



HAL
open science

Évolution des propriétés physiques du bol alimentaire de biscuit au cours de la mastication

Adeline Monnet

► **To cite this version:**

Adeline Monnet. Évolution des propriétés physiques du bol alimentaire de biscuit au cours de la mastication. Microbiologie et Parasitologie. 2018. dumas-03633632

HAL Id: dumas-03633632

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03633632v1>

Submitted on 7 Apr 2022

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

**UNIVERSITE CLERMONT AUVERGNE
UNITE DE FORMATION ET DE RECHERCHE D'ODONTOLOGIE**

Année 2018

Thèse n°

T H E S E

Pour le DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE-DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement le 19 novembre 2018

par

Adeline MONNET

**EVOLUTION DES PROPRIETES PHYSIQUES
DU BOL ALIMENTAIRE DE BISCUIT
AU COURS DE LA MASTICATION**

J U R Y :

Présidente : Mme Martine HENNEQUIN, Professeur des Universités
Assesseurs : M Jean-Luc VEYRUNE, Professeur des Universités
M Pierre-Yves COUSSON, Maître de Conférences des Universités
Mme Cindy LANCE, Maître de Conférences Associé
Mme Marie-Agnès PEYRON, Chargée de Recherche, INRA

**UNIVERSITE CLERMONT AUVERGNE
UFR ODONTOLOGIE
63000 CLERMONT-FERRAND**

Président de l'Université

Directeur Général des Services

Monsieur le Professeur Mathias BERNARD
Monsieur François PAQUIS

DOYEN DE L'UFR D'ODONTOLOGIE

Madame Stéphanie TUBERT- JEANNIN
Professeur des Universités

Assesseurs

Monsieur Pierre-Yves COUSSON
Maître de Conférences des Universités

Madame Martine HENNEQUIN
Professeur des Universités

Monsieur Emmanuel NICOLAS
Professeur des Universités

Madame Valérie ROGER-LEROI
Professeur des Universités

LISTE DES PROFESSEURS

Professeurs des Universités — Praticiens hospitaliers :

Monsieur Pascal AUROY	- Prothèses
Monsieur Radhouane DALLEL	- Sciences Anatomiques
Monsieur Laurent DEVOIZE	- Pathologie et Thérapeutique Dentaires
Madame Sophie DOMEJEAN	- Odontologie Conservatrice, Endodontie
Madame Martine RENNEQUIN	- Odontologie Conservatrice, Endodontie
Monsieur Emmanuel NICOLAS	- Prothèses
Monsieur Thierry ORLIAGUET	- Sciences Biologiques
Madame Valérie ROGER-LEROI	- Sciences Biologiques
Madame Stéphanie TUBERT-JEANNIN	- Prévention, Epidémiologie
Monsieur Jean-Luc VEYRUNE	- Prothèses

Maîtres de Conférences des Universités — Praticiens hospitaliers :

Madame Marion BESSADET	- Prothèses
Monsieur Hervé BESSE	- Pédodontie
Monsieur Guillaume BONNET	- Prothèses
Monsieur Didier COMPAGNON	- Prothèses
Monsieur Pierre-Yves COUSSON	- Odontologie Conservatrice, Endodontie
Monsieur Nicolas DECERLE	- Odontologie Conservatrice, Endodontie
Monsieur Christophe DESCHAUMES	- Pathologie et Thérapeutique Dentaires
Monsieur Jean-Christophe DUBOIS	- Prothèses
Madame Christelle RICHARD	- Pédodontie
Mademoiselle Céline MELIN	- Sciences Anatomiques
Madame Estelle MACHAT	- Prévention. Epidémiologie
Monsieur Paul PIONCHON	- Sciences Anatomiques
Monsieur Dominique ROUX	- Odontologie Conservatrice, Endodontie

Professeur des Universités :

Monsieur Alain ARTOLA	- Neurosciences
-----------------------	-----------------

Maître de Conférences des Universités :

Mademoiselle Lénaïc MONCONDUIT	- Neurosciences
--------------------------------	-----------------

Professeur Certifié :

Mademoiselle Gaëlle DUCOS	- Anglais
---------------------------	-----------

Maîtres de Conférences des Universités Associés :

Madame Anne DEPREUX	- Informatique et Pédagogie
Madame Anne DUONSEILLE	- Sciences Biologiques
Madame Cindy LANCE	- Prothèses
Monsieur Pierre-Henri WEILBACHER	- Sciences de Gestion

SOMMAIRE

<u>PRÉAMBULE</u>	2
<u>1. INTRODUCTION</u>	3
<u>2. MATERIEL ET MÉTHODE</u>	6
2.1. SUJETS.....	6
2.2. ALIMENT TEST.....	8
2.3. MÉTHODES DE CARACTÉRISATION DU BOL ALIMENTAIRE.....	9
2.3.1. Physiologie de la formation du bol.....	9
2.3.1.1. <i>Description de la méthode</i>	9
2.3.1.2. <i>Extraction des données</i>	10
2.3.2. Granulométrie.....	10
2.3.2.1. <i>Description des méthodes</i>	10
2.3.2.2. <i>Extraction des données</i>	11
2.3.3. Tests de compression des bols alimentaires.....	12
2.3.3.1. <i>Description de la méthode</i>	12
2.3.3.2. <i>Extraction des données</i>	13
2.4. DESIGN EXPÉRIMENTAL.....	14
2.5. STATISTIQUES.....	16
<u>3. RÉSULTATS</u>	17
3.1. CINEMATIQUE DE LA MASTICATION AU COURS DE LA FORMATION DU BOL ALIMENTAIRE.....	17
3.2. EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES DU BOL ALIMENTAIRE DE BISCUIT AU COURS DE SA FORMATION.....	18
3.2.1. Evolution de la masse du bol alimentaire au cours de sa formation.....	18
3.2.2. Evolution de la granulométrie du bol alimentaire au cours de sa formation....	19
3.2.2.1. <i>Tamisage manuel</i>	19
3.2.2.2. <i>Tamisage virtuel par analyse d'image</i>	20
3.2.3. Evolution des caractéristiques rhéologiques du bol alimentaire au cours de sa formation.....	21
<u>4. DISCUSSION</u>	22
<u>5. CONCLUSION</u>	25
<u>ANNEXE</u>	26
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	33

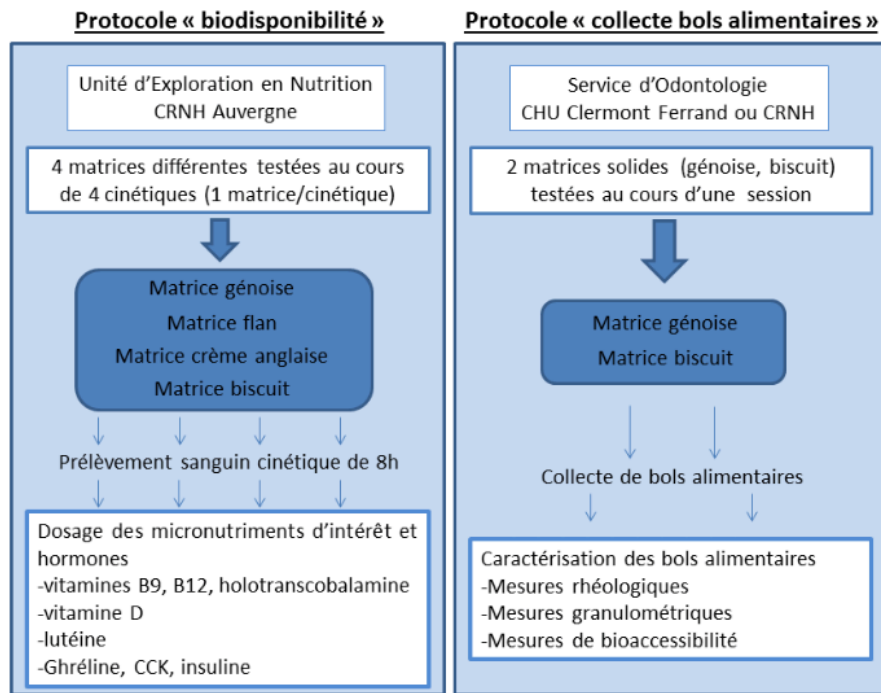


Figure 1 : Schéma général de l'étude MICRONUT

PRÉAMBULE

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre d'une étude plus large nommée MICRONUT.

Dans le cadre de cette étude nationale financée par l'Institut Carnot Qualiment, l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) et le Centre de Recherche en Nutrition Humaine (CRNH) ont pour objectif de comprendre comment la structure/texture des aliments impacte la biodisponibilité des micronutriments. En effet, qu'il s'agisse des glucides, des lipides ou des protéines, l'impact de la structure de l'aliment peut moduler la libération (bioaccessibilité) et/ou l'absorption (biodisponibilité) des nutriments, ainsi que leurs cinétiques respectives.

Deux matrices alimentaires solides (biscuit et génoise) et deux matrices semi-solides (flan et crème anglaise), toutes quatre enrichies en vitamines D, B9, B12 et en lutéine, de composition constante mais de structures différentes, sont conçues et testées dans le cadre des deux protocoles qui constituent cette étude (**Figure 1**).

Le premier protocole portant sur l'analyse de la biodisponibilité a pour but d'étudier la cinétique de biodisponibilité des micronutriments ciblés (vitamines B9, B12, D et lutéine) des quatre matrices alimentaires différentes. Chaque sujet volontaire doit réaliser quatre cinétiques, au cours desquelles il aura à consommer une des quatre matrices, dans un ordre aléatoire. Pendant chacune des séances de cinétique, d'une durée de 8h, des prélèvements sanguins à intervalle régulier seront réalisés.

Le deuxième protocole portant sur l'analyse des propriétés physiques des bols alimentaires s'articulait autour de l'étude des propriétés rhéologiques et granulométriques des bols alimentaires des deux matrices solides. De plus une analyse biochimique de la libération des micronutriments d'intérêt (bioaccessibilité orale) était prévue sur les bols alimentaires collectés.

Le travail de thèse présenté dans ce mémoire a été réalisé dans le cadre du 2^{ème} protocole de l'étude MICRONUT.

1. INTRODUCTION

La bouche est le siège de nombreuses fonctions physiologiques essentielles aux besoins de l'organisme, telles que la respiration, la mastication, la déglutition, ou encore la succion, la phonation, etc.

La mastication a pour rôle majeur de transformer l'aliment solide en un bol alimentaire prêt à être dégluti, de manière indolore et sans risque de fausse route (Lillford, 1991 ; Prinz et Lucas, 1995 ; Mishellany et al, 2006 ; Woda et al, 2006). Cette transformation se fait par la réduction mécanique de l'aliment en fragments de plus petite taille et leur lubrification par la salive produite et les liquides et jus libérés par l'aliment lui-même. Le mélange formé est cohésif, visqueux, plastique, et les différents éléments sont agrégés entre eux mais n'adhèrent pas aux muqueuses buccales. Le bol ainsi formé peut s'écouler doucement et en sécurité le long des parois pharyngiennes au cours de la déglutition (Jalabert Malbos et al, 2007 ; Peyron et al, 2011 ; Peyron et al, 2014).

La séquence masticatoire commence avec l'introduction de l'aliment dans la bouche et se termine avec la déglutition du bol alimentaire. Elle est constituée d'une succession rythmique de cycles masticatoires, chacun de ces cycles débutant par un mouvement d'ouverture suivi d'un mouvement de fermeture de la mâchoire (Woda et al, 2006).

L'activité rythmique et la coordination des mouvements de la mastication sont générées et contrôlées par un centre moteur situé au niveau du tronc cérébral, appelé CPG (Central Pattern Generator). Ce groupe de neurones produit des schémas moteurs rythmiques et organisés, constituant les caractéristiques de base de la mastication de manière automatique, au même titre que la locomotion ou la respiration. Son activité est modulée par des informations en provenance de centres supérieurs (cortex par exemple) et par des afférences périphériques sensibles provenant de différents récepteurs intra-oraux, articulaires et musculaires, qui apportent en continu des informations sur le déroulement de la mastication et sur l'évolution des propriétés physiques du bol alimentaire. Cette interaction avec le système de contrôle central permet d'adapter la dynamique de la mastication aux caractéristiques de l'aliment, en temps réel (Lund, 1991).

