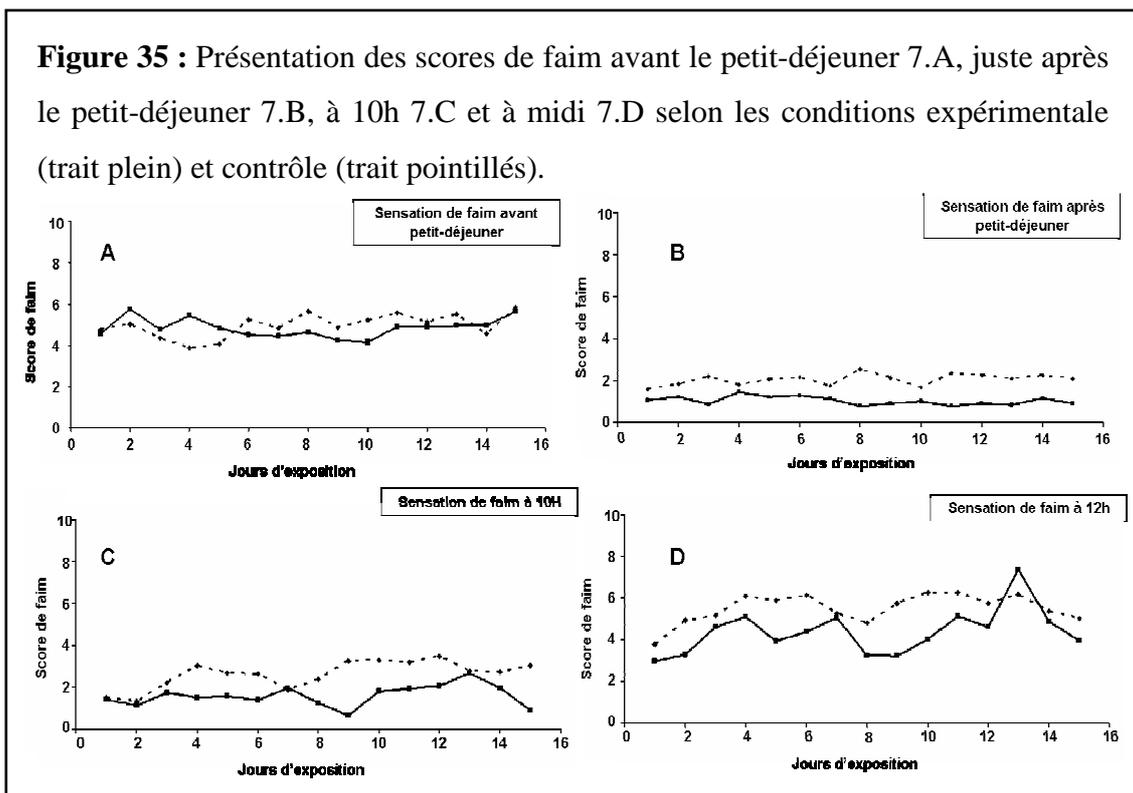
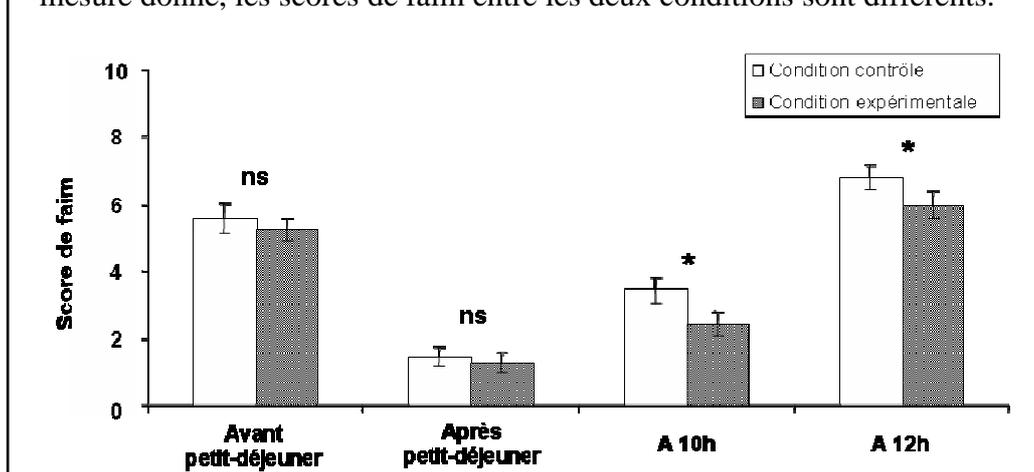


Figure 36 : Présentation des scores de faim donnés par les participants juste avant les petits-déjeuners, juste après, à 10 heures et à midi, pour chaque condition d'exposition. Une étoile indique que pour un temps de mesure donné, les scores de faim entre les deux conditions sont différents.



Effets sur la prise énergétique au cours de la journée mesurée à domicile par les sujets

Les apports caloriques ont été mesurés quatre fois au cours de chaque période d'exposition (J2, J6, J10 et J14). Nous nous sommes donc intéressés dans un premier temps à l'évolution des apports caloriques totaux et par repas, pour chaque condition d'exposition (Figure 37). Le tableau 4 présente les résultats de l'Analyse de la Variance marginale (ANOVA) obtenus avec le modèle linéaire généralisé sur ces apports.

Tableau 13 : Résultats de l'analyse de variance marginale (ANOVA) obtenu avec le modèle linéaire généralisé sur les apports caloriques relevés au cours de la journée.

| | Condition | | Temps | | Condition*Temps | |
|-----------------------|-----------|------|-------|----|-----------------|----|
| | F | p | F | p | F | p |
| Totaux | 10.69 | <.05 | 0.44 | ns | 2.22 | ns |
| Petit-déjeuner | 3.68 | ns | 1.01 | ns | 0.23 | Ns |
| Déjeuner | 0.34 | ns | 0.07 | ns | 0.34 | ns |
| Dîner | 3.02 | ns | 0.02 | ns | 1.46 | ns |

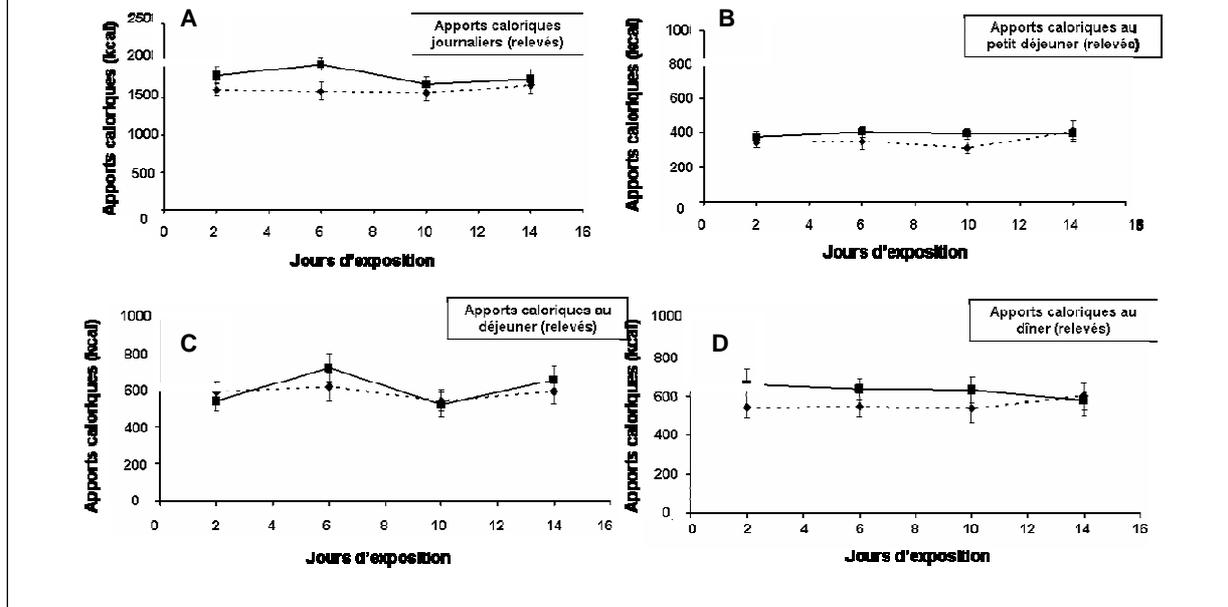
En ce qui concerne les apports journaliers totaux, l'ANOVA marginale a révélé un effet *condition* significatif (Tableau 13). En moyenne, les apports journaliers totaux sont plus importants dans la condition expérimentale ($M=1786$ kcal ; $\sigma=522$) que dans la condition contrôle ($M=1609$ kcal ; $\sigma=518$). Par ailleurs, comme le montre la Figure 9.A, ces apports diminuent au fur et à mesure de l'exposition (effet *temps* significatif). Il semble que cette diminution soit plus importante pour la condition expérimentale que pour la condition contrôle mais l'ANOVA n'a pas révélé d'interaction significative entre l'effet *condition* et l'effet *temps*.

En ce qui concerne les apports au petit-déjeuner, l'ANOVA marginale n'a pas mis en évidence d'effet *condition*, *temps* ou *temps* \times *condition* significatif (Tableau 13). Les apports caloriques des petits-déjeuners expérimentaux ($M=393$ kcal ; $\sigma=148$) ne sont pas différents des apports caloriques des petits-déjeuners contrôles ($M=354$ kcal ; $\sigma=207$). Pas ailleurs, ces apports n'évoluent pas au cours du temps. Autrement dit, ces résultats permettent de valider que l'apport de calories lors des petits-déjeuners expérimentaux était équivalent à l'apport de calories lors des petits-déjeuners contrôles, durant lesquels les participants consommaient les 10 g de pain imposés et complétaient leur petit-déjeuner avec leurs aliments et boissons habituels.

En ce qui concerne les deux autres repas de la journée, aucun effet *condition* significatif n'est observé pour le dîner ni pour le déjeuner. Les apports caloriques n'étaient pas différents lors des dîners de la condition expérimentale ($M=628$ kcal ; $\sigma=338$) comparativement aux dîners de la condition contrôle ($M=556$ kcal ; $\sigma=298$). L'effet *temps* ainsi que l'interaction *temps* \times *condition* ne sont jamais significatifs.

L'ensemble de ces résultats indique que la consommation d'un petit-déjeuner rendu très monotone le matin ne modifie pas les apports caloriques des participants le reste de la journée.

Figure 37 : Evolution des apports caloriques durant l'exposition, pour chaque condition (condition expérimentale trait plein, condition contrôle en trait pointillés). La figure 37.A présente les apports totaux sur l'ensemble de chaque journée de mesure tandis que les figures 37.B, 37.C et 37.D présentent le détail de ces apports par repas (petit-déjeuner, déjeuner, dîner).



Effets sur la prise énergétique au cours de la journée mesurée au laboratoire

Les apports caloriques ont été mesurés deux fois au cours de chaque période d'exposition (J0, J15). Nous nous sommes donc intéressés dans un premier temps à l'évolution des apports caloriques totaux et par repas, pour chaque condition d'exposition (Figure 38). Le Tableau 14 présente les résultats de l'Analyse de la Variance marginale (ANOVA) obtenus avec le modèle linéaire généralisé sur ces apports.

Tableau 14 : Résultats de l'analyse de variance marginale (ANOVA) obtenu avec le modèle linéaire généralisé sur les apports caloriques au cours de la journée mesurés au laboratoire.

| | Condition | | Temps | | Condition*Temps | |
|-----------------------|-----------|----|-------|----|-----------------|----|
| | F | p | F | p | F | p |
| Totaux | 0.43 | ns | 1.92 | ns | 0.34 | ns |
| Petit-déjeuner | 0.04 | ns | 1.64 | ns | 0.04 | ns |
| Déjeuner | 1.56 | ns | 0.62 | ns | 0.91 | ns |
| Dîner | 0.03 | ns | 0.46 | ns | 0.34 | ns |

En ce qui concerne les apports journaliers totaux, l'ANOVA marginale n'a pas permis de révéler d'effet *condition* significatif (Tableau 14). En moyenne, les apports journaliers totaux ne sont pas différents entre la condition expérimentale ($M=2140$ kcal ; $\sigma=565$) et la condition contrôle ($M=2088$ kcal ; $\sigma=693$).

En ce qui concerne les apports au petit-déjeuner, l'ANOVA marginale n'a pas mis en évidence d'effet *condition*, *temps* ou *temps* \times *condition* significatif (Tableau 14). Les apports caloriques des petits-déjeuners expérimentaux ($M=412$ kcal ; $\sigma=166$) ne sont pas différents des apports caloriques des petits-déjeuners contrôles ($M=406$ kcal ; $\sigma=222$). Par ailleurs, ces apports n'évoluent pas au cours du temps.

En ce qui concerne les deux autres repas de la journée, aucun effet *condition* significatif n'est observé ni pour le déjeuner ni pour le dîner. L'effet *temps* ainsi que l'interaction *temps* \times *condition* ne sont jamais significatifs.

L'ensemble de ces résultats indique donc que lorsque les participants remplacent leur petit-déjeuner habituel par une consommation exclusive de pain, et ce pendant plusieurs jours consécutifs, les apports caloriques ont tendance à être plus importants.

Figure 38 : Evolution des apports caloriques durant l'exposition, pour chaque condition (condition expérimentale trait plein, condition contrôle en trait pointillés). La figure 38.A présente les apports totaux sur l'ensemble de chaque journée de mesure tandis que les figures 38.B, 38.C et 38.D présentent le détail de ces apports par repas (petit-déjeuner, déjeuner, dîner).

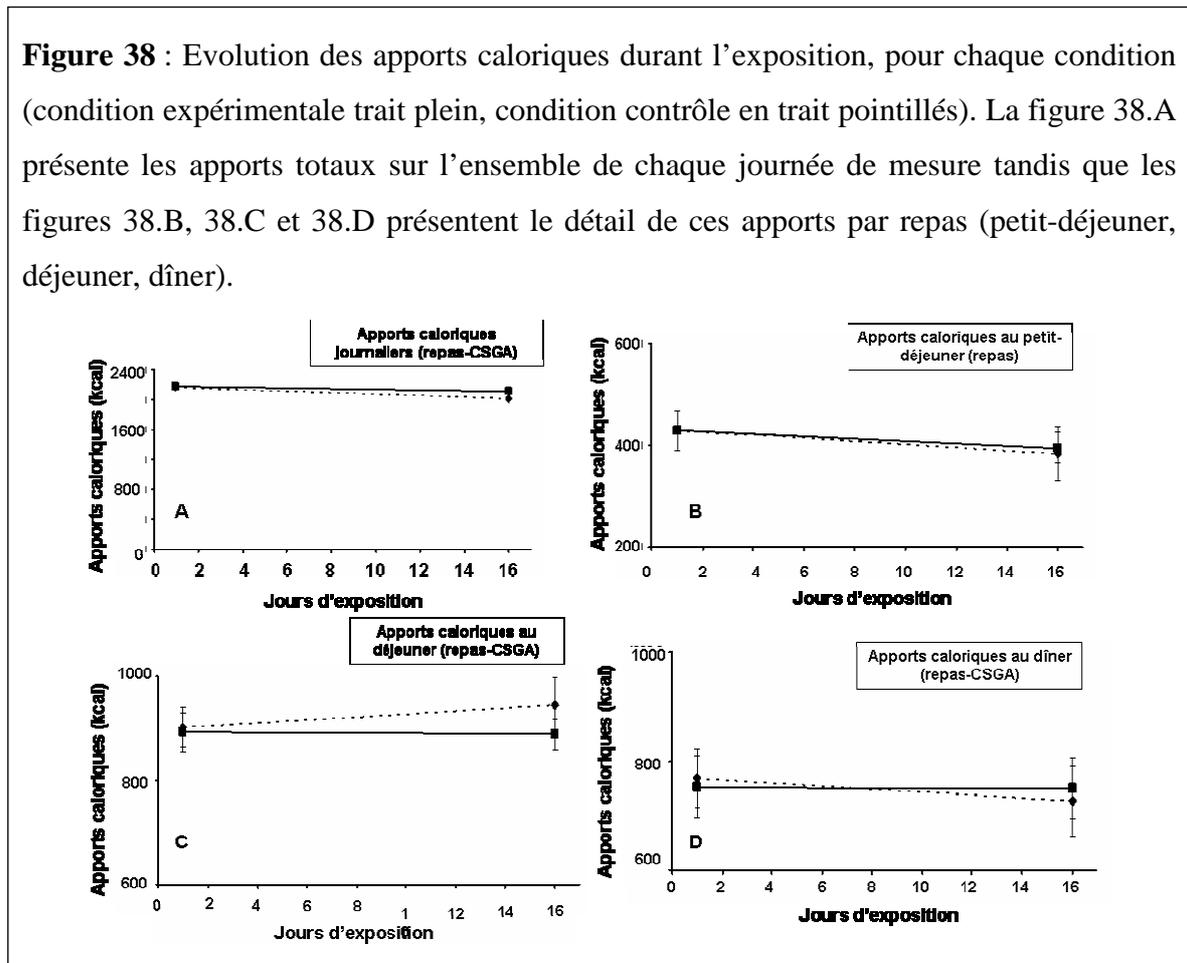


Tableau 15 : Résultats de l'analyse de variance marginale (ANOVA) obtenus avec le modèle linéaire généralisé sur les trois macronutriments.

| | | Condition | | Temps | | Condition*Temps | |
|-----------------|-----------------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | F | p | F | p | F | p |
| GLUCIDES | Total | 0.79 | 0.38 | 2.50 | 0.12 | 0.39 | 0.28 |
| | Petit-déjeuner | 0.00 | 0.96 | 0.62 | 0.44 | 0.00 | 0.96 |
| | Déjeuner | 0.84 | 0.37 | 0.32 | 0.57 | 1.18 | 0.28 |
| | Dîner | 0.62 | 0.44 | 2.60 | 0.11 | 1.90 | 0.17 |
| LIPIDES | Total | 0.92 | 0.35 | 0.77 | 0.38 | 0.24 | 0.63 |
| | Petit-déjeuner | 3.83 | 0.06 | 19.95 | <.001 | 3.83 | 0.05 |
| | Déjeuner | 2.46 | 0.13 | 0.04 | 0.85 | 0.24 | 0.62 |
| | Dîner | 0.93 | 0.34 | 0.79 | 0.38 | 0.95 | 0.33 |
| PROTIDES | Total | 5.41 | 0.03 | 1.20 | 0.28 | 5.86 | 0.02 |
| | Petit-déjeuner | 49.12 | <.001 | 33.32 | <.001 | 49.12 | <.001 |
| | Déjeuner | 0.55 | 0.46 | 1.12 | 0.29 | 1.47 | 0.23 |
| | Dîner | 0.21 | 0.65 | 0.22 | 0.64 | 0.46 | 0.50 |

Un effet *condition* significatif est observé sur les apports protéiques du *petit-déjeuner* (Tableau 15). Comme on pouvait s'y attendre, les participants ont consommé plus de protéines au petit-déjeuner dans la condition expérimentale ($M=15.1$ g; $\sigma=8.4$) que dans la condition contrôle ($M=9.7$ g; $\sigma=5.6$). Il n'y a pas d'effet *condition* significatif au niveau des apports lipidiques entre la condition expérimentale ($M=11.1$ g; $\sigma=8.0$) et la condition contrôle ($M=6.7$ g; $\sigma=3.2$). Au niveau des apports glucidiques, on peut remarquer qu'il n'y a pas

d'effet significatif entre la condition expérimentale ($M=65.7$ g; $\sigma=25.2$) et la condition contrôle ($M=65.4$ g; $\sigma=39.8$).

En ce qui concerne le déjeuner et le dîner, il est intéressant de noter que l'effet *condition* n'est pas significatif sur les apports glucidiques, lipidiques ou encore protéiques.

Aucun effet *temps* n'est observé sur les apports glucidiques, lipidiques ou protéiques quel que soit le moment de la journée considéré (petit-déjeuner, déjeuner, dîner).

Effets sur les scores d'appréciation et d'envie de consommer quinze aliments

En plus des relevés alimentaires effectués à J2, J6, J10 et J14 de chaque période d'exposition, les participants devaient également évaluer leur appréciation et leur envie de consommer quinze aliments présentés sur une liste. Le Tableau 16 présente les résultats de l'Analyse de la Variance marginale (ANOVA) obtenus avec le modèle linéaire généralisé sur les scores obtenus pour chaque aliment. D'après l'examen de ce tableau, il ne semble pas que ces scores suivent un pattern de réponse particulièrement marquant. On peut juste noter un effet *condition* significatif sur les scores d'appréciation de la confiture de fraise. Les scores hédoniques étaient plus faibles dans la condition expérimentale que dans la condition contrôle. Il semblerait donc que la consommation d'un petit-déjeuner très riche en glucides se traduise par une diminution de l'appréciation pour des aliments glucidiques. Par ailleurs, on peut noter un effet *temps* significatif sur l'envie de consommer du yaourt et du lait se traduisant par une diminution de l'envie de consommer ces produits au fil du temps.

Tableau 16 : Résultats de l'Analyse de la Variance marginale (ANOVA) obtenus avec le modèle linéaire généralisé sur les scores d'appréciation et de consommer les quinze aliments.

| | Appréciation | | | | | | Envie | | | | | |
|----------------------------|--------------|----------------|-------|------|-------------|-------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|------|
| | Condition | | Temps | | Interaction | | Condition | | Temps | | Interaction | |
| | F | p | F | p | F | p | F | p | F | p | F | p |
| Confiture de fraise | 3.83 | 0.07 | 0.06 | 0.81 | 5.09 | 0.02 | 1.08 | 0.31 | 0.00 | 0.98 | 0.16 | 0.68 |
| Cookies | 1.02 | 0.33 | 4.31 | 0.04 | 0.03 | 0.86 | 0.06 | 0.82 | 0.80 | 0.37 | 0.64 | 0.42 |
| Corn Flakes | 0.00 | 0.99 | 0.25 | 0.61 | 0.69 | 0.41 | 1.22 | 0.29 | 0.24 | 0.63 | 1.86 | 0.18 |
| Emmental | 0.44 | 0.51 | 0.59 | 0.44 | 0.12 | 0.73 | 0.14 | 0.71 | 0.81 | 0.37 | 0.24 | 0.62 |
| Haricots Verts | 0.00 | 0.97 | 0.04 | 0.84 | 0.01 | 0.93 | 2.98 | 0.10 | 0.07 | 0.79 | 0.01 | 0.91 |
| Jambon | 2.52 | 0.13 | 0.28 | 0.60 | 1.16 | 0.28 | 0.18 | 0.68 | 0.16 | 0.69 | 0.14 | 0.71 |
| Ketchup | 0.01 | 0.91 | 0.27 | 0.60 | 0.27 | 0.60 | 0.03 | 0.86 | 0.05 | 0.82 | 0.02 | 0.89 |
| Lait | 2.15 | 0.16 | 3.57 | 0.06 | 0.20 | 0.66 | 1.09 | 0.31 | 4.23 | 0.04 | 0.90 | 0.34 |
| Miel | 7.78 | <.01 | 0.17 | 0.68 | 0.63 | 0.43 | 0.02 | 0.90 | 0.25 | 0.62 | 0.21 | 0.65 |
| Pomme Golden | 0.00 | 0.99 | 0.31 | 0.58 | 2.05 | 0.15 | 0.94 | 0.35 | 6.65 | <.05 | 0.42 | 0.52 |
| Riz blanc | 0.32 | 0.58 | 0.91 | 0.34 | 0.11 | 0.74 | 2.57 | 0.13 | 0.09 | 0.77 | 0.00 | 0.98 |
| Tomates | 0.60 | 0.45 | 1.55 | 0.22 | 0.56 | 0.45 | 9.35 | <.05 | 1.45 | 0.23 | 0.96 | 0.33 |
| Tuc | 1.31 | 0.27 | 1.19 | 0.28 | 0.72 | 0.39 | 0.01 | 0.91 | 0.83 | 0.36 | 0.38 | 0.54 |
| Yaourt Nature | 0.01 | 0.93 | 0.18 | 0.67 | 0.74 | 0.39 | 0.90 | 0.36 | 3.82 | <.05 | 3.10 | 0.08 |

d- Discussion

En accord avec notre hypothèse initiale, le fait de remplacer le petit-déjeuner habituel des participants par un pain enrichi en fibres (PF1 ou PF2) a effectivement entraîné une diminution de la sensation de faim au cours de la matinée. Cependant, si cette diminution de faim a été accompagnée d'une diminution des prises alimentaires subséquentes pour le pain PF1, ce résultat n'a pas été observé pour le pain PF2. Au contraire, les participants ont plutôt eu tendance à augmenter leurs prises alimentaires après un petit-déjeuner composé exclusivement de ce pain PF2. Les résultats ont également montré que la consommation répétée d'un pain enrichi en fibres au petit-déjeuner n'a pas entraîné de diminution de l'appréciation de ce pain au fur et à mesure des expositions, même dans la condition expérimentale.