Parmi les multiples modifications de propriétés physiques qui caractérisent le bol à la fin de la mastication, certaines doivent être, selon certains auteurs, des stimuli nécessaires au déclenchement de la déglutition. Ces caractéristiques du bol et leurs perceptions ont été conceptualisées en « seuil de déglutition », notion simple qui définit la qualité du bol alimentaire et le moment où il peut être dégluti. Bien que de définition relativement simple, la notion de seuil de déglutition renferme beaucoup de complexité au vu de la multiplicité des caractéristiques physiques et de leurs combinaisons possibles qui peuvent être perçues et initier la déglutition (Peyron et al, 2011). Un

modèle théorique des propriétés du bol pouvant être dégluti est basé sur l'existence de deux paramètres évalués : la taille des particules (« seuil de structure ») et la teneur en humidité (« seuil de lubrification »). Prinz et Lucas (1995) ont proposé un modèle de déglutition optimum avec comme critère unique la force de cohésion du bol alimentaire, regroupant les deux paramètres précédents. La déglutition interviendrait au moment où la cohésion serait maximale entre les particules alimentaires et la salive.

La description aussi bien qualitative que quantitative de la transformation mécanique de l'aliment au cours de la mastication peut donc se faire selon deux types d'approches, mises en œuvre séparément ou associées : l'analyse de la taille des particules et/ou le comportement rhéologique du bol alimentaire.

La distribution granulométrique du bol alimentaire est très fortement dépendante des propriétés de l'aliment solide ingéré (Peyron et al, 2004 ; Jalabert-Malbos et al, 2007). Par exemple, au moment de la déglutition, un bol de carotte crue est constitué d'une forte proportion de grosses particules, au contraire des amandes ou des cacahuètes qui ne pourront être dégluties que lorsque le bol aura été réduit en particules beaucoup plus petites (Peyron et al, 2004 ; Mishellany et al, 2006). Les propriétés rhéologiques du bol alimentaire sont d'autres paramètres physiques mesurables, encore assez peu étudiés à ce jour, permettant de caractériser le bol alimentaire. Ce type de mesure, appliqué au bol alimentaire de céréales de petit déjeuner, a permis par exemple de mettre en évidence que le seuil de déglutition serait une combinaison des propriétés rhéologiques et granulométriques permettant la déglutition (Peyron et al, 2011).

L'état dentaire est un facteur influençant la déstructuration mécanique de l'aliment. Des individus porteurs de prothèses amovibles totales ne sont pas capables de réduire les aliments en particules de taille suffisamment petite, même s'ils mastiquent plus longtemps que d'autres individus, du même âge mais présentant un bon état bucco-dentaire (Mishellany-Dutour et al, 2008). Le vieillissement physiologique normal sans pathologies associées consiste principalement en une diminution de la masse musculaire et de la force maximale de morsure (Newton et al, 1987). Ces changements sont modestes, d'installation lente, et leurs impacts sur la mastication sont suffisamment faibles pour être compensés dans une certaine limite par une adaptation des paramètres physiologiques de la mastication (augmentation de l'activité musculaire, de la durée de la séquence masticatoire et du nombre de cycles) (Mishellany-Dutour et al, 2008). Cependant, le vieillissement va de paire avec de nombreux facteurs confondants tels que la perte de dents (remplacées ou non par une prothèse amovible), la diminution de la force et de la motilité de la langue, la diminution de la production de salive, l'augmentation des seuils sensoriels des récepteurs intra-oraux ainsi que l'apparition de pathologies diverses et leurs médications. Ces changements ont un impact réel et cumulatif en terme de diminution de la performance de mastication : le bol alimentaire dégluti n'est pas suffisamment

déstructuré, il est de consistance trop dure, ce qui est encore aggravé par le déficit salivaire ou le port de prothèses amovibles (Peyron et al, 2008 et 2011). Outre le risque de refus, ou de fausse-route, cette altération grave de la mastication entraîne au terme du processus de digestion une modification de la bioaccessibilité des nutriments, donc de l'état nutritionnel des personnes âgées (Rémond et al, 2007).

Le rôle de la mastication est donc la réduction et la déstructuration progressivement l'aliment en fragments alimentaires au fur et à mesure des cycles d'ouverture et fermeture de la mâchoire, en même temps que son insalivation afin d'obtenir un degré de cohésion du bol alimentaire et une teneur en eau compatible avec la déglutition. La mastication s'adapte à l'aliment, et donc à ses propriétés physiques dont la dureté (Woda et al, 2006).

Nous avons voulu tester l'évolution de cette déstructuration mécanique sur une matrice alimentaire solide de dureté conséquente et à faible teneur en eau, dont les propriétés physiques sont donc suffisamment éloignées de celles d'un bol alimentaire compatible avec la déglutition pour objectiver une évolution manifeste de ses paramètres.

L'objectif de ce travail de thèse était de proposer une description de l'évolution des caractéristiques physiques du bol alimentaire de biscuit, grâce à des analyses mécaniques effectuées sur des bols alimentaires mastiqués par des volontaires présentant une bonne mastication, et collectés à deux moments différents de la séquence masticatoire : à la moitié de la séquence d'une part, et juste avant la déglutition d'autre part.

2. MATERIEL ET METHODE

2.1. SUJETS

Les sujets de ce travail de thèse sont les volontaires sélectionnés pour participer à l'ensemble des protocoles de l'étude nationale MICRONUT, menée par l'INRA et le CRNH. Son objectif principal est d'étudier l'impact de la structure des aliments sur la biodisponibilité plasmatique des micronutriments chez l'homme, et son objectif secondaire est d'étudier la déstructuration en bouche de matrices alimentaires solides et ses conséquences sur la bioaccessibilité de nutriments dans la salive.

Les douze sujets volontaires ont été recrutés parmi les étudiants de la faculté de chirurgie dentaire de Clermont-Ferrand. Leur inclusion dans l'étude a été réalisée en deux temps.

Une « pré-inclusion » a d'abord été réalisée à l'aide d'une fiche d'inclusion réalisée spécifiquement pour l'étude, comportant un récapitulatif des principaux critères de santé générale et un examen clinique dentaire détaillé (**Annexe 1**). Cette étape a constitué la première partie conséquente de ce travail de thèse.

Les sujets ont ensuite été soumis à un bilan médical avec examen clinique et bilan biologique réalisés par le médecin investigateur de l'Unité d'Exploration Nutritionnelle du CRNH. Les micronutriments d'intérêt testés étant les vitamines B9, B12, D et la lutéine, un bilan vitaminique normal est requis.

Lors de la visite médicale de sélection l'ensemble du protocole a été expliqué de façon complète et loyale aux sujets, sur la base d'une fiche d'information, et l'accord écrit du sujet a été recueilli par la signature de la fiche de consentement et de l'accord de participation. L'ensemble du protocole a été soumis et approuvé par le Comité de Protection des Personnes (CPP Nord-Ouest 3) et l'ANSM.

Une indemnité de 500€ était prévue pour la participation des volontaires à la totalité du protocole de recherche.

Critères d'inclusion des sujets :

- Homme
- Age de 20 à 30 ans (bornes incluses)
- Non fumeur depuis au moins 6 mois
- Absence de pathologie avérée et de traitement
- Absence d'antécédents de lithiase calcique
- $IMC \geq 20$ et ≤ 30 kg/m²
- Bilan biologique normal
- Pas d'aversion pour les différents aliments testés
- Bon état dentaire, pas de douleur, pas de soins en cours
- Pas de traitement orthodontique depuis 3 ans
- Sujet possédant un nombre de couple d'unités fonctionnelles > 5
- Personne ayant signé la fiche d'information et de consentement

Critères d'exclusion des sujets :

- Antécédents médicaux au chirurgicaux jugés par l'investigateur comme étant non compatibles avec l'étude
- Hypercalcémie, hyperphosphorémie
- Pathologie connue
- Allergie ou intolérance à l'un des constituants des matrices testées
- Prise de complément alimentaire et/ou d'Uvédose® durant les 3 mois précédent l'étude
- Exposition aux UV (voyages, séances d'UV) dans les deux semaines précédent l'étude et durant toute la durée de l'étude
- Dosage en vitamine D > 80 µg/L
- Sujet présentant des douleurs lors de la mastication ou des craquements ou claquements articulaires majeurs
- Refus de signature de la fiche d'information et de consentement
- Sujet sous tutelle, curatelle, privé de liberté ou sous sauvegarde de justice
- Refus d'inscription au fichier national des volontaires aux recherches biomédicales
- Personne en période d'exclusion sur le fichier des volontaires sains



Figure 2 : Echantillons de biscuits de 4g et 8g, pesés et annotés, nécessaires à la réalisation d'une session de mastication avec un volontaire.

2.2. ALIMENT TEST

L'étude clinique complète a été menée avec quatre matrices différentes, deux semi-solides (crème anglaise et flan) et deux solides (génoise et biscuit), dont la composition en macronutriments et micronutriments était identique sur la base de leur matière sèche. Seules les matrices solides ont été testées lors des protocoles de mastication et collecte des bols alimentaires.

Pour ce travail de thèse seul le biscuit a été retenu.

Cette matrice solide est constituée principalement d'œuf (sous forme de poudres), de protéines végétales de blé et de pois, de sucre, d'huile et d'eau, et complétée en micronutriments (vitamines).

La fabrication de cette matrice alimentaire a été mise au point et réalisée au sein de l'unité de Science et Technologie du Lait et de l'Œuf (STLO) de l'INRA de Rennes.

Les contrôles microbiologiques ont été réalisés sur produit fini, conformément à la réglementation. Les biscuits ont ensuite été découpés en pavés d'environ 5x4x1 cm, conditionnés sous vide, étiquetés puis congelés et acheminés congelés jusqu'au lieu de réalisation des protocoles l'étude.

La veille de leur utilisation, les matrices type biscuit ont été décongelées au réfrigérateur à la température de +4°C. Le jour de leur utilisation elles étaient placées à température ambiante et découpées en deux types d'échantillon :

- Échantillons de $4,0 \pm 0,1$ g (pavés d'environ 2,5 cm de côté sur 1 cm d'épaisseur)
- Échantillons de $8,0 \pm 0,1$ g (pavés d'environ 4 x 2,5 x 1 cm).

Chacune de ces deux tailles d'échantillon est nécessaire afin de répondre aux contraintes expérimentales.

Les échantillons étaient répartis sur des plateaux recouverts d'aluminium, avec la masse correspondante à chacun annotée en dessous (**Figure 2**).

Pour la totalité des protocoles de collecte de bols alimentaires 312 échantillons de biscuit de 4g ont été utilisés ainsi que 120 échantillons de biscuit de 8g.

2.3. METHODES DE CARACTÉRISATION DU BOL ALIMENTAIRE

2.3.1. Physiologie de la formation du bol

2.3.1.1. *Description de la méthode*

La mastication, première étape de la digestion, met en jeu plusieurs activités motrices et sensorielles afin de transformer la nourriture en un bol alimentaire compatible avec une déglutition correcte, sans douleur et sans risque de fausse-route.

Pour notre étude, les paramètres objectivables de la phase masticatoire ont été relevés et notés sur le cahier d'observation pour chaque volontaire et pour chaque séquence de mastication (**Annexe 2**):

- la masse initiale de l'échantillon mis en bouche, en gramme (g),
- la masse finale du bol alimentaire formé, en gramme (g),
- le nombre total de cycles masticatoires réalisés pour la formation complète du bol alimentaire,
- la durée de la séquence masticatoire en secondes (s), mesurée à partir du premier coup de dent jusqu'aux mouvements de rassemblement des particules du bol, avant sa collecte.

Pour chaque volontaire, plusieurs types de bols ont été réalisés à partir de la matrice alimentaire concernée.

Pour les premiers types de bols, le volontaire a eu pour instruction de recracher le bol alimentaire au moment naturel de son réflexe de déglutition. Ces bols ont été appelés « bols déglutis » (B_{deg}).

A partir de ces premiers bols, le nombre moyen de cycles masticatoires réalisés par le sujet a été divisé par deux, définissant ainsi le moment de la réalisation de la moitié de sa séquence de mastication. Des bols ont ensuite été collectés chez le même sujet après réalisation de la moitié de sa séquence de mastication (en terme de nombre de cycles). Pour cela, le sujet était expérimentalement stoppé par l'expérimentateur pour recracher le bol avant la poursuite de la mastication. Ces bols ont été nommés « demi-bols » ($B_{1/2}$) et devaient permettre une analyse cinétique de la formation du bol alimentaire au cours de la mastication.

Ces deux types de bols ont été réalisés pour les échantillons de 4g comme pour les échantillons de 8g.

Au total, chaque volontaire a eu à réaliser :

- 13 « bols déglutis » à partir des échantillons de 4g
- 13 « demi-bols » à partir des échantillons de 4g
- 5 « bols déglutis » à partir des échantillons de 8g
- 5 « demi-bols » à partir des échantillons de 8g



Figure 3 : Toile de Séphadex préparée avec une douchette.

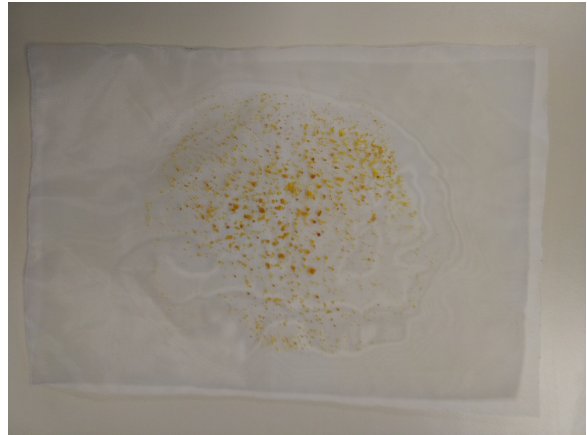


Figure 4 : Toile de Séphadex « chargée ».



Figure 5 : Colonne de tamis en acier inoxydable.



Figure 6 : Coupelles contenant les particules retenues par chaque tamis avant la pesée, et pinceau à poils synthétiques souples.

2.3.1.2. Extraction des données

Les données issues de l'observation des mastications ont été traitées avec le logiciel Excel®.

Pour chaque sujet et pour chaque type de bol ($B_{1/2}$ et B_{deg}), les valeurs de nombre de cycles masticatoires, de durée de séquence et de fréquence de mastication ont été moyennées et comparées.

2.3.2. Granulométrie

2.3.2.1. Description des méthodes

La capacité du sujet à dégrader un aliment est un des critères fondamentaux de la fonction masticatrice.

Deux techniques différentes de granulométrie parmi les nombreuses méthodes validées ont été utilisées dans ce travail : le tamisage manuel par voie sèche d'une part et le tamisage virtuel d'autre part.

Pour chaque sujet et pour chacun des types de bol ($B_{1/2}$ et B_{deg}), cinq bols pour le tamisage manuel et cinq bols pour le tamisage virtuel ont été réalisés en tant que répétitions.

Tamisage manuel réalisé à sec :

Juste après sa collecte, le bol alimentaire est déposé sur une toile de tamis souple dont les mailles sont calibrées à 0,3mm (Sephra Nitex, Suisse). Il est rincé pendant 10 à 30 secondes avec une douchette d'eau froide pour séparer et répartir les particules alimentaires sur la toile, afin d'obtenir par la suite un séchage à l'étuve homogène (**Figures 3 et 4**). La toile ainsi « chargée » de particules du bol alimentaire est ensuite déposée sur du papier absorbant afin d'éliminer les excès d'eau, puis laissée à l'étuve à 37°C pendant sept minutes.

Les particules ainsi séchées sont collectées à l'aide d'un pinceau à poils rigides, et déposées au sommet d'une colonne de tamis en acier inoxydable (**Figure 5**). Les tamis sont placés de haut en bas dans un ordre décroissant en terme de taille de mailles (4 ; 2,5 ; 2 ; 1,4 ; 1 ; 0,8 et 0,4 mm), retenant donc des particules de plus en plus petites au fur et à mesure du passage du bol, de haut en bas. La répartition des particules sur les différents tamis est réalisée à l'aide d'un pinceau à poils synthétiques souples (type pâtisserie) afin d'éviter toute déformation et tout passage « en force » à travers les mailles.

Enfin, les particules retenues par chaque tamis sont collectées dans une coupelle préalablement tarée, puis pesées à la balance de précision (**Figure 6**).

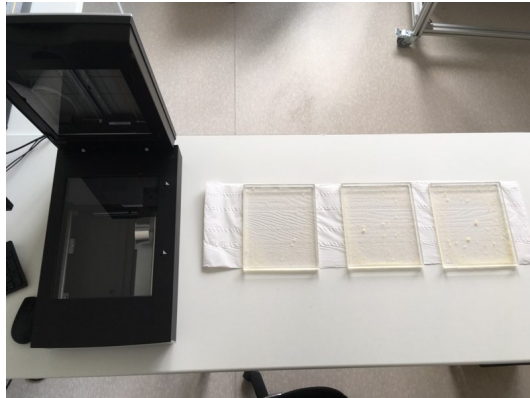


Figure 7 : Plaques de verre contenant le bol alimentaire dispersé dans le mélange de glycérol et d'eau, prêtes à être scanner.

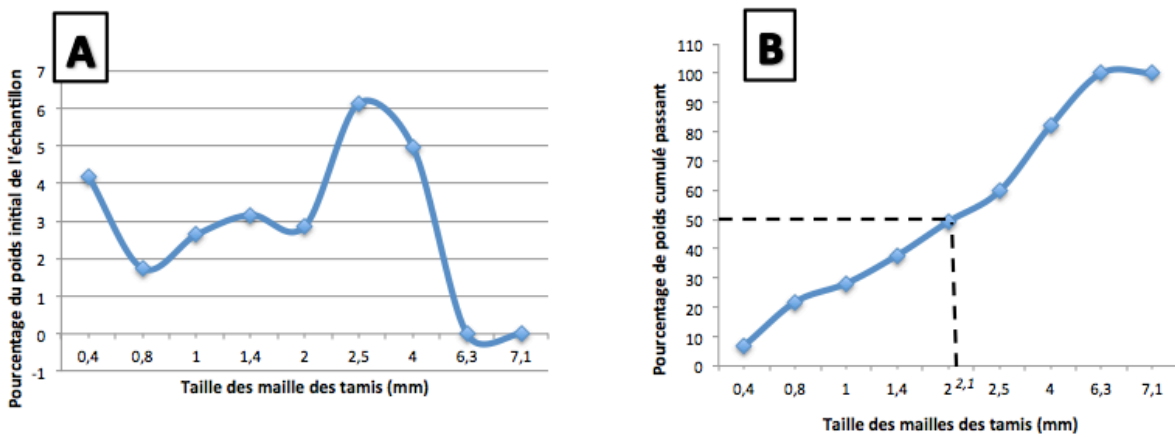


Figure 8 (A et B) : Courbe type de distribution granulométrique obtenue par tamisage manuel d'un bol de biscuit où les poids de particules sont exprimés en pourcentage du poids initial de l'échantillon mis en bouche (A) ou en pourcentage de poids cumulé passant (B). La valeur de d_{50} (2,1mm) représentant la médiane de la taille des particules constituant le bol est extraite à partir de la courbe de pourcentage du poids cumulé passant.

Tamissage virtuel par analyse d'image :

Le tamissage virtuel est réalisé grâce à la numérisation du bol alimentaire et à l'extraction des données de taille des particules alimentaires.

Le bol collecté est placé dans 200mL d'un mélange de glycérol (à 80%) et d'eau, ce qui permet, outre sa conservation, la désagrégation des particules entre elles et leur répartition au sein de la masse liquide transparente et incolore, par simple agitation manuelle.

Le mélange visqueux contenant les particules du bol est ensuite étalé équitablement sur trois plaques rectangulaires en verre réalisées sur mesure, pour être scannées (**Figure 7**).

Deux logiciels de traitement de l'image (GIMP® et Image-J®) sont successivement nécessaires afin d'extraire sous forme de feuilles de calcul les aires respectives de toutes les particules du bol ainsi scannées.

Ces données sont ensuite traitées et analysées sur le logiciel Excel® afin de répartir les particules sur des tamis virtuels, par comparaison entre leur aire et celle des mailles des tamis. Par souci de cohérence, les tailles de maille des tamis virtuels choisies et utilisées correspondent aux mailles de la colonne en acier utilisée dans la technique de tamissage manuel.

2.3.2.2. Extraction des données

Tamissage manuel réalisé à sec :

Le traitement Excel® des masses de particules retenues par chaque tamis permet de déterminer, pour chaque bol, différentes caractéristiques :

- Le poids de particules récupérées sur chaque tamis, rapporté au poids initial de l'échantillon initial est alors exprimé en pourcentage : on parle de distribution granulométrique, qu'on peut tracer sous forme de courbe (**Figure 8 A**).
- Le poids de particules cumulées, retenues par chacun des tamis. Pour un tamis x, cette valeur correspond à la somme du poids retenu par x et des poids retenus par les tamis précédents.
- Le pourcentage de poids de particules cumulées.
- Le pourcentage de poids cumulé passant de particules. Pour un tamis x, cette valeur correspond au pourcentage en terme de poids des particules n'étant retenues ni par x ni par les tamis précédents (**Figure 8 B**).
- La médiane ou d50 de chacune des courbes de pourcentage de poids cumulé passant correspond à la valeur de maille virtuelle d'un tamis qui partagerait le bol en deux parties égales. Pour un tamis imaginaire dont les mailles seraient calibrées à la valeur de d50, on considère que 50% du poids des particules du bol seraient retenus tandis que 50% passeraient (**Figure 8 B**).

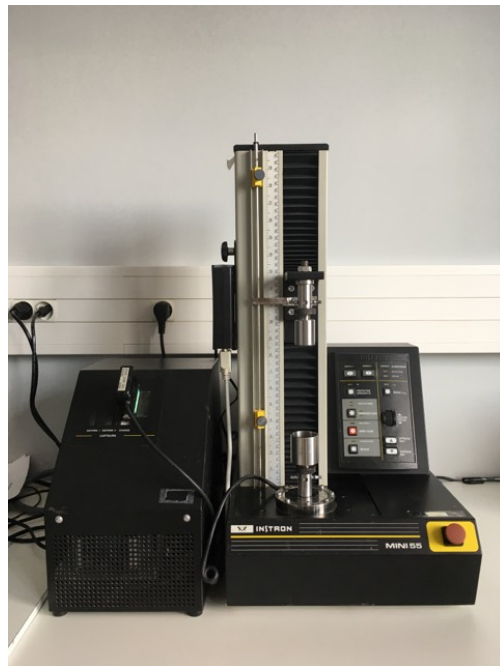


Figure 9 : Machine d'essai Instron®, avec piston et récipient pour tests de compression des bols alimentaires.

Tamissage virtuel par analyse d'image :

Le tamissage virtuel est une alternative au tamissage manuel développé dans l'idéal pour s'affranchir des contraintes temporelles et des variabilités inter- et intra-expérimentateur. Cette technique permet également d'éviter le traitement du bol alimentaire par les étapes à risque de perte de particules du bol dans l'eau et à l'étuve.

Les données extraites du tamissage virtuel sont donc en analogie avec celles du tamissage manuel mais elles sont exprimées en aire et non en poids. On analyse donc pour chaque bol alimentaire :

- Le pourcentage de particules « classées » sur chaque tamis virtuel.
- Le pourcentage d'aires cumulées « passantes » pour chaque tamis virtuel.
- La médiane ou d50, pour laquelle 50% de l'aire des particules alimentaire seraient « retenus » et 50% « passeraient ».

2.3.3. Tests de compression des bols alimentaires

2.3.3.1. Description de la méthode

Les propriétés rhéologiques des bols alimentaires sont des données physiques caractéristiques qui permettent de qualifier un aliment dans un contexte sensoriel.

Pour notre étude un test de double compression appelé « Texture Profile Analysis » (TPA) a été réalisé à un taux de 65% de déformation afin d'étudier le comportement de la matrice alimentaire face à une contrainte. Initialement décrit par Bourne (1968) et Breene (1975) puis par de nombreux chercheurs dont Szczesniak et al (2002), le TPA est habituellement utilisé en science des aliments pour caractériser les produits alimentaires. Ce test a également déjà été utilisé pour caractériser le bol alimentaire (Peyron et al, 2011).

Le test a été exécuté avec une machine d'essai Instron® (Instron® mini55, UK) équipé d'un récipient cylindrique ($\varnothing = 35$ mm) dans lequel le bol alimentaire est placé. Au dessus, un piston plat ($\varnothing = 28$ mm) est actionné afin de réaliser les compressions du bol, tandis que les informations sont recueillies par une cellule de charge de 500N (**Figure 9**).

Les informations sont ensuite sauvegardées par le logiciel BlueHill®.

Le bol subit deux cycles de compression successifs simulant deux morsures, à une vitesse de déplacement constante de 50 mm/min. Chacune des compressions a été programmée de manière identique, avec un taux de déformation de 65% de la hauteur initiale du bol, ce qui est considéré comme étant une contrainte destructrice.