A plusieurs reprises, des données de la littérature ont montré que la consommation répétée - monotone - d'un aliment engendrait un phénomène de lassitude se traduisant par une

diminution de l'appréciation et/ou de la consommation de cet aliment (Siegel et Pilgrim, 1958 ; Schutz et Pilgrim, 1958 ; Rolls et deWall, 1985 ; Meiselman *et al.* 2000 ; Zandstra *et al.* 2000). D'après le *Petit Robert* (2004) la monotonie correspond à l'absence de variété, à situation qui lasse par son uniformité et sa répétition. Dans le domaine alimentaire Pilgrim et ses collaborateurs (Siegel et Pilgrim, 1958 et Schutz et Pilgrim, 1958) ont été les premiers à montrer que la monotonie alimentaire engendrait une diminution du plaisir procuré par un aliment ou un repas lorsque cet aliment ou ce repas était consommé de façon répétitive. Ce mécanisme a pour objectif de pousser l'être humain à varier son régime alimentaire à la fois pour prévenir des carences ou éviter une intoxication liée à la surconsommation d'un seul aliment (Le Magnen, 1956 ; Rolls et al. 1981 ; McCrory et al., 1999). Dans un travail non publié réalisé dans notre laboratoire, dix participants normopondéraux et non restreints ont consommé le même aliment, à savoir des raviolis, à tous les repas (matin, midi et soir) pendant trois jours consécutifs. Cette étude a montré une réduction significative de la prise alimentaire globale au cours de trois jours (-33% le troisième jour) par rapport à une situation contrôle. Zandstra *et al.* (2001) ont montré que la consommation d'une sauce une fois par semaine pendant dix semaines consécutives entraînait une diminution des quantités consommées de cette sauce, alors même que les participants pouvaient combiner cette sauce avec l'aliment de leur choix. Parallèlement à cette diminution, les auteurs ont également observé une diminution de l'appréciation hédonique de cette sauce. Rolls et deWall (1985) ont mené une étude dans un camp de réfugiés éthiopiens au Soudan. Depuis leur arrivée dans le camp six mois auparavant, les réfugiés recevaient une portion alimentaire constituée de trois aliments (crêpes au millet, haricots, lait écrémé) à tous les repas. Dans le cadre de l'étude, trois nouveaux aliments (pain blanc, lentilles, lait avec des germes de blé) ont été introduits dans les rations alimentaires. Des mesures hédoniques effectuées auprès des réfugiés ont montré que les aliments nouveaux étaient largement préférés aux aliments réguliers tandis qu'aucune différence n'a été observée entre les scores hédoniques de ces deux types d'aliments auprès de réfugiés venant d'arriver dans le camp.

Rolls et deWall ont associé la diminution d'appréciation des aliments réguliers à un phénomène de rassasiement sensoriel spécifique à long terme, qui se met en place sur une longue durée. Pour Remick *et al.* (2009), ce mécanisme de *rassasiement sensoriel spécifique à long terme*, ou *monotonie*, ferait appel à des processus conscients, tandis que le *rassasiement sensoriel spécifique* classique (Rolls *et al.* 1981) serait implicite (les participants n'auraient pas conscience de la diminution de leur appréciation pour l'aliment qu'ils sont en

train de consommer). Ceci laisserait entendre que les zones cérébrales impliquées dans ces deux phénomènes sont différentes.

Or, il s'est avéré que dans notre étude, la consommation quotidienne de pain enrichi en fibres pendant deux semaines consécutives au petit-déjeuner ne s'accompagnait pas d'une diminution de l'appréciation pour ce pain au fil des consommations, quelle que soit la quantité de pain ingérée. Bien que l'argument puisse être avancé, il est peu probable que l'absence de l'effet *monotonie* observée dans notre étude soit due à une durée d'exposition et/ou une fréquence insuffisantes. Ainsi, dans les études ayant mis en évidence un effet *monotonie*, la durée d'exposition variait de 5 jours (Meiselman *et al.* 2000) à six mois (Rolls et deWall, 1985) et la fréquence variait d'une fois par semaine (Zandstra *et al.* 2000) à deux fois par jour (Rolls et deWall, 1985). Dans notre étude, les participants étaient exposés au stimulus une fois par jour pendant quatorze jours. Plus vraisemblablement, il semble que certains aliments, dits *staple foods* seraient relativement insensibles à cet effet *monotonie*. La FAO définit les *staple food* comme des aliments consommés régulièrement et dans de telles quantités qu'ils constituent une part dominante de l'alimentation et fournissent une proportion majeure des besoins en énergie et nutriments. La FAO les décrits comme étant essentiellement des produits céréaliers, constituant une part majeure d'une alimentation et propre à une culture donnée (le pain en France, le riz en Asie du Sud Est). Cependant la FAO précise que les *staple foods* ne représentent pas la totalité des apports caloriques d'une population car ils ne couvrent pas tous les besoins en macro- et micronutriments. Il semble que la consommation répétée de ces *staple foods* n'affecte pas l'appréciation de ces derniers (Kamen et Peryam, 1961 ; Meiselamn *et al.* 2000, Hetherington *et al.* 2002). Ainsi, Hetherington *et al.* (2002) se sont intéressés à l'évolution de l'appréciation d'un aliment initialement très palatable, le chocolat, par rapport à un aliment moyennement palatable, mais appartenant à la catégorie des *staple foods*, du pain beurré, au fur et à mesure de consommations répétées (une fois par jour pendant 22 jours). Les résultats ont montré que l'appréciation pour le chocolat diminuait fortement au fur et à mesure des expositions alors que l'appréciation pour le pain beurré restait proche de sa valeur initiale. De la même façon, Meiselman *et al.* (2000) ont observé que l'appréciation de pommes de terre consommées tous les jours au déjeuner ne diminuait pas à la différence de l'appréciation pour une viande ou des haricots verts. En conséquence, Meiselman a proposé de donner la définition des *staple foods* comme étant une composante stable d'une alimentation, résistante aux effets de la monotonie. Du fait de leur part prédominante au sein de l'alimentation d'une population et de leur résistance à l'effet

monotonie, les *staple foods* représentent un vecteur intéressant pour lutter contre certains désordres alimentaires. Ainsi, Bouis (2000), Welch et Graham (2004) ont proposé d'enrichir les *staple foods* en macronutriments afin de lutter contre les carences alimentaires dans des régions touchées par la dénutrition. Inversement, l'amélioration de la qualité nutritionnelle des *staple foods* représente un moyen intéressant de prévenir et ou de soigner le diabète et l'obésité (Franz *et al.* 2005, Thompson *et al.* 2005). Notre étude permet effectivement de confirmer que la consommation monotone d'une large quantité de pain – assimilé à un *staple food* pour la population française - n'entraîne pas de lassitude pour ce pain. Ces résultats entérinent les avantages du pain comme vecteur intéressant pour améliorer la qualité nutritionnelle de l'alimentation en France.

Plusieurs auteurs ont proposé d'enrichir certains aliments - et notamment les *staple foods*, en fibres afin de lutter contre l'obésité (pour une revue, voir Howarth *et al.* 2001). En effet, un certain nombre d'études a montré que la consommation répétée d'un aliment enrichi en fibres peut entraîner une diminution des apports caloriques et ainsi entraîné une diminution du poids de patients obèses (Rössner *et al.*, 1987 ; Stevens *et al.*, 1987 ; Pasman *et al.*, 1997 ; Lyly *et al.*, 2009). Ainsi, Pasman *et al.* (1997) ont montré que la consommation d'un jus d'orange supplémenté de guar (fibre soluble) pendant une semaine entraînait une diminution de la sensation de faim se traduisant par une diminution des apports caloriques, par rapport à une situation contrôle ou les participants recevaient du jus d'orange sans ajout de fibres. En accord avec ces résultats, nous avons observé que le remplacement d'un petit-déjeuner classique par une quantité isocalorique de pain enrichi en fibres typé « pain de mie blanc » entraînait une diminution de la sensation de faim au cours de la matinée et une diminution des apports caloriques subséquents. En revanche, si la consommation du pain enrichi en fibres typé « céréales » a aussi entraîné une diminution de la sensation de faim au cours de la matinée, cette diminution ne s'est pas traduite par une diminution des apports caloriques. Au contraire, dans cette condition, les participants ont légèrement augmenté leurs apports caloriques aux repas subséquents.

De prime abord, cette dissociation entre l'effet de la consommation du pain typé « céréales » sur la sensation de faim et sur la prise alimentaire souligne que la mesure de la sensation de faim telle qu'elle a été faite ici (échelles visuelles analogiques) ne prédit pas toujours la prise alimentaire effective. Ce point a été souligné par Mattes (1990), par exemple qui indique que la faim est une traduction « non-innée » des systèmes contrôlant l'appétit et que la réponse d'un participant peut être conditionnée lors de prises alimentaires normales. Cependant, un

certain nombre d'études a montré que les mesures de faim et les mesures de prise alimentaire sont en général fortement corrélées (De Castro et Elmore, 1988). Au-delà de cette constatation méthodologique, plusieurs hypothèses peuvent être proposées pour expliquer ce résultat dans le cadre de notre étude.