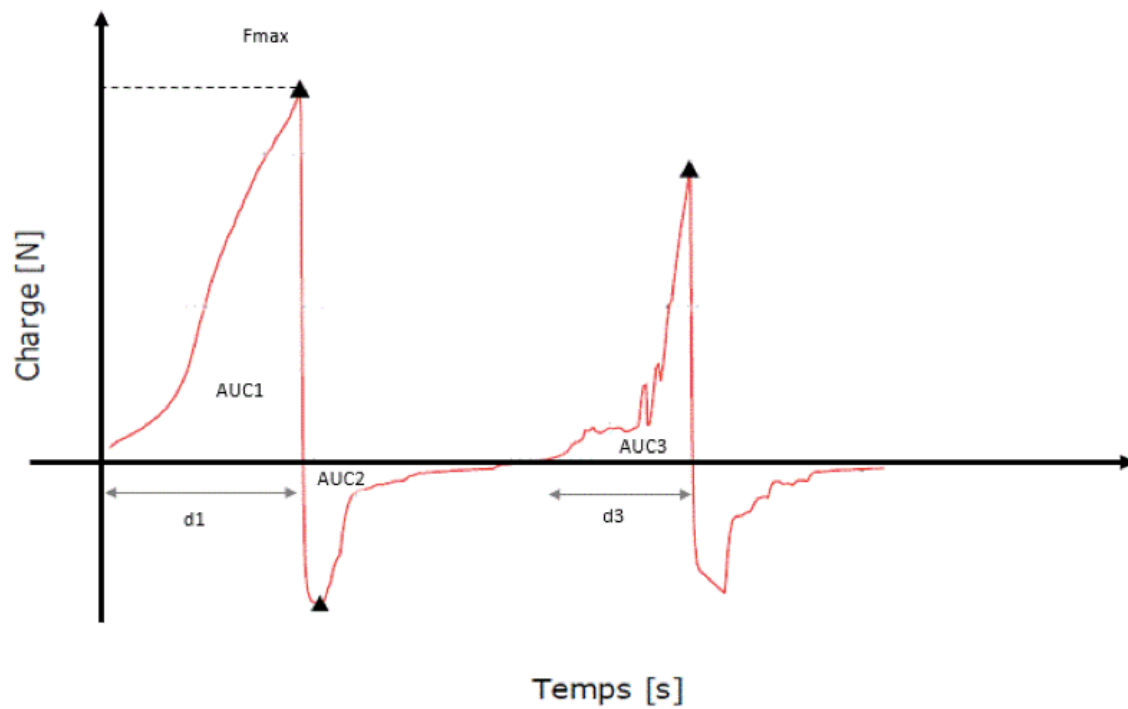


Figure 10 : Courbe type obtenue au cours d'un test de compression « Texture Profile analysis » (TPA), permettant d'extraire les différentes valeurs caractéristiques du bol : la force maximale de première compression (F_{max}), les aires sous la courbe des trois pics (AUC 1, AUC 2, AUC 3), ainsi que les distances $d1$ et $d3$.

Le protocole de test de compression a été mis au point à partir d'échantillons de matrice alimentaire de 8g, les échantillons de 4g formant des bols alimentaires insuffisants en terme de volume pour l'obtention de résultats probants et reproductibles.

Pour chaque sujet et pour chacun des types de bol ($B_{1/2}$ et B_{deg}), cinq bols différents (répétitions) ont été analysés par le test TPA.

Le protocole de mise en œuvre a été le suivant :

- a) à la fin de la mastication, la totalité du bol est recueillie et placée dans le récipient cylindrique de l'Instron®,
- b) le piston supérieur est actionné en descente manuelle jusqu'au contact avec la surface du bol détectée par une résistance n'excédant pas 0,25 Newton, afin d'éviter une pré-compression du bol,
- c) réalisation des deux cycles de compression successifs à 65% de déformation du bol,
- d) les données acquises sont traitées et analysées par le logiciel BlueHill®.

2.3.3.2. Extraction des données

L'analyse des données de test TPA par le logiciel BlueHill® permet d'obtenir des courbes de force en fonction du déplacement pour chaque bol testé (**Figure 10**). A partir de ces courbes certaines valeurs physiques caractéristiques du bol alimentaire sont extraites : la dureté, le collant, la cohésion et l'élasticité.

La dureté est la force maximale (F_{max}) relevée au cours de la première compression. Elle représente la résistance du bol alimentaire à la compression et s'exprime en Newtons (N).

Le caractère collant du bol alimentaire est représenté par l'aire sous la deuxième courbe de la première compression (Area Under Curve 2 ou AUC 2). Elle apparaît à la fin de la première compression, lorsque le piston de compression commence sa remontée. La valeur absolue de cette valeur négative est extraite, elle est exprimée en Newton.seconde (N.s).

La cohésion du bol alimentaire est assimilée au rapport entre l'aire sous la courbe de la deuxième compression (AUC 3) et l'aire sous la courbe de la première compression (AUC 1). C'est une valeur sans unité.

L'élasticité est estimée par le rapport entre la valeur de d_3 et d_1 , qui correspondent aux distances parcourues par le piston entre la valeur de charge la plus faible et la plus élevée pour chaque pic positif de compression. Ce rapport est sans unité.

Pour chaque sujet, les valeurs obtenues pour les mesures faites sur les cinq bols de chaque type ont été moyennées pour être comparées.

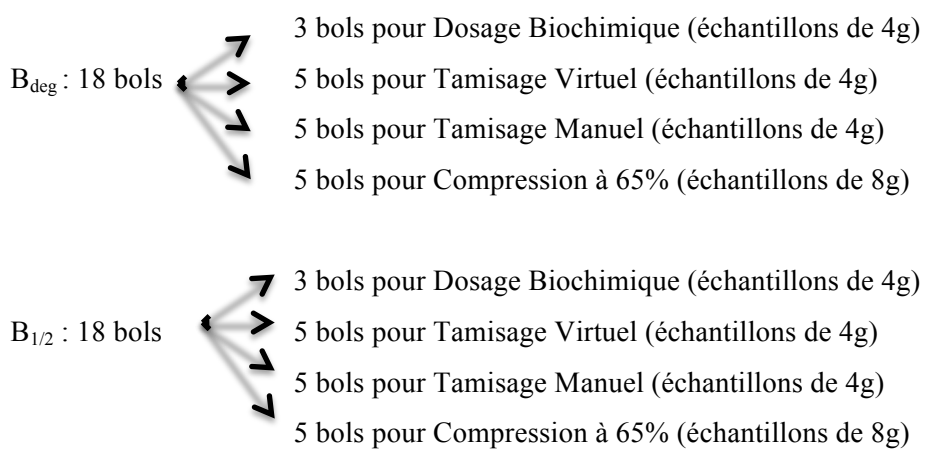


Figure 11 : Schéma du protocole expérimental.

2.4. DESIGN EXPÉRIMENTAL

Les volontaires ont été recrutés pour participer à l'ensemble de l'étude nationale MICRONUT, qui comprend deux protocoles complémentaires.

Le premier consiste en quatre sessions de cinétique de 8h réalisées au CRNH où le volontaire a dû consommer chaque fois une matrice alimentaire sur les quatre testées, selon un ordre randomisé (biscuit, crème anglaise, flan et génoise). L'enregistrement et l'analyse des prélèvements sanguins ont pour but de déterminer la biodisponibilité plasmatique en micronutriments pour chacune des matrices.

Le deuxième protocole comporte deux sessions de collecte de bols alimentaires de 2h30 et 30min, réalisées au Centre de Recherche en Odontologie Clinique (Laboratoire CROC). La crème anglaise et le flan ne nécessitant pas d'activité masticatoire, seules les matrices solides (biscuit et génoise) du protocole précédent ont été testées. Deux types de bols ont été collectés. La moitié des bols analysés a été collectée après interruption expérimentale au milieu de la séquence masticatoire ($B_{1/2}$) et l'autre moitié des bols a été collectée juste avant la déglutition (B_{deg}). Différentes analyses de caractérisation physique de bol ont été réalisées pour chaque type de bol recueilli, par des mesures granulométriques et rhéologiques. Des analyses biochimiques sur la phase liquide des bols alimentaires ont été réalisées pour estimer la quantité de micronutriments libérée par la déstructuration de la matrice alimentaire au cours de la mastication. Cette étape de dosages biochimiques a été réalisée à l'INRA de Theix mais les résultats sont encore en cours d'analyse. La décision d'organiser la collecte des bols en deux sessions plutôt qu'une seule a été motivée par la lourdeur des protocoles cliniques en terme de temps d'une part, et par le nombre conséquent d'expérimentateurs requis et leur disponibilité d'autre part.

Les deux sessions de mastication ont été réalisées le matin, le sujet ayant eu pour consigne de prendre un petit déjeuner « habituel ». Une fois installé sur un fauteuil, le volontaire a pu se familiariser avec les échantillons de 4g et de 8g. Il a été invité à s'entraîner à mastiquer et à recracher un bol le plus naturellement possible, sans altérer la mastication et sans avaler, de manière consciente ou non, ni fragment alimentaire ni salive. Un verre contenant 4mL d'eau était présenté au volontaire pour rinçage afin de recueillir, une fois le bol recraché, le maximum de particules alimentaires résiduelles dans la cavité buccale. L'eau de rinçage et les particules résiduelles étaient ajoutées au bol collecté sauf lorsque les bols étaient destinés à la mesure de leurs propriétés rhéologiques.

Un verre d'eau et du papier absorbant étaient placés à la disposition du volontaire.

Une fois le volontaire coutumier des consignes et des échantillons, les bols destinés aux différentes analyses ont été collectés (**Figure 11**).

Les trois premiers bols réalisés ont été utilisés pour les dosages biochimiques. Ils ont été collectés à l'issue de la mastication complète d'échantillons de 4g de biscuits, juste avant la déglutition.

Les cinq bols suivant étaient destinés au tamisage virtuel par analyse d'image : il s'agissait de bols issus de la séquence masticatoire complète d'échantillons de biscuit de 4g. Ils ont été placés dans 20mL de mélange de glycérol (à 80%) et d'eau, puis temporisés ainsi jusqu'à la fin de la session de collecte des bols.

Cinq bols résultant de séquence de mastication complète d'échantillons de 8g ont ensuite été collectés auprès du volontaire pour être testés en compression. Pour déterminer les propriétés rhéologiques des bols alimentaires, il est nécessaire de recueillir le bol seul, sans collecte des particules restantes par rinçage avec l'eau.

Au cours de la collecte de ces premiers bols, le nombre de cycles nécessaires pour une séquence de mastication complète a été déterminé, pour les échantillons de 4g comme pour les échantillons de 8g. Il a servi à calculer le nombre de cycle correspondant à la réalisation de la moitié de la séquence masticatoire pour chacune des deux masses de biscuit. Ces paramètres sont propres à chaque individu pour un aliment donné et dans une quantité donnée.

Pour les bols suivants et pour des raisons logistiques, le volontaire a dû alterner la formation de bols à séquences masticatoires complète et expérimentalement réduite. Ont ainsi été recueillis dans un ordre tributaire de l'avancée indépendante de chaque protocole :

- 5 bols d'échantillons de 4g recueillis à séquence masticatoire complète destinés au tamisage manuel
- 5 bols d'échantillons de 4g collectés à moitié de séquence masticatoire pour le tamisage manuel
- 3 bols d'échantillons de 4g à moitié de séquence masticatoire destinés aux dosages biochimiques
- 5 bols d'échantillons de 8g récupérés à moitié de séquence masticatoire afin d'être testés en compression.

Enfin, 5 derniers bols d'échantillons de 4g recueillis à moitié de séquence masticatoire étaient réalisés dans les intervalles de temps libre. De la même manière que précédemment, ils étaient conservés dans 20mL de la solution de glycérol et d'eau jusqu'à la fin de la session, pour être traités en analyse d'image dans un deuxième temps et après le départ du volontaire, afin de réaliser leur tamisage virtuel.

2.5. STATISTIQUES

Toutes les données individuelles ont été traitées indépendamment et sous forme de moyennes et d'écart-types.

Le traitement statistique des données a été réalisé avec le logiciel SPSS® (version 11.5).

Pour chaque variable étudiée, une analyse descriptive de l'ensemble des données extraites a d'abord été effectuée.

Analyses des données physiologiques de la mastication :

Deux ANOVAs (« ANalysis Of VAriance ») ont été réalisées pour rechercher une différence significative entre les valeurs de fréquence de mastication obtenues pour les échantillons de 4g et de 8g.

Une ANOVA a été utilisée pour déterminer s'il y avait une différence significative entre les valeurs de fréquence de mastication obtenues pour les deux sessions de mastication des biscuits de 4g, les échantillons de 8g n'étant pas concernés par cette dualité.

Analyses de la distribution granulométrique pour chaque technique de tamisage :

Pour chaque technique de mesure granulométrique, une ANOVA en modèle de mesures répétées (avec « effet intra-sujet » = tamis et effet « inter-sujet » = bol) a permis de comparer la courbes de distribution granulométrique des bols obtenus à la moitié de la séquence de mastication et celle des bols prêts à être déglutis, et déterminer s'il existait une différence significative entre les deux.