D'une part, les résultats ont montré que les participants exposés au pain PF2 ont jugé ce pain moins plaisant dans la condition expérimentale (durant laquelle leur petit-déjeuner était exclusivement composé de pain) par rapport à la condition contrôle. Aucune différence de cette sorte n'a été observée auprès des participants exposés au pain PF1. Il convient de souligner que le pain PF2 était probablement moins familier aux participants que le pain PF1. Une première hypothèse pourrait donc être que le fait d'avoir à consommer une quantité relativement importante d'un pain peu familier au petit-déjeuner ait entraîné un sentiment « d'inconfort » chez les participants. Les participants pourraient alors avoir compensé cet « inconfort » en modifiant leurs prises alimentaires subséquentes, soit en augmentant la quantité d'aliments consommés, soit en modifiant leurs choix alimentaires. Afin de confirmer ou non cette hypothèse, le nombre d'items (aliments et boissons) consommés en dehors du petit-déjeuner a été comparé entre la condition expérimentale et la condition contrôle. D'après une ANOVA marginale aucun effet *condition*, *temps* ou *temps*condition* significatif n'est observé, ni pour le pain PF1 (respectivement $F=0.19$; $p>.05$; $F=2.36$; $p>.05$; $F=0.70$; $p>.05$), ni pour le pain PF2 (respectivement $F=0.33$ $p>.05$; $F=2.75$ $p>.05$; $F=1.34$ $p>.25$). Effectivement, le nombre d'aliments consommés en dehors du petit-déjeuner est similaire entre les deux conditions que ce soit pour PF1 (condition expérimentale : $M=10.0$; $\sigma=4.3$ et condition contrôle : $M=9.8$; $\sigma=3.9$) que pour PF2 (condition expérimentale : $M=8.4$; $\sigma=3.4$ et condition contrôle : $M=8.2$; $\sigma=3.2$). Dans un deuxième temps, les choix alimentaires des participants ont été comparés entre la condition expérimentale et la condition contrôle en relevant les aliments « plaisir » consommés par les participants en dehors du petit-déjeuner. Nous avons défini ces aliments « plaisir » comme étant des aliments palatables susceptibles d'être consommés non seulement pour se nourrir mais aussi pour « se faire plaisir ». Ces aliments « plaisir » ont été identifiés sur chaque relevé alimentaire. Ils comprenaient des aliments gras et sucrés (viennoiseries, pâtisseries, crèmes...), des aliments et boissons sucrés (sodas, jus de fruits, confiseries...), des aliments gras et salés (charcuteries, tartes ou autres aliments ayant une pâte, aliments frits...), des boissons alcoolisées (vin, bière...), des aliments ou boissons ayant une connotation festive (foie gras, saumon, sushis, tartiflette...) et des aliments consommés à un moment « inhabituel » (par exemple, de la confiture au moment

du dîner). Les apports caloriques correspondant à ces aliments « plaisir » ont été déterminés pour chaque participant, chaque condition et chaque jour de relevé. Le rapport entre ces apports caloriques « plaisir » et les apports caloriques totaux a ensuite été calculé. Les résultats montrent que pour le pain PF1, les participants semblent avoir consommé moins d'aliment plaisir dans la condition expérimentale que dans la condition contrôle (respectivement $M=383$ kcal ; $\sigma=514$; $M=383$ kcal ; $\sigma=331$). A l'inverse pour le pain PF2 les participants semblent avoir consommé plus d'aliments plaisir dans la condition expérimentale que dans la condition contrôle (respectivement $M=610$ kcal ; $\sigma=456$ et $M=510$ kcal ; $\sigma=377$). Cependant, d'après une ANOVA marginale aucun effet *condition*, *temps* ou *temps*condition* significatif n'est observé, ni pour le pain PF1 (respectivement $F=0.33$; $p>.05$; $F=1.11$; $p>.05$; $F=1.05$; $p>.05$), ni pour le pain PF2 (respectivement $F=0.23$; $p>.05$; $F=0.35$; $p>.05$; $F=0.09$ $p>.05$). Il convient de souligner que cette analyse laisse une large part à l'appréciation subjective de l'expérimentateur. Toutefois même s'ils ne sont pas significatifs, nos résultats laissent quand même penser qu'il serait intéressant de vérifier que la consommation importante d'un aliment non familier et peu apprécié dans le cadre d'un régime n'entraîne pas une orientation des choix alimentaires vers des aliments « plaisir ».

D'autre part, une deuxième hypothèse pourrait être que les fibres contenues dans le pain PF2 n'ont pas forcément le même retentissement physiologique que dans le pain PF1 du fait d'interactions différentes au sein de la matrice (différences de solubilité, de fermentabilité, de masticabilité...). Si cette explication semble la bonne, il est néanmoins surprenant d'observer une diminution relativement équivalente de la sensation de faim après la consommation exclusive de pain PF1 comme de pain PF2. Toutefois, une explication possible pourrait être que la diminution de la sensation de faim observée dans la condition expérimentale ne serait pas induite par l'enrichissement du régime en fibres mais plutôt par le fait de devoir consommer de façon monotone et exclusive une grosse quantité de pain au petit-déjeuner.

En ce qui concerne les apports en macronutriments, il est intéressant de noter que les participants ont compensé l'augmentation des apports glucidiques et la diminution des apports lipidiques au petit-déjeuner (consommation de PF1 - condition expérimentale) par une diminution des apports glucidiques et une augmentation des apports lipidiques lors du repas suivant (au déjeuner). Un résultat similaire avait déjà été observé dans l'étude de De Castro *et al.* (2007) consistant à analyser les relevés alimentaires effectués sur sept jours par plus de 800 participants. Les auteurs avaient analysé ces relevés en comparant trois plages horaires, à savoir de 6 heures à midi, de midi à 18 heures et de 18 heures à minuit. Les résultats ont

montré que si les apports glucidiques étaient importants dans la période correspondant au matin, ces apports glucidiques étaient plus faibles durant les deux autres périodes. De Castro *et al.* (2007) ont proposé que la consommation importante d'un macronutriment le matin réduisait la consommation subséquente de ce macronutriment au cours de la journée. En revanche aucune compensation n'a été observée pour les apports protidiques. Un petit-déjeuner plus riche en protides (consommation PF1 et PF2 - condition expérimentale) n'a pas entraîné une diminution des apports protidiques au repas suivant.

Enfin, l'étude menée avec le pain PF2 a été l'occasion de comparer deux méthodes permettant d'évaluer la prise alimentaire, à savoir la méthode des relevés alimentaires (les participants pèsent et notent eux-mêmes tout ce qu'ils consomment) et la méthode des repas pris au laboratoire. Chacune de ces deux techniques offre un intérêt par rapport à l'autre. Les relevés permettent de suivre les consommations habituelles des participants. Cette méthode laisse aux participants le choix des aliments qu'ils consomment, et permet d'évaluer dans quelle mesure les participants s'orientent vers des aliments de natures différentes (glucidiques, lipidiques, protéiques) en fonction de la condition testée. Cependant, il a été démontré à plusieurs reprises que les participants sous-estimaient leur prise énergétique réelle d'environ 20% (voir par exemple Ortega Anta *et al.*, 1997). Effectivement, dans notre étude les apports caloriques moyens déterminés à partir des relevés alimentaires étaient inférieurs d'environ 20 à 25% aux besoins théoriques. L'évaluation de la prise alimentaire au cours de repas contrôlés en laboratoire permet de s'affranchir de ce biais. Effectivement, les apports caloriques moyens déterminés lors des différents repas pris au laboratoire se rapprochent des besoins théoriques expérimentaux par rapport à la condition contrôle. En conséquence, la méthode des relevés alimentaires a été conservée pour la suite du travail (condition expérimentale : J0 : M=2172 kcal ; σ =588 et J15 : M=2108 kcal ; σ =551,8 – condition contrôle : J0 : M=2165 kcal ; σ =464 et J15 : M=2011 kcal ; σ =8695). Cependant, le choix des aliments proposés est forcément plus restreint que dans une situation de vie quotidienne. Quoiqu'il en soit, ces deux méthodes ont montré une tendance de l'augmentation des apports caloriques dans la condition expérimentale pour le pain PF2.

⁵ Les besoins énergétiques sur 24h est calculé par la formule suivante :

$$\text{Besoin} = \text{dépense énergétique} * 1,375$$

La dépense énergétique sur 24h a été déterminée par la formule d'Harrys et Benedict (1919) :

$$\text{Hommes : DER} = 13,7516 \times \text{Poids (kg)} + 500,33 \times \text{Taille (m)} - 6,7550 \times \text{Age (an)} + 66,473$$

$$\text{Femmes : DER} = 9,5634 \times \text{Poids (kg)} + 184,96 \times \text{Taille (m)} - 4,6756 \times \text{Age (an)} + 655,0955$$

e- Conclusion

Cette étude indique que les *staple foods*, comme le pain en France, peuvent être des vecteurs intéressants pour améliorer la qualité nutritionnelle de l'alimentation. Si la consommation répétée d'un aliment semble diminuer l'appréciation pour cet aliment, il apparaît que l'appréciation pour les *staple foods* est moins affectée par une consommation monotone. Une telle résistance à la monotonie peut s'avérer un avantage non négligeable pour la consommation d'aliments fonctionnels ou d'aliments « santé ». Dans notre étude, le fait de remplacer le petit-déjeuner habituel des participants par une quantité isocalorique de pain enrichi en fibres a entraîné une diminution de la sensation de faim au cours de la matinée. Cette diminution de la sensation de faim s'est accompagnée d'une diminution effective de la prise alimentaire pour le pain le plus familier (PF1) mais pas pour le pain le moins familier (PF2). Ceci souligne notamment l'importance de développer des aliments fonctionnels qui ne sont pas trop différents des aliments consommés habituellement.

DISCUSSION GENERALE

VII. DISCUSSION GENERALE

Le projet mené au travers de cette thèse avait pour but de formuler, de caractériser et de valider les effets satiétogènes d'un pain de façon à proposer ce dernier, à terme, dans le cadre d'une alimentation optimisée de participants en surpoids et/ou obèses. Pour cela, nous avons formulé deux pains enrichis en fibres. Un premier pain (PF1) a été formulé en remplaçant une partie de la farine 65 par de la farine complète contenant des fibres de son. Un second pain (PF2) a été formulé en ajoutant des fibres issues de graines de céréales autres que le blé (avoine, seigle...). Ces deux pains contenaient respectivement 10,4 et 12,8 g de fibres pour 100 g et présentaient des rapports fibres solubles/insolubles comparables. Ces deux pains appartenaient à l'espace produit « pain complet » pour PF1 et « pain aux céréales » pour PF2.

Dans le cadre de ce travail, nous avons mené deux types d'études : des études à court terme et des études à long terme. Parmi les résultats marquants des études à court terme, il est apparu que ces deux pains étaient relativement bien acceptés par les consommateurs (notes d'appréciation hédonique aux alentours de 6 sur une échelle de 10). Une particularité de la première étude « Effet de la consommation d'un pain riche en fibres sur les attentes des consommateurs et la prise alimentaire de ce pain » a été de démontrer que les participants s'attendaient spontanément à ce que le pain PF2 soit plus rassasiant qu'un pain de mie blanc. Malheureusement, pour des questions de contraintes de temps, cette étude n'a pas été reproduite avec le pain PF1. Globalement, ces études à court terme n'ont pas permis de mettre en évidence les effets satiétogènes attendus par des pains enrichis en fibres par rapport à un pain contrôle, pauvre en fibres. Certes, la seconde étude « Evaluation du caractère satiétogène des pains riches en fibres » a permis d'observer que l'ingestion du pain PF2 au petit-déjeuner entraînait une réapparition plus lente de la sensation de faim, indiquant de ce fait que la satiété se maintenait plus longtemps au cours de la matinée. Cependant, cette étude n'a pas mis en évidence d'effet de la consommation d'un pain enrichi en fibres sur les prises alimentaires subséquentes.

En ce qui concerne les études à long terme, il a été démontré que le fait de remplacer les petits-déjeuners habituels des participants par des rations isocaloriques de pains enrichis en fibres entraînait une diminution de la sensation de faim au cours de la matinée. Si cet effet satiétogène s'est effectivement accompagné d'une diminution des prises caloriques subséquentes pour le pain PF1, le contraire (augmentation des apports) a été observé pour le

pain PF2. Une première hypothèse pour expliquer ce résultat pourrait venir du fait que le pain PF1 appartient à un espace produit plus familier (pain complet) des consommateurs que le pain PF2 (pain aux céréales). De plus, les résultats de cette étude ont montré que la consommation d'une ration exclusive du pain PF2 au petit-déjeuner était moins bien acceptée que la consommation d'une ration exclusive du pain PF1. Ceci pourrait avoir entraîné un sentiment de "frustration" chez les consommateurs exposés au pain PF2. Ainsi, cette "frustration" a pu conduire à une augmentation de la consommation "d'aliments plaisir". Il aurait été intéressant de mieux caractériser les habitudes de consommation de nos participants par rapport aux différents pains présents sur le marché. Lors de l'élaboration du protocole, nous avons toutefois préféré ne pas trop attirer l'attention des participants sur le fait que nous leur présentions des pains riches en fibres afin d'éviter que leur comportement lors des études ne soit modifié à cause d'éventuels préjugés quant à l'effet des fibres. Une deuxième hypothèse est basée sur la nature des fibres présentes dans chacun des pains. En effet, les travaux de la littérature ont montré à plusieurs reprises que certaines fibres étaient plus satiétogènes que d'autres. Il est donc possible que les fibres apportées par le son de blé n'aient pas le même retentissement physiologique que les fibres apportées par d'autres céréales. Il est également possible que la disponibilité des fibres incluses dans les céréales ne soit pas identique que celles naturellement présentes dans la farine. A ce stade, la littérature manque encore de travaux précisant clairement quelles sont les fibres qui ont un effet satiétogène sur l'organisme et quelles sont les fibres que n'en ont pas, et pour quelles raisons.