Analyse de la valeur de d50 obtenue pour chaque technique de tamisage :

Une ANOVA a été effectuée pour évaluer l'incidence du type de bol ($B_{1/2}$ vs B_{deg}) sur les valeurs de médiane d50, obtenues par la méthode de tamisage manuel ou par tamisage virtuel.

Une ANOVA univariée à deux facteurs (facteurs bol et répétition) a été réalisée pour tester l'existence d'une différence significative entre les valeurs de d50 selon le type de bol ($B_{1/2}$ et B_{deg}), ou selon la répétition, et l'existence d'une interaction significative entre type de bol et répétition.

Analyses des données issues des tests de compression à 65% :

Une analyse descriptive des quatre variables de dureté, de collant, d'élasticité et de cohésion a été exécutée en premier lieu, selon le type de bol ($B_{1/2}$ et B_{deg}).

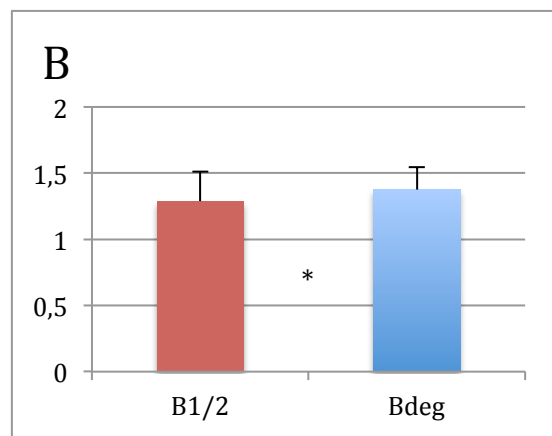
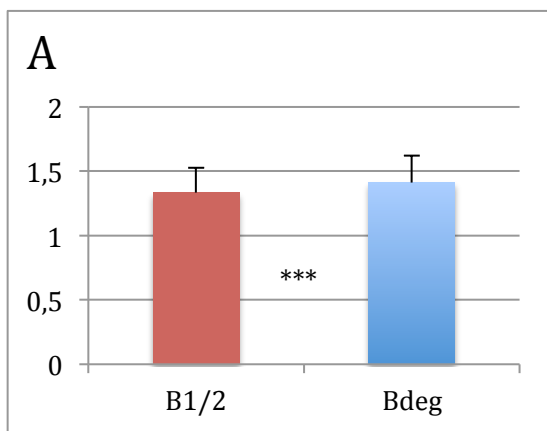
Pour chaque variable, deux ANOVAs ont été exécutées : une analyse univariée avec pour seul facteur le type de bol, et une autre à deux facteurs pour évaluer l'existence d'un effet significatif du type de bol, de la répétition, ainsi que celle d'une interaction entre les deux sur les variables rhéologiques de dureté, collant, élasticité et cohésion.

Conditions expérimentales	Nombre de cycles	Durée (s)	Fréquence (nb cycles/s)
B _{1/2}	10,21 $\sigma = 2,25$	7,75 $\sigma = 1,81$	1,33 $\sigma = 0,19$
B _{deg}	20,06 $\sigma = 4,93$	14,36 $\sigma = 3,55$	1,41 $\sigma = 0,21$

Conditions expérimentales	Nombre de cycle	Durée (s)	Fréquence (nb cycles/s)
B _{1/2}	15,17 $\sigma = 3,08$	11,98 $\sigma = 2,61$	1,28 $\sigma = 0,22$
B _{deg}	30,13 $\sigma = 7,11$	21,9 $\sigma = 4,54$	1,37 $\sigma = 0,17$

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des moyennes et écart-types des variables dynamiques des séquences de mastication réalisées pour la collecte des bols après la moitié de la séquence (B_{1/2}) ou après la séquence complète (B_{deg}) pour des échantillons de biscuit de 4g.

Tableau 2 : Tableau récapitulatif des moyennes et écart-types des variables dynamiques des séquences de mastication réalisées pour la collecte des bols après la moitié de la séquence (B_{1/2}) ou après la séquence complète (B_{deg}) pour des échantillons de biscuit de 8g.



Figures 12 (A et B): Valeurs moyennes (et écart-types) des fréquences de mastication enregistrées au cours des séquences masticatoires des sujets, pour les échantillons de biscuit de 4g (A) et de 8g (B), et pour les bols collectés à la moitié (B_{1/2}) ou à la fin (B_{deg}) de la séquence complète de mastication (échantillons de 4g : n = 146 pour B_{1/2} et n = 156 pour B_{deg} ; échantillons de 8g : n=60).

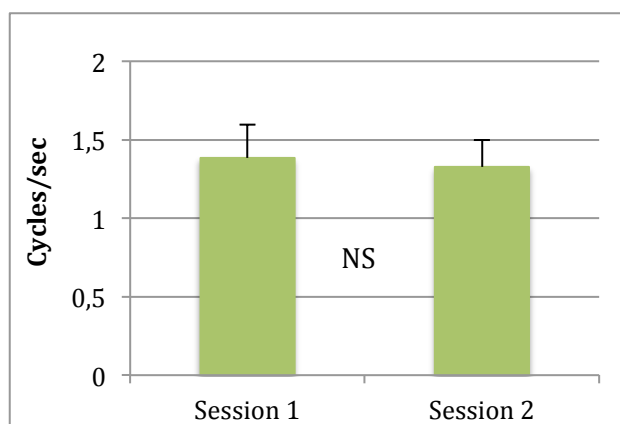


Figure 13 : Valeurs moyennes (et écart-types) des fréquences de mastication observées pour les séquences de mastication (de B_{1/2} et B_{deg}) réalisées au cours de deux sessions différentes de collecte de bols alimentaires de biscuit de 4g (n = 252 pour session 1 ; n = 50 pour session 2).

3. RÉSULTATS

3.1. CINEMATIQUE DE LA MASTICATION AU COURS DE LA FORMATION DU BOL ALIMENTAIRE

La demi-séquence masticatoire a été définie à partir de la séquence complète de chaque sujet comme la période pendant laquelle la moitié des cycles de mastication (coups de dents) est effectuée. Le nombre de cycles réalisés pour les « demi-bols » est donc fixe mais propre à chaque sujet et à chaque type d'échantillon (4g ou 8g). Pour chaque échantillon, la durée de la formation des bols $B_{1/2}$ et B_{deg} est une variable mesurée, à partir de laquelle la fréquence est déduite. Les résultats de ces trois variables considérées, nombre de cycles, durée de séquence et fréquence de mastication, sont présentés dans les **Tableaux 1** et **2**. Pour les échantillons de biscuit de 4g d'une part, le nombre moyen de cycles réalisés pour une mastication complète (B_{deg}) est de $20,05 \pm 4,93$ et de $10,20 \pm 2,25$ pour $B_{1/2}$. La durée moyenne de la séquence masticatoire complète (B_{deg}) est de $14,36 \pm 3,55$ s, tandis que celle de la séquence interrompue à la moitié des cycles de mastication ($B_{1/2}$) est de $7,75 \pm 1,81$ s. D'autre part, en ce qui concerne la mastication des échantillons de biscuit de 8g, le nombre moyen de cycles réalisés pour la mastication complète (B_{deg}) est de $30,13 \pm 7,11$ et de $15,17 \pm 3,08$ pour $B_{1/2}$. La durée moyenne des séquences de mastication quant à elle est de $21,9 \pm 4,54$ s pour B_{deg} , et de $11,98 \pm 2,61$ s pour les bols $B_{1/2}$.

Pour les bols de biscuits de 4g, la fréquence de mastication augmente entre $B_{1/2}$ et B_{deg} avec une fréquence moyenne de $1,33 \pm 0,19$ cycles/sec pour $B_{1/2}$ et une fréquence moyenne de $1,41 \pm 0,21$ cycles/sec pour B_{deg} (**Tableau 1**). D'après le test ANOVA, cette différence est hautement significative ($F = 11,084$; $p = 0,001$; **Figure 12A**).

La même augmentation de fréquence est observée pour les échantillons de 8g, sur la première moitié de la séquence et sur la séquence complète de mastication avec des valeurs de fréquence moyenne allant de $1,28 \pm 0,22$ cycles/sec pour $B_{1/2}$, jusqu'à $1,37 \pm 0,17$ cycles/sec pour B_{deg} (**Tableau 2**). Cette différence de fréquence est également significative ($F = 5,879$; $p = 0,017$; **Figure 12B**).

Les collectes de bols de biscuit ont été réalisées sur 2 sessions différentes qui n'ont pas entraîné de différence significative de fréquence de mastication ($F = 3,272$; $p > 0,05$; **Figure 13**).

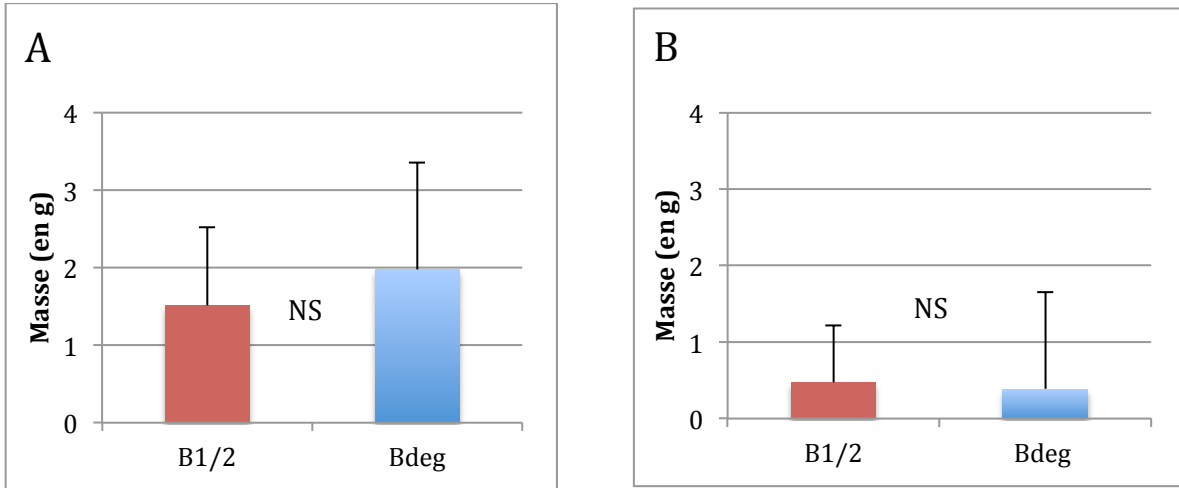


Figure 14 (A et B) : Différences moyennes entre la masse de l'échantillon d'aliment (4g pour la figure A ou 8g pour la figure B) et la masse des bols collectés après la moitié ($B_{1/2}$; $n=146$ et $n=60$ pour les échantillons de 4g et 8g respectivement) ou à la fin de la séquence de mastication (B_{deg} ; $n=156$ et $n=60$ pour les échantillons de 4g et 8g respectivement).

3.2. EVOLUTION DES CARACTÉRISTIQUES DU BOL ALIMENTAIRE AU COURS DE SA FORMATION

3.2.1. Evolution de la masse du bol alimentaire au cours de sa formation

Le calcul des différences entre la masse de l'échantillon mis en bouche et la masse du bol alimentaire collecté peut souvent servir à l'estimation de l'incorporation de salive dans le bol. La variabilité des masses des bols alimentaires collectés dans cette étude est très importante, aucun résultat significatif n'a pu être mis en évidence quant à l'évolution de la masse du bol alimentaire, entre la masse initiale de l'échantillon de biscuit (4g ou 8g) et la masse des bols collectés $B_{1/2}$ et B_{deg} . Néanmoins, et d'un point de vue purement descriptif, certaines caractéristiques peuvent être décrites.

Au cours de la mastication des échantillons de 4g de biscuit, une tendance à l'augmentation progressive de la masse du bol s'observe, depuis la masse initiale (4,01g ; $\sigma = 0,05$), en passant par la moitié de séquence masticatoire avec un gain de masse de 1,51g en moyenne ($\sigma = 1,01$), jusqu'à la fin de la séquence où la masse moyenne augmente de 1,98g ($\sigma = 1,38$) par rapport à la masse initiale de l'échantillon (**Figure 14A**). Cependant en raison de la variabilité des résultats et l'importance des écarts-types ces résultats ne sont pas exploitables statistiquement.

Les résultats de masse des bols à partir des échantillons de biscuit de 8g présentent une amplitude telle qu'il est impossible de mettre en évidence aucune tendance évolutive (**Figure 14B**).