A la suite de ce travail, nous avons sélectionné le pain PF1 pour tester son intérêt dans le cadre d'un régime chez des personnes en surpoids. Une étude est actuellement menée afin d'évaluer l'effet de l'ingestion de PF1 consommé au petit-déjeuner pendant deux mois chez des personnes en surpoids, sur la perte de poids et le « vécu du régime ». Spécifiquement, nous espérons que cette étude permette de répondre aux deux questions suivantes :

- la consommation répétée d'un pain riche en fibres au petit-déjeuner permet-elle d'augmenter la perte de poids, en plus du suivi individualisé de personnes en surpoids par une diététicienne ?
- la consommation répétée d'un pain riche en fibres au petit-déjeuner permet-elle d'améliorer le « vécu » de ce régime par les participants ? En effet, l'effet satiétogène des fibres pourrait réduire la tentation des participants à grignoter et les sensations

fréquemment associées à la faim (irritabilité, fatigue, manque de concentration...), autrement dit, à améliorer le « bien-être » des participants au cours de leur régime.

Pour cette étude, 24 participants (12 hommes et 12 femmes âgés de 20 à 55 ans) en surpoids, non diabétiques (IMC compris entre 25 et 32 kg/m²) et ayant l'habitude de consommer un petit-déjeuner contenant des aliments solides ont été recrutés. Cette étude comporte un premier rendez-vous avec une diététicienne afin d'analyser les habitudes alimentaires (d'après un semainier alimentaire) et les habitudes de vie en rapport avec l'activité physique de chaque participant. Au cours de cette entrevue, la diététicienne prodigue des conseils afin d'améliorer l'équilibre nutritionnel (si celui-ci s'avère être déséquilibré), d'encourager la réduction des apports énergétiques (si ces derniers s'avèrent être excessifs) et d'inciter à la pratique d'une activité physique (marche, natation) à raison d'au moins une demie heure par jour. A la suite de ce premier rendez vous, les participants sont invités à suivre les conseils de la diététicienne au cours de seize semaines divisées en deux périodes successives de huit semaines. Au cours d'une période « contrôle », les participants sont libres de composer leur petit-déjeuner dans le respect des éventuels conseils de la diététicienne. Au cours d'une période « expérimentale », les petits-déjeuners sont exclusivement composés d'une ration de pain riche en fibres correspondant à l'apport énergétique recommandé par la diététicienne. Cet apport « fixe », individuellement déterminé, est calculé à partir des habitudes alimentaires observées après analyse du semainier mais aussi à partir des besoins énergétiques préconisés pour une perte de poids. Au cours des seize semaines, des entretiens avec la diététicienne sont régulièrement réalisés toutes les deux semaines afin d'accompagner la personne dans son régime. En parallèle, les mesures suivantes sont régulièrement effectuées :

- une fois par semaine : poids, relevé alimentaire (relevé de tous les aliments et les boissons consommés au cours de la journée), activité physique pratiquée au cours de la journée, évolution de la sensation de faim et des sensations susceptibles d'y être associées (irritabilité, fatigue, manque de concentration...) au cours de la matinée, motivation à poursuivre le régime.

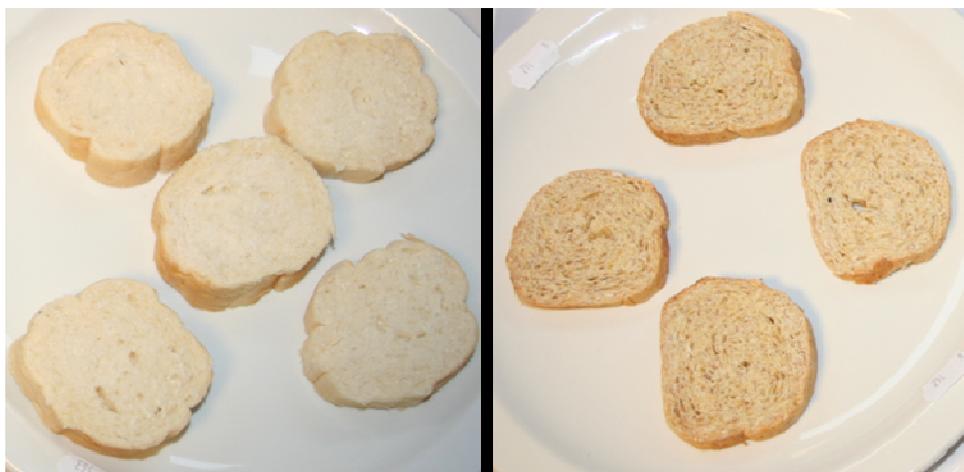
- au début, entre les deux périodes et à la fin : mesure de la masse grasse et de la masse maigre, dosage des taux circulants de ghréline, de leptine et d'insuline.

Pour finir ce manuscrit, j'aimerais aborder une question que nous nous sommes posée de façon récurrente au cours de ma thèse, à savoir le choix de la portion de pain à donner aux

participants. Dans les études « Evaluation du caractère satiétogène des pains riches en fibres » et « Influence de la consommation répétée d'un pain enrichi en fibres sur la sensation de faim et la prise alimentaire », nous avons fait le choix de donner des rations de pain équivalentes d'un point de vue calorique aux petits-déjeuners habituels des participants. Autrement dit, nous avons comparé l'effet de rations de pains isocaloriques mais pas isomassiques sur le rassasiement et la satiété. Dans l'étude « Effet de la consommation d'un pain riche en fibres sur les attentes des consommateurs et la prise alimentaire de ce pain », nous avons fait le choix de donner des rations de pain équivalentes d'un point de vue massique aux quantités de pains consommées durant les petits-déjeuners habituels des participants. Autrement dit, nous avons comparé l'effet de rations de pains isomassiques, mais pas isocaloriques sur le rassasiement et la satiété. Malheureusement, il n'a pas été possible de comparer des rations isocaloriques et isomassiques provenant de pains plus ou moins enrichis en fibres. Or, comme nous l'avons vu au début de ce manuscrit, des différences de masse peuvent engendrer des différences

au niveau du rassasiement et des différences de calories peuvent engendrer des différences au niveau de la satiété. De plus, nous

Figure 39 : Différences au niveau visuel de 130 g de pain PM (à gauche) et 130 g de pain PF2 (à droite).



nous sommes heurtés à de fortes différences de volumes entre les pains pauvres en fibres et les pains riches en fibres. Ainsi, à masse ou à calorie égales, les portions de PF2 étaient moins volumineuses que les portions du pain contrôle (Figure 39). Ces différences de volume étaient certes ajustées en demandant aux participants d'ingérer un verre contenant plus ou moins d'eau selon le pain proposé. Néanmoins, il est possible que le fait de consommer un "gros" volume de pain contrôle ait engendré un rassasiement "cognitif" susceptible de masquer en partie l'effet satiétogène des fibres. Cette hypothèse est en revanche peu plausible pour le pain PF1. En effet, les densité des pains contrôle et PF1 et donc les volumes servis sont à peu près

équivalents. Quoiqu'il en soit, l'un des défis des études futures sur ce participant est sans doute de mieux appréhender le rassasiement "cognitif", lié à la quantité d'aliment que le participant a l'impression de manger (le volume), du rassasiement "physiologique" lié à la masse et à la composition des aliments ingérés.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adrian, T. E., Ferri, G. L., Bacarese, H., A. J., Fuessl, H. S., Polak, J. M., Bloom, & S. R. (1985). *Human distribution and release of a putative new gut hormone, peptide YY* (Vol. 89). Hoboken, NJ, ETATS-UNIS: Wiley.
- Appleton, K. M., Gentry, R. C., & Shepherd, R. (2006). Evidence of a role for conditioning in the development of liking for flavours in humans in everyday life. *Physiol Behav*, *87*, 478-486.
- Asakawa, A., Inui, A., Fujimiya, M., Sakamaki, R., Shinfuku, N., Ueta, Y., Meguid, M. M., & Kasuga, M. (2005). Stomach regulates energy balance via acylated ghrelin and desacyl ghrelin. *Gut*, *54*, 18-24.
- Baer, D. J., Rumpler, W. V., Miles, C. W., & Fahey, G. C. (1997). Dietary Fiber Decreases the Metabolizable Energy Content and Nutrient Digestibility of Mixed Diets Fed to Humans. *Journal of Nutrition*, *127*, 579-586.
- Barnett, T. (2009). Caractéristiques du voisinage et l'excès de poids chez les jeunes. In *Métabolisme et comportement alimentaire : les enjeux de demain*. Lyon: Journées J. Cartier.
- Batterham, R. L., Cowley, M. A., Small, C. J., Herzog, H., Cohen, M. A., Dakin, C. L., Wren, A. M., Brynes, A. E., Low, M. J., Ghatei, M. A., Cone, R. D., & Bloom, S. R. (2002). Gut hormone PYY3-36 physiologically inhibits food intake. *Nature*, *418*, 650-654.
- Bell, E. A., Castellanos, V. H., Pelkman, C. L., Thorwart, M. L., & Rolls, B. J. (1998). Energy density of foods affects energy intake in normal-weight women. *American Journal of Clinical Nutrition*, *67*, 412-420.
- Bell, E. A., Roe, L. S., & Rolls, B. J. (2003). Sensory-specific satiety is affected more by volume than by energy content of a liquid food. *Physiology & Behavior*, *78*, 593-600.
- Bell, R., & Pliner, P. L. (2003). Time to eat: the relationship between the number of people eating and meal duration in three lunch settings. *Appetite*, *41*, 215-218.
- Bernard, C. (1865). *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*.
- Berridge, K. C., & Robinson, T. E. (2003). Parsing reward. *Trends in Neurosciences*, *26*, 507-513.
- Berthoud, H.-R. (2007). Interactions between the "cognitive" and "metabolic" brain in the control of food intake. *Physiology & Behavior*, *91*, 486-498.
- Birch, L. L., McPhee, L., Steinberg, L., & Sullivan, S. (1990). Conditioned flavor preferences in young children. *Physiology & Behavior*, *47*, 501-505.
- Björck, I. (2010). Memorable foods: A reflection on the metabolic and cognitive memory to cereal-based meals. In *3rd International Research Symposium : Bread and Cereals, their contribution to the pleasure of eating and to nutritional balance of meals*. Ecully.
- Björck, I., Liljeberg, H., & Östman, E. (2000). Low glycaemic-index foods. *British Journal of Nutrition*, *83*, S149-S155.
- Blundell, J. E., Lawton, C. L., Cotton, J. R., Macdiarmid, & J. I. (1996). *Control of human appetite : Implications for the intake of dietary fat* (Vol. 16). Palo Alto, CA, ETATS-UNIS: Annual Reviews.
- Blundell, J. (2011). Reward and food dependence. In *Vitagora - Goût, Nutrition, Santé*. Dijon.
- Blundell, J., De Graaf, C., Hulshof, T., Jebb, S., Livingstone, B., Lluch, A., Mela, D., Salah, S., Schuring, E., Van Der Knaap, H., & Westerterp, M. (2010). Appetite control: methodological aspects of the evaluation of foods. *Obesity Reviews*, *11*, 251-270.
- Booth, D. A. (1981). The physiology of appetite. *British Medical Bulletin*, *37*, 135-140.