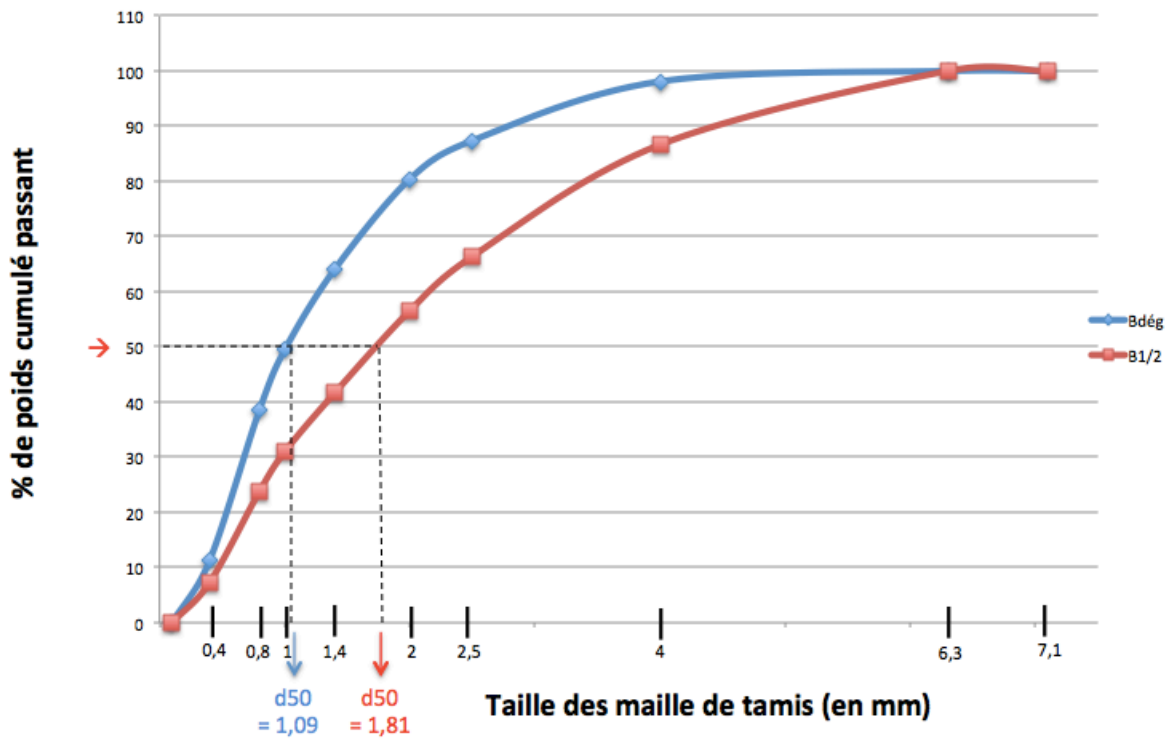


Figure 15 : Courbes moyennes (n=60) des distributions granulométriques obtenues par la technique de tamisage manuel, exprimées en pourcentage de poids de particules cumulé passant, pour les bols collectés à la moitié (B_{1/2}) ou à la fin (B_{dég}) de la séquence complète de mastication d'échantillons de biscuit de 4g. La technique d'extraction des valeurs de médiane des distributions (d50) est indiquée sur la figure mais appliquée sur chaque courbe individuelle obtenue (pointillés).

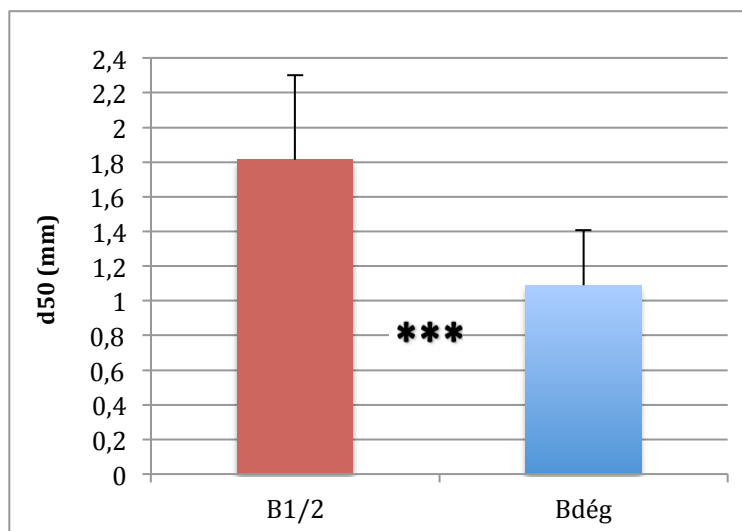


Figure 16 : Valeurs moyennes et écarts-types (n=60) des médianes des distributions de tailles de particules (d50 en mm) obtenues par la technique de tamisage manuel des bols collectés à la moitié (B_{1/2}) ou à la fin (B_{dég}) de la séquence masticatoire d'échantillons de biscuit de 4g.

3.2.2. Evolution de la granulométrie du bol au cours de sa formation

3.2.2.1. *Tamisage manuel*

La **figure 15** présente les distributions granulométriques, exprimées en pourcentage de poids cumulé passant de particules tamisées. Les deux courbes représentent respectivement les distributions granulométriques moyennes des bols alimentaires de biscuit collectés à la moitié ($B_{1/2}$) ou à la fin de la séquence complète de mastication (B_{deg}). L'ANOVA (en modèle de mesures répétées avec le facteur tamis) indique une différence significative entre ces distributions ($F = 117,4$; $p = 0,0001$). Cette différence est la conséquence d'une disparité en terme de taille des particules alimentaires, celles du $B_{1/2}$ étant significativement plus grosses que celles du B_{deg} . Les bols alimentaires collectés à la moitié de la séquence masticatoire ont une plus grande quantité de grosses particules et une plus petite quantité de petites particules que les bols recueillis à la fin de la séquence. Avec l'avancée de la mastication, la proportion de petites particules dans le bol alimentaire augmente donc, tandis que la proportion de grosses particules diminue simultanément.

A partir de ces courbes de distribution granulométrique, les valeurs de médiane (d_{50}) ont été déterminées pour les deux types de bols (**figure 16**). Ces deux valeurs moyennes de d_{50} décroissantes de $B_{1/2}$ ($1,81 \pm 0,49$ mm) à B_{deg} ($1,09 \pm 0,32$ mm) présentent une différence hautement significative ($F = 92,123$; $p = 0,000$). Cette diminution de d_{50} entre milieu de séquence et fin de séquence masticatoire est le reflet de la réduction de la taille des particules du bol au fur et à mesure de la progression de la séquence masticatoire.

L'ANOVA à deux facteurs (facteurs bol et répétition) réalisée sur les données de d_{50} indique qu'il n'y a pas d'effet significatif de la répétition sur la valeur de médiane de taille des particules ($p > 0,05$), ni pour les bols $B_{1/2}$ ni pour les bols B_{deg} . Elle confirme la significativité du facteur « bol » ($B_{1/2}$ ou B_{deg}) ($F = 87,695$; $p = 0,000$). Il n'y a pas d'interaction significative entre les deux facteurs (bol et répétition).

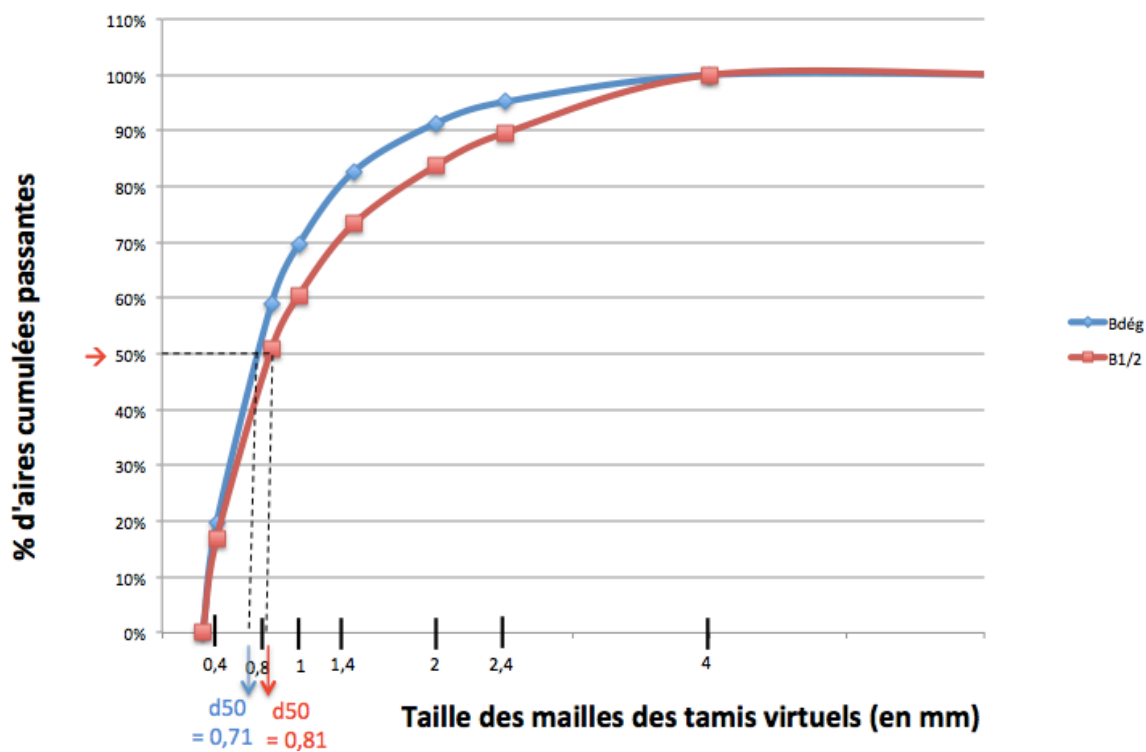


Figure 17 : Courbes moyennes des distributions granulométriques obtenues par la technique de tamisage virtuel, exprimées en pourcentage d'aire cumulée passante, pour les bols collectés à la moitié $B_{1/2}$ ou à la fin B_{deg} de la séquence complète de mastication d'échantillons de biscuit de 4g ($n = 50$ pour $B_{1/2}$ et $n = 60$ pour B_{deg}). La technique d'extraction des valeurs de médiane des distributions (d_{50}) est indiquée sur la figure mais appliquée sur chaque courbe individuelle obtenue (pointillés).

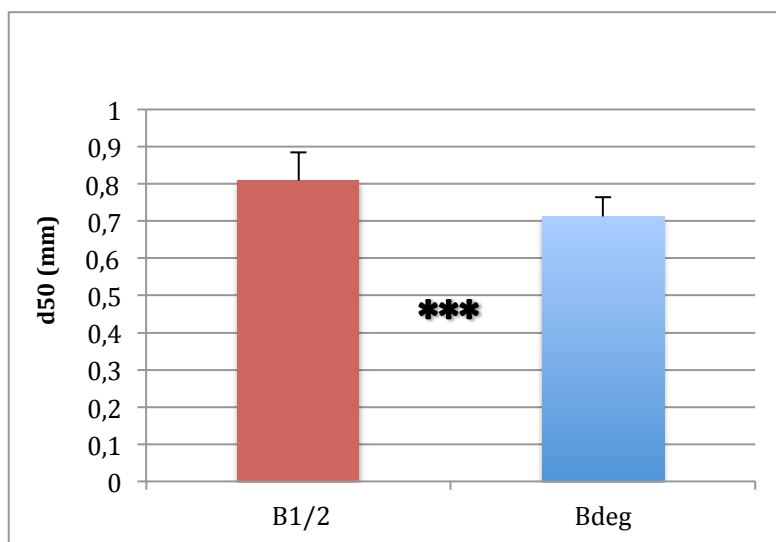


Figure 18 : Valeurs moyennes (et écart-type) des médianes des distributions de tailles de particules (d_{50} en mm) obtenues par la technique de tamisage virtuel des bols collectés à la moitié $B_{1/2}$ ou à la fin B_{deg} de la séquence masticatoire d'échantillons de biscuit de 4g ($n = 50$ pour $B_{1/2}$ et $n = 60$ pour B_{deg}).

3.2.2.2. Tamisage virtuel par analyse d'image

La **figure 17** représente les distributions granulométriques, exprimées en pourcentage d'aires cumulées passantes de particules tamisées virtuellement. Chaque courbe représente la distribution granulométrique moyenne d'un type de bol ($B_{1/2}$ ou B_{deg}). L'ANOVA en modèle de mesures répétées montre une différence hautement significative entre les distributions de ces deux types de bols ($F = 98,9$; $p = 0,000$), les bols $B_{1/2}$ étant constitué d'une plus grande proportion de grosses particules alimentaires, et d'une plus petite proportion de petites particules que les bols B_{deg} . Ces résultats sont en analogie avec ceux obtenus par la technique de tamisage manuel, et signent la transformation du bol alimentaire en particules de plus en plus petites à mesure que la séquence masticatoire progresse.