- Booth, D. A., Mather, P., & Fuller, J. (1982). Starch content of ordinary foods associatively conditions human appetite and satiation, indexed by intake and eating pleasantness of starch-paired flavours. *Appetite*, 3, 163-184.
- Bouis, H. E. (2000). Enrichment of food staples through plant breeding: A new strategy for fighting micronutrient malnutrition. *Nutrition*, 16, 701-704.
- Brand-Miller, J. C., Holt, S. H. A., Pawlak, D. B., & McMillan, J. (2002). Glycemic index and obesity. *American Journal of Clinical Nutrition*, 76, 281S-285S.
- Brennan, C. S. (2005). Dietary fibre, glycaemic response, and diabetes. *Molecular Nutrition & Food Research*, 49, 560-570.
- Brondel, L., Lauraine, G., Van Wymelbeke, V., Romer, M., & Schaal, B. (2009). Alternation between foods within a meal. Influence on satiation and consumption in humans. *Appetite*, 53, 203-209.
- Brondel, L., Romer, M., Van Wymelbeke, V., Walla, P., Jiang, T., Deecke, L., & Rigaud, D. (2007). Sensory-specific satiety with simple foods in humans: no influence of BMI? *International Journal of Obesity*, 31, 987-995.
- Brunstrom, J. M., & Mitchell, G. L. (2007). Flavor-nutrient learning in restrained and unrestrained eaters. *Physiol Behav*, 90, 133-141.
- Bryson, E., Dore, C., & Garrow, J. S. (1979). Wholemeal bread and satiety. *The Lancet*, 314, 260-261.
- Burton-Freeman, B., Davis, P. A., & Schneeman, B. O. (2002). Plasma cholecystokinin is associated with subjective measures of satiety in women. *American Journal of Clinical Nutrition*, 76, 659-667.
- Campfield, L. A., Smith, F. J., Guisez, Y., Devos, R., & Burn, P. (1995). Recombinant mouse OB protein: evidence for a peripheral signal linking adiposity and central neural networks. *Science*, 269, 546-549.
- Cannon, W. B. (1932). The Wisdom of the Body. In (Vol. 184, pp. 864): American Psychological Association.
- Capaldi, E. D., & Privitera, G. J. (2007). Flavor-nutrient learning independent of flavor-taste learning with college students. *Appetite*, 49, 712-715.
- Centre-de-recherche-pour-l'étude-et-l'observation-des-conditions-de-vie. (2007). Enquête "Comportements et consommations alimentaires en France".
- Chin-Chance, C., Polonsky, K. S., & Schoeller, D. A. (2000). Twenty-Four-Hour Leptin Levels Respond to Cumulative Short-Term Energy Imbalance and Predict Subsequent Intake. *Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 85, 2685-2691.
- Chow, J., Choe, Y. S., Noss, M. J., Robinson, K. J., Dugle, J. E., Acosta, S. H., & Garleb, K. A. (2007). Effect of a viscous fiber-containing nutrition bar on satiety of patients with type 2 diabetes. *Diabetes research and clinical practice*, 76, 335-340.
- Clendenen, V. I., Herman, C. P., & Polivy, J. (1994). Social facilitation of eating among friends and strangers. *Appetite*, 23, 1-13.
- Coelho, J. S., Polivy, J., Peter Herman, C., & Pliner, P. (2009). Wake up and smell the cookies. Effects of olfactory food-cue exposure in restrained and unrestrained eaters. *Appetite*, 52, 517-520.
- Confédération-Nationale-de-la-Boulangerie-Pâtisserie. (2010). Enquête "ToQue" magazine.
- Dairou, V., & Sieffermann, J.-M. (2002). A comparison of 14 jams characterized by conventional profile and a quick original method, the flash profile. *Journal of Food Science*, 67, 826-834.

- De Castro, J. M. (2000). Eating behavior: lessons from the real world of humans. *Nutrition (Burbank, Los Angeles County, Calif.)*, 16, 800-813.
- De Castro, J. M. (2007). The time of day and the proportions of macronutrients eaten are related to total daily food intake. *British Journal of Nutrition*, 98, 1077-1083.
- De Castro, J. M., & Elmore, D. K. (1988). Subjective Hunger Relationships with Meal Patterns in the Spontaneous Feeding-Behavior of Humans - Evidence for a Causal Connection. *Physiology & Behavior*, 43, 159-165.
- de Graaf, C., Blom, W. A. M., Smeets, P. A. M., Stafleu, A., & Hendriks, H. F. J. (2004). Biomarkers of satiation and satiety. *American Journal of Clinical Nutrition*, 79, 946-961.
- de Graaf, C., de Jong, L. S., & Lambers, A. C. (1999). Palatability affects satiation but not satiety. *Physiology & Behavior*, 66, 681-688.
- Degen, L., Matzinger, D., Drewe, J., & Beglinger, C. (2001). The effect of cholecystokinin in controlling appetite and food intake in humans. *Peptides*, 22, 1265-1269.
- Degen, L., Oesch, S., Casanova, M., Graf, S., Ketterer, S., Drewe, J., & Beglinger, C. (2005). Effect of Peptide YY3-36 on Food Intake in Humans. *Gastroenterology*, 129, 1430-1436.
- Delargy, H. J., Osullivan, K. R., Fletcher, R. J., & Blundell, J. E. (1997). Effects of amount and type of dietary fibre (soluble and insoluble) on short-term control of appetite. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 48, 67-77.
- Doldi, S. B., Micheletto, G., Perrini, M. N., Rapetti, & R. (2004). *Intragastric balloon: Another option for treatment of obesity and morbid obesity* (Vol. 51). Stuttgart, ALLEMAGNE: H.G.E.
- Domjan, M., & Best, M. R. (1980). Interference with ingestional aversion learning produced by preexposure to the unconditioned stimulus: Associative and nonassociative aspects. *Learning and Motivation*, 11, 522-537.
- Drewnowski, A. (1998). Energy density, palatability, and satiety: implications for weight control. *Nutrition Reviews*, 56, 347-353.
- Effertz, M. E., Denman, P., & Slavin, J. L. (1991). The effect of soy polysaccharide on body weight, serum lipids, blood glucose, and fecal parameters in moderately obese adults. *Nutrition Research*, 11, 849-859.
- Fantino, & M. (1998). *Physiologie du comportement alimentaire chez l'homme : Obesite et lipides* (Vol. 5). Montrouge, FRANCE: Libbey-Eurotext.
- Finlayson, G., King, N., & Blundell, J. (2008). The role of implicit wanting in relation to explicit liking and wanting for food: Implications for appetite control. *Appetite*, 50, 120-127.
- Finlayson, G., King, N., & Blundell, J. E. (2007). Is it possible to dissociate 'liking' and 'wanting' for foods in humans? A novel experimental procedure. *Physiology & Behavior*, 90, 36-42.
- Flint, A., Raben, A., Astrup, A., & Holst, J. J. (1998). Glucagon-like peptide 1 promotes satiety and suppresses energy intake in humans. *The Journal of Clinical Investigation*, 101, 515-520.
- Flint, A., Raben, A., Blundell, J. E., & Astrup, A. (2000). Reproducibility, power and validity of visual analogue scales in assessment of appetite sensations in single test meal studies. *International Journal of Obesity*, 24, 38-48.
- Franz, M. J., Bantle, J. P., Beebe, C. A., Brunzell, J. D., Chiasson, J.-L., Garg, A., Holzmeister, L. A., Hoogwerf, B., Mayer-Davis, E., Mooradian, A. D., Purnell, J. Q., & Wheeler, M. (2002). Evidence-Based Nutrition Principles and

- Recommendations for the Treatment and Prevention of Diabetes and Related Complications. *Diabetes care*, 25, 148-198.
- French, S. J., Conlon, C. A., Mutuma, S. T., Arnold, M., Read, N. W., Meijer, G., & Francis, J. (2000). The effects of intestinal infusion of long-chain fatty acids on food intake in humans. *Gastroenterology*, 119, 943-948.
- Gibbs, J., Young, R. C., & Smith, G. P. (1973). Cholecystokinin decreases food intake in rats. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 84, 488-495.
- Gielkens, H. A. J., Verkijk, M., Lam, W. F., Lamers, C. B. H. W., & Masclee, A. A. M. (1998). Effects of hyperglycemia and hyperinsulinemia on satiety in humans. *Metabolism*, 47, 321-324.
- Gobet, M. (2008). *Etude par spectroscopies de RMN ²³Na, ³¹P et ¹H : effets de la teneur en sel (NaCl) dans des matrices alimentaires*. Université de Bourgogne, Dijon.
- Green, S. M., Delargy, H. J., Joanes, D., & Blundell, J. E. (1997). A satiety quotient: a formulation to assess the satiating effect of food. *Appetite*, 29, 291-304.
- Grimes, D. S., & Gordon, C. (1978). Satiety value of wholemeal and white bread. *The Lancet*, 312, 106.
- Guerrero, L., Guàrdia, M. D., Xicola, J., Verbeke, W., Vanhonacker, F., Zakowska, S., Sajdakowska, M., Sulmont-Rossé, C., Issanchou, S., Contel, M., Scalvedi, M. L., Granli, B. S., & Hersleth, M. (2009). Consumer-driven definitions of traditional food products and innovation in traditional foods. A qualitative cross-cultural study. *Appetite*, 52, 345-354.
- Guinard, J.-X., & Brun, P. (1998). Sensory-specific satiety: comparison of taste and texture effects. *Appetite*, 31, 141-157.
- Gutzwiller, J. P., Ke, B., Drewe, J., Hildebrand, P., Ketterer, S., Handschin, D., Winterhalder, R., Conen, D., Beglinger, & C. (1999). *Glucagon-like peptide-1 : a potent regulator of food intake in humans* (Vol. 44). London, ROYAUME-UNI: BMJ Publishing Group.
- Gutzwiller, J. P., Goke, B., Drewe, J., Hildebrand, P., Ketterer, S., Handschin, D., Winterhalder, R., Conen, D., & Beglinger, C. (1999). Glucagon-like peptide-1: a potent regulator of food intake in humans. *Gut*, 44, 81-86.
- Haber, G. B., Heaton, K. W., Murphy, D., & Burroughs, L. F. (1977). Depletion and disruption of dietary fibre. *The Lancet*, 310, 679-682.
- Halaas, J. L., Gajiwala, K. S., Maffei, M., Cohen, S. L., Chait, B. T., Rabinowitz, D., Lallone, R. L., Burley, S. K., & Friedman, J. M. (1995). Weight-reducing effects of the plasma protein encoded by the obese gene. *Science (New York, N.Y.)*, 269, 543-546.
- Harvard-School-of-Public-Health. (2008).
- Haslam, D. W., & James, W. P. T. (2005). Obesity. *The Lancet*, 366, 1197-1209.
- Heaton, K. W. (1973). Food fibre as an obstacle to energy intake. *The Lancet*, 302, 1418-1421.
- Heini, A., Lara-Castro, C., Schneider, H., Kirk, K., Considine, R., & Weinsier, R. (1998). Effect of hydrolyzed guar fiber on fasting and postprandial satiety and satiety hormones: A double-blind, placebo-controlled trial during controlled weight loss. *International Journal of Obesity*, 22, 906-909.
- Hercberg, S., Preziosi, P., Briançon, S., Galan, P., Triol, I., Malvy, D., Roussel, A.-M., & Favier, A. (1998). A Primary Prevention Trial Using Nutritional Doses of Antioxidant Vitamins and Minerals in Cardiovascular Diseases and Cancers in