A partir de ces courbes de distribution granulométrique, des valeurs de d_{50} décroissantes ont été extraites pour les bols alimentaires collectés à la moitié et à la fin de la séquence de mastication (**figure 18**). Ces valeurs médianes, de $0,81 \pm 0,08$ mm et de $0,71 \pm 0,05$ mm évaluées respectivement pour les bols collectés à moitié de séquence ($B_{1/2}$) et après la séquence complète de mastication (B_{deg}), présentent une différence hautement significative ($F = 62,876$; $p = 0,000$), ce qui corrobore les résultats obtenus par la technique du tamisage manuel.

De même que pour le tamisage manuel une ANOVA à deux facteurs (facteur bol et répétition) indique l'absence d'effet « répétition » sur les valeurs de d_{50} ($p > 0,05$) que ce soit pour $B_{1/2}$ comme pour B_{deg} . De plus, elle vérifie la significativité du facteur « bol » ($F = 61,157$; $p = 0,000$) et conclut à l'absence d'interaction significative entre ces deux facteurs.

	$B_{1/2}$	B_{deg}	ANOVA
DURETÉ (N)	50,36 $\sigma = 31,83$	18,06 $\sigma = 11,72$	F = 50,230 p = 0,000
COLLANT (N.s)	8,06 $\sigma = 2,50$	9,67 $\sigma = 3,21$	F = 9,056 p = 0,003
ELASTICITÉ (sans unité)	0,14 $\sigma = 0,07$	0,27 $\sigma = 0,12$	F = 59,658 p = 0,000
COHÉSION (sans unité)	0,14 $\sigma = 0,03$	0,32 $\sigma = 0,15$	F = 78,429 p = 0,000

Tableau 3 : Tableau récapitulatif des moyennes et écart-types des quatre variables obtenues par les tests de mesures rhéologiques (dureté, collant, élasticité et cohésion) des bols collectés à la moitié ($B_{1/2}$) ou à la fin (B_{deg}) de la séquence de mastication (n = 59 pour $B_{1/2}$ et n = 55 pour B_{deg}). Les différences significatives, testées par ANOVA entre les 2 types de bols $B_{1/2}$ et B_{deg} , sont indiquées pour chaque variable.

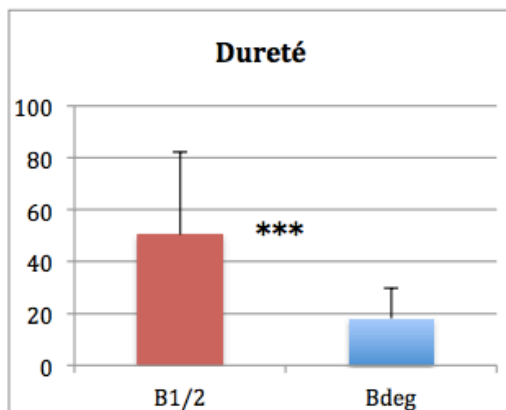


Figure 19 : Valeurs moyennes (et écarts-types) de la dureté des bols collectés à la moitié ($B_{1/2}$) ou à la fin de la séquence de mastication (B_{deg}) obtenues en test de compression à 65%, et exprimées en Newtons (n = 59 pour $B_{1/2}$ et n = 55 pour B_{deg}).

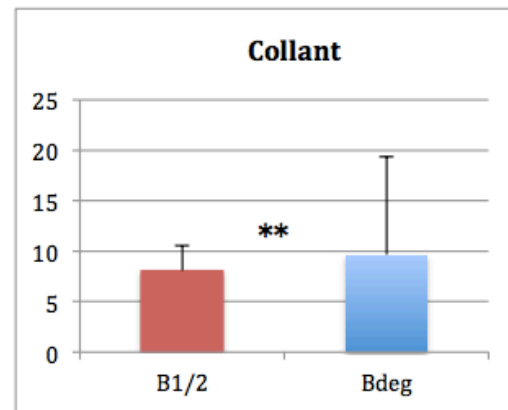


Figure 20 : Valeurs moyennes (et écart-type) du caractère collant des bols $B_{1/2}$ et B_{deg} obtenues en test de compression à 65%, et exprimées en Newtons.seconde (n = 59 pour $B_{1/2}$ et n = 55 pour B_{deg}).

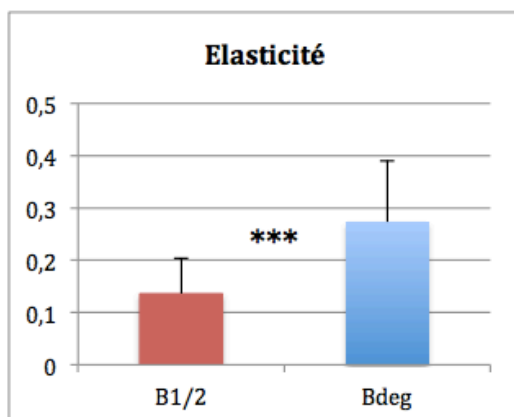


Figure 21 : Valeurs moyennes (et écart-type) de l'élasticité des bols $B_{1/2}$ et B_{deg} obtenues en test de compression à 65%, sans unité (n = 59 pour $B_{1/2}$ et n = 55 pour B_{deg}).

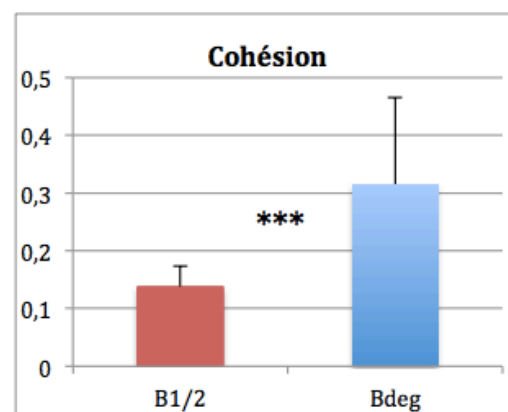


Figure 22 : Valeurs moyennes (et écart-type) de la cohésion des bols $B_{1/2}$ et B_{deg} obtenues en test de compression à 65%, sans unité (n = 59 pour $B_{1/2}$ et n = 55 pour B_{deg}).

3.2.3. Evolution des caractéristiques rhéologiques du bol alimentaire au cours de sa formation

La **figure 19** présente les résultats de dureté des bols obtenus à partir des tests de compression réalisés sur les bols de biscuit collectés à la moitié ($B_{1/2}$) ou à la fin (B_{deg}) de la séquence complète de mastication. Le bol alimentaire collecté au milieu de la séquence est plus dur ($50,36 \pm 31,83$ N) que lorsqu'il est collecté à la fin de la mastication ($18,06 \pm 11,72$ N). Cette diminution de la dureté du bol entre la moitié et la fin de la mastication est très significative ($F = 50,2$; $p = 0,000$) (**Tableau 3**).

A la fin de la séquence le bol de biscuit est plus collant qu'en milieu de séquence ($9,67 \pm 3,21$ N.s *versus* $8,06 \pm 2,50$ N.s ; **Figure 20**). Cette différence est statistiquement significative ($F = 9,1$; $p = 0,003$) (**Tableau 3**).

Le bol alimentaire collecté à la moitié de la séquence masticatoire ($B_{1/2}$) présente des valeurs d'élasticité ($0,14 \pm 0,07$) moins importantes que le bol collecté à la fin de la séquence complète (B_{deg} : $0,27 \pm 0,12$) (**Figure 21**) Cette augmentation du caractère élastique est statistiquement très significative ($F = 59,7$; $p = 0,000$) (**Tableau 3**).

La **figure 22** présente le caractère cohésif des bols $B_{1/2}$ et B_{deg} . Le bol alimentaire collecté au milieu de la séquence de mastication est moins cohésif ($0,14 \pm 0,03$) que celui collecté à la fin de la séquence complète ($0,32 \pm 0,15$). Cette augmentation de la cohésion au fur et à mesure de la mastication est très significative ($F = 78,43$; $p = 0,000$) (**Tableau 3**).

L'ANOVA à deux facteurs (facteurs bol et répétition) réalisée sur les variables rhéologiques de dureté, collant, élasticité et cohésion montre qu'il n'y a pas d'effet répétition significatif pour aucun de ces paramètres ($p > 0,05$). Elle indique également qu'il n'y a pas non plus d'interaction significative entre les deux facteurs (bol et répétition ; $p > 0,05$).

□

Evolution des propriétés rhéologiques du bol alimentaire de biscuit

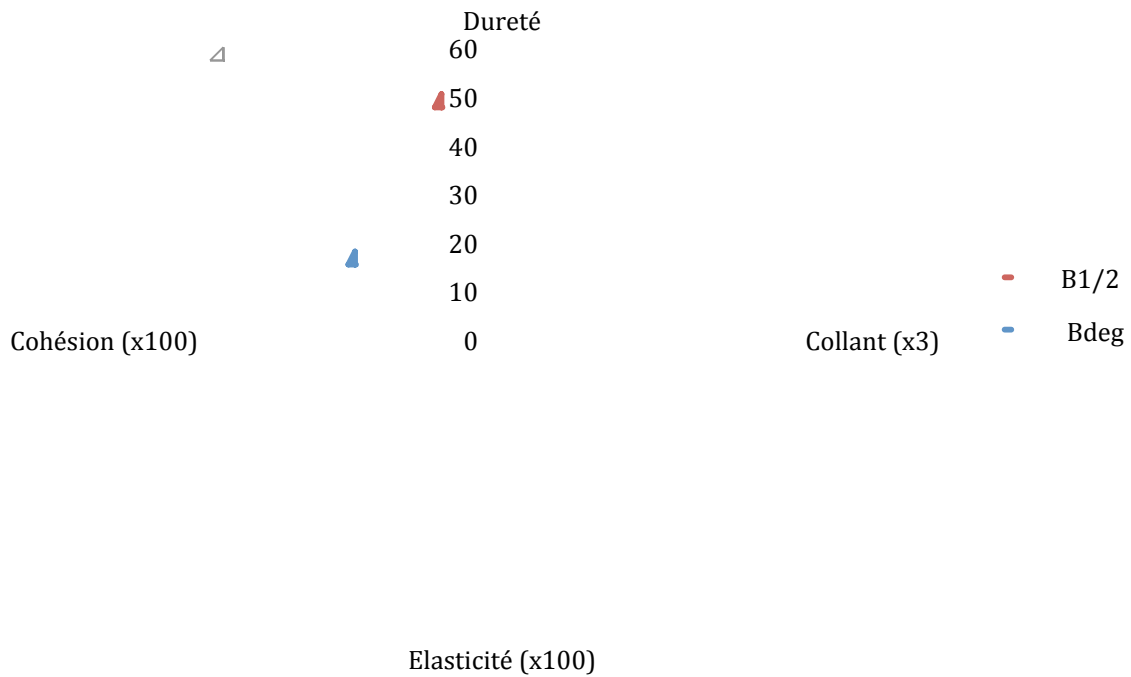


Figure 23 : Diagramme en radar des quatre variables rhéologiques extraites des tests de compression : dureté, collant (coefficient multiplicateur 3), élasticité (coefficient multiplicateur 100), cohésion (coefficient multiplicateur 100), pour les deux types de bol ($B_{1/2}$ et B_{deg}).

4. DISCUSSION

Cette étude apporte un certain nombre d'informations sur les propriétés granulométriques et rhéologiques qui caractérisent le bol alimentaire de biscuit à deux instants définis de la mastication, permettant de déduire leurs évolutions au cours de la progression de la séquence masticatoire, chez le sujet jeune et avec une occlusion correcte.

Comme précédemment énoncé, le but de la mastication est de produire un bol cohésif (Peyron et al, 2004) afin de stimuler et faciliter son passage à travers les voies aérodigestives et vers l'œsophage. Pour ce faire, les aliments doivent être réduits en de nombreuses petites particules liées entre elles par un mélange de salive et de liquides.

L'analyse des caractéristiques rhéologiques des bols de biscuit met en évidence une évolution similaire des propriétés physiques des bols pour tous les sujets, au cours de la séquence masticatoire. Pour l'ensemble des sujets, plus on se rapproche du moment de la déglutition et moins le bol alimentaire est dur. En revanche il devient de plus en plus collant, élastique et cohésif pendant la deuxième moitié de la mastication (**Figure 23**).