- a General Population: The SU.VI.MAX Study--Design, Methods, and Participant Characteristics. *Controlled Clinical Trials*, 19, 336-351.
- Herman, Peter, C., Roth, Deborah, A., Polivy, & Janet. (2003). *Effects of the presence of others on food intake: A normative interpretation* (Vol. 129). Washington, DC, ETATS-UNIS: American Psychological Association.
- Herman, C. P., & Mack, D. (1975). Restrained and unrestrained eating. *Journal of Personality*, 43, 647-660.
- Herman, C. P., & Polivy, J. (1980). Restrained eating. In A. J. Stunkard (Ed.), *Obesity* (pp. 208-225). London: W.B. Saunders Company.
- Hetherington, M., Rolls, B. J., & Burley, V. J. (1989). The time course of sensory-specific satiety. *Appetite*, 12, 57-68.
- Hetherington, M. M. (1996). Sensory-specific satiety and its importance in meal termination. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 20, 113-117.
- Hetherington, M. M., Pirie, L. M., & Nabb, S. (2002). Stimulus satiation: effects of repeated exposure to foods on pleasantness and intake. *Appetite*, 38, 19-28.
- Hill, A. J., & Blundell, J. E. (1989). Comparison of the Action of Macronutrients on the Expression of Appetite in Lean and Obese Human Subjects. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 575, 529-531.
- Hlebowicz, J., Wickenberg, J., Fahlstrom, R., Bjorgell, O., Almer, L.-O., & Darwiche, G. (2007). Effect of commercial breakfast fibre cereals compared with corn flakes on postprandial blood glucose, gastric emptying and satiety in healthy subjects: a randomized blinded crossover trial. *Nutrition Journal*, 6, 22.
- Holt, S. H., & Petocz, J. C. (1995). A satiety index of common foods. *European Journal of Clinical Nutrition*, 49, 675-690.
- Holt, S. H. A., Brand-Miller, J. C., & Stitt, P. A. (2001). The Effects of Equal-energy Portions of Different Breads on Blood Glucose Levels, Feelings of Fullness and Subsequent Food Intake. *Journal of the American Dietetic Association*, 101, 767-773.
- Howarth, N. C., Saltzman, E., McCrory, M. A., Greenberg, A. S., Dwyer, J., Ausman, L., Kramer, D. G., & Roberts, S. B. (2003). Fermentable and Nonfermentable Fiber Supplements Did Not Alter Hunger, Satiety or Body Weight in a Pilot Study of Men and Women Consuming Self-Selected Diets. *Journal of Nutrition*, 133, 3141-3144.
- Howarth, N. C., Saltzman, E., & Roberts, S. B. (2001). Dietary fiber and weight regulation. *Nutrition Reviews*, 59, 129-139.
- Inui, A., Asakawa, A., Bowers, C. Y., Mantovani, G., Laviano, A., Meguid, M. M., & Fujimiya, M. (2004). Ghrelin, appetite, and gastric motility: the emerging role of the stomach as an endocrine organ. *The Journal of the Federation of American Societies for Experimental Biology*, 18, 439-456.
- Issanchou, S., Valentin, D., Sulmont, C., Degel, J., & Köster, E. P. (2002). Testing odor memory: incidental versus intentional learning, implicit versus explicit memory. In C. Rouby, B. Schaal, D. Dubois, R. Gervais & A. Holley (Eds.), *Olfaction, taste, and cognition* (pp. 211-230). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Jenkins, D. J., Wolever, T. M., Taylor, R. H., Barker, H., Fielden, H., Baldwin, J. M., Bowling, A. C., Newman, H. C., Jenkins, A. L., & Goff, D. V. (1981). Glycemic index of foods: a physiological basis for carbohydrate exchange. *American Journal of Clinical Nutrition*, 34, 362-366.

- Joannic, J.-L., Oppert, J.-M., Lahlou, N., Basdevant, A., Auboiron, S., Raison, J., Bornet, F., & Guy-Grand, B. (1998). Plasma Leptin and Hunger Ratings in Healthy Humans. *Appetite*, *30*, 129-138.
- Johnson, J., & Vickers, Z. (1991). Sensory-specific satiety for selected bread products. *Journal of Sensory Studies*, *6*, 65-79.
- Johnson, S. L., McPhee, L., & Birch, L. L. (1991). Conditioned preferences: young children prefer flavors associated with high dietary fat. *Physiology & Behavior*, *50*, 1245-1251.
- Kamen, J. M., & Peryam, D. R. (1961). Acceptability of repetitive diets. *Food Technology*, *15*, 173-177.
- Keogh, J. B., Lau, C. W. H., Noakes, M., Bowen, J., & Clifton, P. M. (2006). Effects of meals with high soluble fibre, high amylose barley variant on glucose, insulin, satiety and thermic effect of food in healthy lean women. *Eur J Clin Nutr*, *61*, 597-604.
- Kern, D. L., McPhee, L., Fisher, J., Johnson, S., & Birch, L. L. (1993). The postingestive consequences of fat condition preferences for flavors associated with high dietary fat. *Physiology & Behavior*, *54*, 71-76.
- Kissileff, H. R. (1984). Satiating efficiency and a strategy for conducting food loading experiments. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *8*, 129-135.
- Kissileff, H. R., Carretta, J. C., Geliebter, A., & Pi-Sunyer, F. X. (2003). Cholecystokinin and stomach distension combine to reduce food intake in humans. *American Journal of Physiology - Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, *285*, R992-R998.
- Kissileff, H. R., Pi-Sunyer, F. X., Thornton, J., & Smith, G. P. (1981). C-terminal octapeptide of cholecystokinin decreases food intake in man. *Physiology & Behavior*, *34*, 154-160.
- Kojima, M., Hosoda, H., Date, Y., Nakazato, M., Matsuo, H., & Kangawa, K. (1999). Ghrelin is a growth-hormone-releasing acylated peptide from stomach. *Nature*, *402*, 656-660.
- Lavoisier, A. (1789). *Traité élémentaire de chimie*.
- Le Magnen, J. (1956). Hyperphagie provoquée chez le Rat blanc par altération du mécanisme de satiété périphérique. *Comptes Rendus des Séances de la Société de Biologie (Paris)*, *150*, 32-34.
- Lee, Ya, P., Mori, Trevor, A., Sipsas, Sofia, Barden, Anne, Puddey, Ian, B., Burke, Valerie, Hall, Ramon, S., Hodgson, & Jonathan, M. (2006). Lupin-enriched bread increases satiety and reduces energy intake acutely. *84*, 6.
- Lee, Y. P., Mori, T. A., Sipsas, S., Barden, A., Puddey, I. B., Burke, V., Hall, R. S., & Hodgson, J. M. (2006). Lupin-enriched bread increases satiety and reduces energy intake acutely. *American Journal of Clinical Nutrition*, *84*, 975-980.
- Levine, A. S., Tallman, J. R., Grace, M. K., Parker, S. A., Billington, C. J., & Levitt, M. D. (1989). Effect of breakfast cereals on short-term food intake. *American Journal of Clinical Nutrition*, *50*, 1303-1307.
- Louis-Sylvestre, J., & Le Magnen, J. (1980). A fall in blood glucose level precedes meal onset in free-feeding rats. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *4*, 13-15.
- Lyly, M., Liukkonen, K. H., Salmenkallio-Marttila, M., Karhunen, L., Poutanen, K., & Lahteenmaki, L. (2009). Fibre in beverages can enhance perceived satiety. *European Journal of Nutrition*, *48*, 251-258.
- Maier, A. S., Vickers, Z. N., & Inman, J. J. (2002). Sensory specific satiety and switching among flavours of potato chips. *Appetite*, *39*, 246.

- Maljaars, J., Romeyn, E. A., Haddeman, E., Peters, H. P. F., & Masclee, A. A. M. (2009). Effect of fat saturation on satiety, hormone release, and food intake. *American Journal of Clinical Nutrition*, *89*, 1019-1024.
- Manthey, J., & Vickers, Z. (1996). The relationship of fiber to sensory specific satiety. *Journal of Sensory Studies*, *11*, 335-345.
- Mathern, J. R., Raatz, S. K., Thomas, W., & Slavin, J. L. (2009). Effect of Fenugreek Fiber on Satiety, Blood Glucose and Insulin Response and Energy Intake in Obese Subjects. *Phytotherapy Research*, *23*, 1543-1548.
- Mattes, R. (1990). Hunger Ratings Are Not a Valid Proxy Measure of Reported Food-Intake in Humans. *Appetite*, *15*, 103-113.
- Mattes, R. D., & Friedman, M. I. (1993). Hunger. *Digestive Diseases*, *11*, 65-77.
- Mayer, J. (1955). Regulation of energy intake and the body weight : the glucostatic theory and the lipostatic hypothesis. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *63*, 15-43.
- McCrary, M. A., Fuss, P. J., McCallum, J. E., Yao, M., Vinken, A. G., Hays, N. P., & Roberts, S. B. (1999). Dietary variety within food groups: association with energy intake and body fatness in men and women. *American Journal of Clinical Nutrition*, *69*, 440-447.
- Meiselman, H. L. (1992). Obstacles to studying real people eating real meals in real situations - response. *Appetite*, *19*, 84-86.
- Meiselman, H. L., de Graff, C., & Leshner, L. L. (2000). The effects of variety and monotony on food acceptance and intake at a midday meal. *Physiology & Behavior*, *70*, 119-125.
- Mobini, S., Chambers, L. C., & Yeomans, M. R. (2007). Effects of hunger state on flavour pleasantness conditioning at home: Flavour-nutrient learning vs. flavour-flavour learning. *Appetite*, *48*, 20-28.
- Neimeyer, G. J., & Khouzam, N. (1985). A repertory grid study of restrained eaters. *British Journal of Medical Psychology*, *58*, 365-367.
- ObEpi-Roche. (2009). Enquête épidémiologique nationale sur le surpoids et l'obésité.
- Observatoire-du-Pain. (2011). Quelle place pour le pain dans l'alimentation des Français en 2010?
- Ogden, J., & Wardle, J. (1990). Control of eating and attributional style. *Br J Clin Psychol*, *29 (Pt 4)*, 445-446.
- Ørskov, C. (1992). Glucagon-like peptide-1, a new hormone of the entero-insular axis. *Diabetologia*, *35*, 701-711.
- Ortega Anta, R., Quintas Herrero, E., Sanchez Quiles, B., Andres Carvajales, P., Requejo Marcos, A., & Encinas Sotillos, A. (1997). Underestimation of energy intake in a group of young female university students of Madrid. *Rev Clin Esp.*, *197*, 545-549.
- Ouwens, M. A., van Strien, T., & van der Staak, C. P. F. (2003). Tendency toward overeating and restraint as predictors of food consumption. *Appetite*, *40*, 291-298.
- Paddon-Jones, D., Westman, E., Mattes, R. D., Wolfe, R. R., Astrup, A., & Westerterp-Plantenga, M. (2008). Protein, weight management, and satiety. *American Journal of Clinical Nutrition*, *87*, 1558S-1561S.
- Pai, S., Ghugre, P. S., & Udipi, S. A. (2005). Satiety from rice-based, wheat-based and rice-pulse combination preparations. *Appetite*, *44*, 263-271.
- Pasman, W. J., Saris, W. H. M., Wauters, M. A. J., & Westerterp-Plantenga, M. S. (1997). Effect of One Week of Fibre Supplementation on Hunger and Satiety Ratings and Energy Intake. *Appetite*, *29*, 77-87.

- Pawlak, D. B., Ebbeling, C. B., & Ludwig, D. S. (2002). Should obese patients be counselled to follow a low-glycaemic index diet? Yes. *Obesity Reviews*, 3, 235-243.
- Pelchat, M. L., & Rozin, P. (1982). The special role of nausea in the acquisition of food dislikes by humans. *Appetite: J. for Intake Research*, 3, 341-351.
- Pereira, M. A., Jacobs, D. R., Pins, J. J., Raatz, S. K., Gross, M. D., Slavin, J. L., & Seaquist, E. R. (2002). Effect of whole grains on insulin sensitivity in overweight hyperinsulinemic adults. *American Journal of Clinical Nutrition*, 75, 848-855.
- Peters, H. P. F., Boers, H. M., Haddeman, E., Melnikov, S. M., & Qvvyjt, F. (2009). No effect of added beta-glucan or of fructooligosaccharide on appetite or energy intake. *American Journal of Clinical Nutrition*, 89, 58-63.
- Plailly, J., Luangraj, N., Nicklaus, S., Issanchou, S., Royet, J. P., & Sulmont-Rossé, C. (2011). Alliesthesia is greater for odor of fatty foods than of non-fat foods. *Appetite*, 57, 615-622.
- Porikos, K., & Hagamen, S. (1986). Is fiber satiating? Effects of a high fiber preload on subsequent food intake of normal-weight and obese young men. *Appetite*, 7, 153-162.
- Porrini, M., Crovetta, R., Testolin, G., & Silva, S. (1995). Evaluation of satiety sensations and food intake after different preloads. *Appetite*, 25, 17-30.
- Powley, T. L., & Phillips, R. J. (2004). Gastric satiation is volumetric, intestinal satiation is nutritive. *Physiology & Behavior*, 82, 69-74.
- Raben, A. (2002). Should obese patients be counselled to follow a low-glycaemic index diet? No. *Obesity Reviews*, 3, 245-256.
- Raynor, H. A., & Epstein, L. H. (2001). Dietary variety, energy regulation, and obesity. *Psychol Bull*, 127, 325-341.
- Remick, A., Polivy, J., & Pliner, P. L. (2009). Internal and external moderators of the effect of variety on food intake. *Psychol Bull*, 135, 434-451.
- Rigaud, D., Giachetti, I., Deheeger, M., Borys, J. M., Volatier, J. L., Lemoine, A., Cassuto, & D. A. (1997). *Enquête française de consommation alimentaire. I. Energie et macronutriments* (Vol. 32). Paris, FRANCE: Masson.
- Rigaud, D., Rytting, K., Leeds, A., Bard, D., & Apfelbaum, M. (1987). Effects of a moderate dietary fibre supplement on hunger rating, energy input and faecal energy output in young, healthy volunteers. A randomized, double-blind, cross-over trial. *International Journal of Obesity*, 11, 73-78.
- Rizkalla, S. W., Laromiguere, M., Champ, M., Bruzzo, F., Boillot, J., & Slama, G. (2007). Effect of baking process on postprandial metabolic consequences: randomized trials in normal and type 2 diabetic subjects. *European Journal of Clinical Nutrition*, 61, 175-183.
- Roberts, S. B. (2000). High-glycemic Index Foods, Hunger, and Obesity: Is There a Connection? *Nutrition Reviews*, 58, 163-169.
- Rolls, B. J. (1995). Carbohydrates, fats, and satiety. *American Journal of Clinical Nutrition*, 61, 960S-967S.
- Rolls, B. J. (2009). The relationship between dietary energy density and energy intake. *Physiology & Behavior*, 97, 609-615.
- Rolls, B. J., Bell, E. A., Castellanos, V. H., Chow, M., Pelkman, C. L., & Thorwart, M. L. (1999). Energy density but not fat content of foods affected energy intake in lean and obese women. *American Journal of Clinical Nutrition*, 69, 863-871.

- Rolls, B. J., Castellanos, V. H., Halford, J. C., Kilara, A., Panyam, D., Pelkman, C. L., Smith, G. P., & Thorwart, M. L. (1998). Volume of food consumed affects satiety in men. *American Journal of Clinical Nutrition*, *67*, 1170-1177.
- Rolls, B. J., Hetherington, M., & Burley, V. J. (1988). The specificity of satiety: the influence of foods of different macronutrient content on the development of satiety. *Physiol Behav*, *43*, 145-153.
- Rolls, B. J., Rolls, E. T., Rowe, E. A., & Sweeney, K. (1981). Sensory specific satiety in man. *Physiology & Behavior*, *27*, 137-142.
- Rolls, E. T., & de Waal, A. W. L. (1985). Long-term sensory-specific satiety: Evidence from an Ethiopian refugee camp. *Physiology & Behavior*, *34*, 1017-1020.
- Rolls, E. T., & Rolls, J. H. (1997). Olfactory sensory-specific satiety in humans. *Physiology & Behaviour*, *61*, 461-473.
- Romer, M., Lehrner, J., Van Wymelbeke, V., Jiang, T., Deecke, L., & Brondel, L. (2006). Does modification of olfacto-gustatory stimulation diminish sensory-specific satiety in humans? *Physiology & Behavior*, *87*, 469-477.
- Rössner, S., Von Zweigbergk, D. A. N., Öhlin, A., & Rytting, K. (1987). Weight Reduction with Dietary Fibre Supplements. *Acta Medica Scandinavica*, *222*, 83-88.
- Ruijschop, R. M. A. J., Boelrijk, A. E. M., de Graaf, C., & Westerterp-Plantenga, M. S. (2009). Retronasal Aroma Release and Satiation: a Review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *57*, 9888-9894.
- Schachter, S., & Gross, L. P. (1968). Manipulated time and eating behavior. *Journal of Personality and Social Psychology*, *10*, 98-106.
- Schlich, P. (1992). GPA ou STATIS, consensus ou compromis ? In C.-. ENITIAA (Ed.), *Sensory evaluation : European seminar*. Bruxelles: 17-20 november 1992.
- Schroeder, N., Gallaher, D. D., Arndt, E. A., & Marquart, L. (2009). Influence of whole grain barley, whole grain wheat, and refined rice-based foods on short-term satiety and energy intake. *Appetite*, *53*, 363-369.
- Schutz, H. G., & Pilgrim, F. J. (1958). A field study of food monotony. *Psychological Reports*, *4*, 559-565.
- Siegel, P. S., & Pilgrim, F. J. (1958). The effect of monotony on the acceptance of food. *The American Journal of Psychology*, *71*, 756-759.
- Slavin, J. L. (2005). Dietary fiber and body weight. *Nutrition (Burbank, Los Angeles County, Calif.)*, *21*, 411-418.
- Stevens, J., Levitsky, D. A., VanSoest, P. J., Robertson, J. B., Kalkwarf, H. J., & Roe, D. A. (1987). Effect of psyllium gum and wheat bran on spontaneous energy intake. *American Journal of Clinical Nutrition*, *46*, 812-817.
- Stone, H. (1992). Quantitative Descriptive Analysis (QDA). In R. C. Hootman (Ed.), *Describing analysis testing* (Vol. ASTM MNL 13, pp. 15-21). Philadelphia: ASTM.
- Stroebele, N., & de Castro, J. M. (2004). Television viewing is associated with an increase in meal frequency in humans. *Appetite*, *42*, 111-113.
- Stubbs, R., J. (1995). *Macronutrient effects on appetite*. Basingstoke, ROYAUME-UNI: Nature Publishing Group.
- Stunkard, A. J., & S.Messick. (1985). The three-factor eating questionnaire to measure dietary restraint, disinhibition and hunger. *Journal of Psychosomatic Research*, *29*, 71-83.

- Temple, J. L., Giacomelli, A. M., Kent, K. M., Roemmich, J. N., & Epstein, L. H. (2007). Television watching increases motivated responding for food and energy intake in children. *American Journal of Clinical Nutrition*, *85*, 355-361.
- Thompson, W. G., Rostad Holdman, N., Janzow, D. J., Slezak, J. M., Morris, K. L., & Zemel, M. B. (2005). Effect of Energy-Reduced Diets High in Dairy Products and Fiber on Weight Loss in Obese Adults. *Obesity*, *13*, 1344-1353.
- Turton, M. D., O'Shea, D., Gunn, I., Beak, S. A., Edwards, C. M. B., Meeran, K., Choi, S. J., Taylor, G. M., Heath, M. M., Lambert, P. D., Wilding, J. P. H., Smith, D. M., Ghatei, M. A., Herbert, J., & Bloom, S. R. (1996). A role for glucagon-like peptide-1 in the central regulation of feeding. *Nature*, *379*, 69-72.
- Van De Ven, M. L. H. M., Westerterp-Plantenga, M. S., Wouters, L., & Saris, W. H. M. (1994). Effects of Liquid Preloads with Different Fructose/Fibre Concentrations of Subsequent Food Intake and Ratings of Hunger in Women. *Appetite*, *23*, 139-146.
- Wansink, B. (2004). Environmental factors that increase the food intake and consumption volume of unknowing consumers. *Annual Review of Nutrition*, *24*, 455-479.
- Wansink, B., Painter, J. E., & Lee, Y. K. (2006). The office candy dish: proximity's influence on estimated and actual consumption. *Int J Obes*, *30*, 871-875.
- Wansink, B., Painter, J. E., & North, J. (2005). Bottomless Bowls: Why Visual Cues of Portion Size May Influence Intake[ast][ast]. *Obesity*, *13*, 93-100.
- Wansink, B., & Park, S. B. (2001). At the movies: how external cues and perceived taste impact consumption volume. *Food Quality and Preference*, *12*, 69-74.
- Wansink, B., Payne, C. R., & North, J. (2007). Fine as North Dakota wine: Sensory expectations and the intake of companion foods. *Physiology & Behavior*, *90*, 712-716.
- Wardle, J., Steptoe, A., Oliver, G., & Lipsey, Z. (2000). Stress, dietary restraint and food intake. *J Psychosom Res*, *48*, 195-202.
- Wardle, J., Volz, C., & Golding, C. (1995). Social variation in attitudes to obesity in children. *Int J Obes Relat Metab Disord.*, *19*, 562-569.
- Warren, J. M., Henry, C. J. K., & Simonite, V. (2003). Low Glycemic Index Breakfasts and Reduced Food Intake in Preadolescent Children. *Pediatrics*, *112*, e414-.
- Weigle, D. S., Breen, P. A., Matthys, C. C., Callahan, H. S., Meeuws, K. E., Burden, V. R., & Purnell, J. Q. (2005). A high-protein diet induces sustained reductions in appetite, ad libitum caloric intake, and body weight despite compensatory changes in diurnal plasma leptin and ghrelin concentrations. *American Journal of Clinical Nutrition*, *82*, 41-48.
- Weigle, D. S., Cummings, D. E., Newby, P. D., Breen, P. A., Frayo, R. S., Matthys, C. C., Callahan, H. S., & Purnell, J. Q. (2003). Roles of Leptin and Ghrelin in the Loss of Body Weight Caused by a Low Fat, High Carbohydrate Diet. *Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, *88*, 1577-1586.
- Welch, R. M., & Graham, R. D. (2004). Breeding for micronutrients in staple food crops from a human nutrition perspective. *Journal of Experimental Botany*, *55*, 353-364.
- Williams, A. A., & Langron, S. P. (1983). A new approach to sensory profile analysis. In J. R. Piggott (Ed.), *Flavour of distilled beverages, origin and development* (pp. 219-224). Chichester: E. Horwood.

- Willis, H., J., Eldridge, A., L., Beiseigel, J., Thomas, W., & Slavin, J., L. (2009). Greater satiety response with resistant starch and corn bran in human subjects. *Nutrition research (New York, N.Y.)*, 29, 100-105.
- Woods, S. C., Lotter, E. C., McKay, L. D., & Porte, D. (1979). Chronic intracerebroventricular infusion of insulin reduces food intake and body weight of baboons. *Nature*, 282, 503-505.
- Wren, A. M., Seal, L. J., Cohen, M. A., Brynes, A. E., Frost, G. S., Murphy, K. G., Dhillo, W. S., Ghatei, M. A., & Bloom, S. R. (2001). Ghrelin Enhances Appetite and Increases Food Intake in Humans. *Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 86, 5992-.
- Yeomans, M. R., Leitch, M., Gould, N. J., & Mobini, S. (2008). Differential hedonic, sensory and behavioral changes associated with flavor-nutrient and flavor-flavor learning. *Physiology & Behavior*, 93, 798-806.
- Zandstra, E. H., de Graaf, C., & van Trijp, H. C. M. (2000). Effects of variety and repeated in-home consumption on product acceptance. *Appetite*, 35, 113-119.
- Zandstra, E. H., de Graaf, C., van Trijp, H. C. M., & van Staveren, W. A. (1999). Laboratory hedonic ratings as predictors of consumption. *Food Quality and Preference*, 10, 411-418.
- Zandstra, E. H., Stubenitsky, K., de Graaf, C., & Mela, D. J. (2002). Effects of learned flavour cues on short-term regulation of food intake in a realistic setting. *Physiology & Behavior*, 75, 83-90.
- Zellner, D. A. (1991). How foods get to be liked: some general mechanisms and some special cases. In R. C. Bolles (Ed.), *The hedonics of taste* (pp. 199-217). Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Zhang, Y., Proenca, R., Maffei, M., Barone, M., Leopold, L., & Friedman, J. M. (1994). Positional cloning of the mouse obese gene and its human homologue. *Nature*, 372, 425-432.
- Zhao, A. Z., Bornfeldt, K. E., Beavo, & J, A. (1998). Leptin inhibits insulin secretion by activation of phosphodiesterase 3B. *American Society for Clinical Investigation*, 102, 869-873.