Ces résultats sont similaires à ceux retrouvés dans la littérature, qui décrivent un bol alimentaire qui se ramollit, devient de plus en plus cohésif et élastique au cours de la mastication physiologique, comme par exemple pour les céréales de petit-déjeuner (Peyron et al, 2011). Les modifications analogues des paramètres rhéologiques jusqu'au moment de la déglutition pour tous les sujets participant à ce travail de thèse, renforcent l'hypothèse que la perception de ces caractéristiques et de leurs niveaux respectifs sont des signaux sensoriels autorisant la déglutition du bol alimentaire (Loret et al, 2011 ; Peyron et al, 2011).

En terme de granulométrie, les résultats de cette étude vont dans le sens de ce qui est largement admis dans la littérature, à savoir qu'au cours de la mastication, la matrice alimentaire est déstructurée, réduite et transformée en un bol alimentaire constitué de particules individualisables (Hoebler et al, 2000 ; Peyron et al, 2004 ; Woda et al, 2006). La taille de ces particules alimentaires est de plus en plus petite au fur et à mesure de l'avancée de la séquence masticatoire, de la même manière que cela a été décrit pour les céréales de petit-déjeuner (Peyron et al, 2011). La distribution granulométrique des bols de biscuit collectés chez les différents volontaires au moment de la déglutition est très similaire, tandis que les paramètres physiologiques des séquences de mastication (nombre de cycles, durée et fréquence de mastication) de ces sujets sont extrêmement variables (Peyron et al, 2004). Ces résultats confirment ce qui a déjà été mis en évidence par différentes études en ce qui concerne à la fois la grande variabilité de la mastication, associée à une grande similitude entre les bols obtenus. Plusieurs études ont en effet révélé que la distribution de la taille des particules au moment de la déglutition est largement dépendante de l'aliment, et est très similaire pour un même aliment entre différents

individus ayant un bon état dentaire (Peyron et al, 2004 ; Woda et al, 2006 ; Mishellany et al, 2006). Les résultats de ce travail de thèse confirment donc la multiplicité des stratégies de mastication au service d'un objectif commun pour tous les sujets : l'obtention d'un bol alimentaire compatible avec la déglutition, avec un degré de fragmentation similaire pour tous (Woda et al, 2006 ; Jalabert-Malbos et al, 2007).

Ces résultats corroborent le fait que le bol alimentaire doit répondre à des conditions précises quant à ses propriétés physiques, tant rhéologiques que granulométriques, pour pouvoir être dégluti sans douleur et sans fausse route. La notion de seuil de déglutition, qui combine des caractéristiques de taille de particules et de comportement rhéologique, est acceptée depuis longtemps (Coster et Schwartz, 1987 ; Prinz et Lucas, 1995). Cet ensemble complexe de conditions dont on ne mesure que quelques unes peut être considéré comme vital, puisque les déglutitions dysfonctionnelles sont liées à un niveau élevé de morbidité, surtout dans le cas de certaines pathologies (Johnston et al, 1995 ; Hennequin et al, 1999).

Les mesures de variation de masse du bol alimentaire de biscuit collecté aux deux moments de la séquence masticatoire semblent inexploitable en l'état, et peu pertinentes pour caractériser une évolution du bol alimentaire et compléter la description du seuil de déglutition. De plus, plusieurs phénomènes concomitants ayant une incidence sur la masse du bol peuvent être décrits au cours de la mastication.

Tout d'abord, la production de salive nécessaire à la formation d'un bol alimentaire compatible avec la déglutition est susceptible d'augmenter sensiblement la masse de celui ci au fur et à mesure de sa formation. A contrario, une perte de masse pourrait s'expliquer par la survenue de déglutitions intermédiaires non perçues par le sujet, phénomène qui aurait lieu dans 80% des séquences masticatoires selon plusieurs auteurs, par le déplacement de fractions alimentaires vers l'oropharynx provoqué par le contact langue-palais (Hiieman et al, 1996 ; Palmer et al, 1992). De plus, une perte de poids pourrait être imputée au transport des particules dans la cavité buccale, ainsi qu'à la proportion relative de liquides ou de composants solubles contenus dans la matrice alimentaire (ceci étant surtout le cas pour les aliments à forte teneur en eau) (Jalabert-Malbos et al, 2007).

La production de salive n'a donc pas pu être interprétée dans ces résultats bien qu'elle joue un rôle prépondérant dans la formation du bol alimentaire et dans la détermination du seuil de déglutition.

Chez l'homme, la production quotidienne de salive est très variable, la moyenne étant d'environ 750mL/24h. Le flux salivaire et l'activité relative des différentes glandes salivaires sont extrêmement variables en fonction de la présence ou de l'absence de stimulation, du type de stimulation, de l'état de vigilance et du cycle circadien. Les flux salivaires sont stimulés de manière réflexe par les propriétés physico-chimiques de l'aliment (par exemple l'acidité) et par le stimulus mécanique que représente la

mastication, relayé par les récepteur somesthésiques muqueux, parodontaux, articulaires et musculaires (J. Azerad, 1992).

La salive revêt différentes fonctions digestives essentielles. La première d'entre elles est la contribution à la formation d'un bol alimentaire insalivé, donc cohésif, visqueux et glissant, ces propriétés contribuant à la détermination du moment où le bol doit être dégluti (Jalabert et al, 2007). La salive est constituée à 99% d'eau dans laquelle sont dissouts des électrolytes (sodium, potassium, calcium, magnésium, phosphates) et des bicarbonates qui assurent son pouvoir tampon. Loret et al (2011) ont constaté que la variation du flux de salive permet de contrôler l'absorption d'eau par les aliments. Les bols alimentaires formés à partir d'échantillons de céréales cuits selon des modalités différentes ont tous à la fin de la mastication une teneur en eau similaire (environ 50%). La perception sensitive de la teneur en eau du bol alimentaire serait donc un marqueur important de la déglutition, ce paramètre étant contrôlé par la variation du flux salivaire.

La salive a aussi une fonction lubrifiante essentielle grâce à la synthèse de mucines (glycoprotéines lubrificatrices de la salive) qui facilitent le glissement du bol sur les surfaces des dents et sur les muqueuses buccales pendant la mastication, puis sur les parois pharyngiennes lors de la déglutition (Humphrey et Williamson, 2001). De plus, la salive initie une première étape de la digestion, quoique limitée, par la synthèse d'amylases et de lipases. Enfin, la salive joue aussi un rôle « gastronomique »/gustatif en tant que solvant des sapides alimentaires solubles, nécessaire à la stimulation des gustorécepteurs.

Limites de l'étude :

La différence significative de fréquence masticatoire obtenue entre séquence de mastication interrompue ($B_{1/2}$) et séquence totale (B_{deg}) pour les deux types d'échantillons de biscuit (4g et 8g) s'oppose aux résultats des études décrits dans la littérature. En effet, malgré une très grande variabilité inter-individuelle des paramètres physiologiques au cours des séquences de mastication, il n'existe pas de différence en terme de fréquence de mastication entre séquence masticatoire totale et séquence interrompue à différents instants de celle-ci (Peyron et al, 2011). L'augmentation de fréquence constatée dans ce travail de thèse entre la première moitié de la séquence et la séquence complète de mastication serait donc la conséquence d'un biais de méthode de mesure de la séquence masticatoire.

5. CONCLUSION

Connaître les effets des déficiences orales liées à l'âge et à la maladie est un prérequis sur lequel de nombreuses études se portent (Mischellany-Dutour et al, 2008 ; Peyron et al, 2008 et 2018), nécessaire à la recherche de solutions pour limiter leurs retentissements. Une mastication déficiente et inefficace malgré une adaptation de ses paramètres modifiables revient à l'assimilation d'un bol insuffisamment réduit et insalivé. Outre les risques connus au cours de la déglutition, le déclin des pratiques orales, fréquent chez la personne âgée, impacte de manière conséquente l'absorption et la digestion des aliments vecteurs de nutriments, donc l'état nutritionnel. De plus, cet état carenciel est souvent aggravé par l'éviction de certains aliments compte tenu des difficultés masticatoires et/ou digestives, et la mise en place d'un régime alimentaire limitatif.

L'étude MICRONUT ambitionnait d'acquérir des connaissances sur les processus de digestion, incluant l'étape orale de formation du bol alimentaire, et sur l'impact de la structure alimentaire sur la disponibilité des nutriments *in fine*. Ce projet portait sur des volontaires sains et avec une bonne occlusion dentaire dans un premier temps. Les résultats pourraient ensuite peut-être s'étendre à des populations spécifiques en terme de santé orale, avec un impact possible ou avéré sur la consommation alimentaire et/ou sur le statut nutritionnel.

Dans l'objectif d'élaborer des produits alimentaires adaptés aux populations spécifiques, les résultats de ces études sont de véritables pistes de réflexion et de recherche pour la confection d'aliments texturés afin de remédier aux carences et favoriser la formation d'un bol pouvant être dégluti en toute sécurité.

ANNEXES

FICHE DE PRÉ-INCLUSION

*Impact de la structure des aliments sur la
biodisponibilité plasmatique des micronutriments chez
l'homme*

3 premières lettres nom :

2 premières lettres prénom :

Numéro de pré inclusion :

Données générales

- ▶ Date de pré inclusion :
- ▶ Date de naissance :
- ▶ Age au moment de la pré inclusion :
- ▶ Sexe : homme femme*
- ▶ Numéro de téléphone :
- ▶ Adresse mail :
- ▶ Assujettie à un régime de la sécurité sociale : oui non*

Bilan médical :

- ▶ Antécédents médicaux :
 - Pathologies : oui non
Si oui la ou lesquelles ?
 - Traitements : oui non
Si oui le ou lesquels ?
- ▶ Antécédents d'intervention chirurgicale :
 - Si oui la ou lesquelles ?
- ▶ Antécédent de lithiase calcique ? oui* non
- ▶ IMC :
 - Poids =
 - Taille =
 - IMC =
 - $20 \leq \text{IMC} \leq 30$: oui non*

Habitudes de consommations

- ▶ Tabac : oui* non
Si arrêt, depuis combien de temps ? :
- ▶ Allergie à l'un des constituants des matrices testées
(œuf, vitamine B12, D, B9, lutéine, pois) : oui* non
- ▶ Prise de compléments alimentaires et / ou d'Uvédose, exception faite des produits
alimentaires enrichis dans les 3 derniers mois : oui* non
- ▶ Aversion pour les différents éléments testés (crème anglaise, flan, génoise, biscuit) :
 oui * non

Bilan bucco dentaire

- ▶ Antécédents d'orthodontie : oui non
Si oui, depuis plus de 3 ans oui non*

EXAMEN EXO-BUCCAL :

- ▶ ATM :
 RAS craquement, claquement mineur
 craquement, claquement majeur* douleur à l'ouverture*

EXAMEN ENDO-BUCCAL :

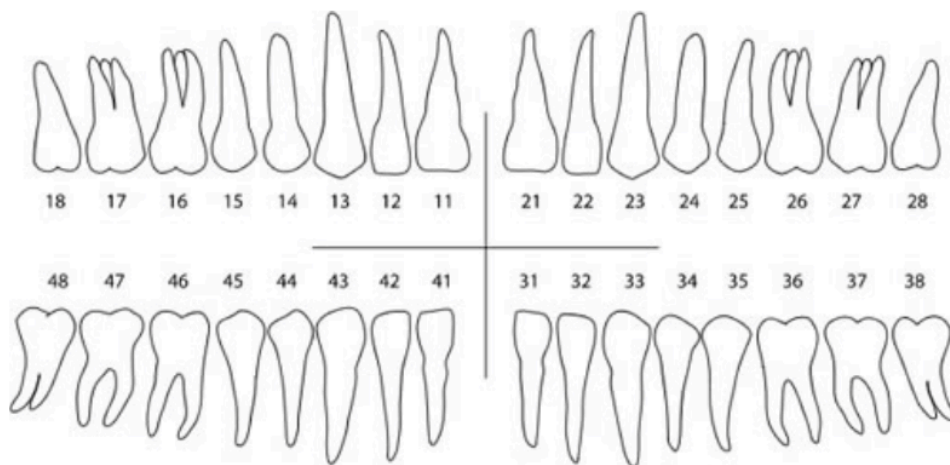
- ▶ Parodonte :
Indice de plaque Loë (0, 1, 2, 3) :
Diagnostic parodontal :
- ▶ Examen inter-arcades
✧ Nombre d'unités fonctionnelles : >5 ≤ 5*
✧ Classe d'angle : I II1 II2 III

- ✧ Inversé d'articulé : oui non
- ✧ Parafonctions à type de bruxisme : absence présence

► Examen intra-arcades

- ✧ Nombre total de dents :
- ✧ Encombrement : absent peu important important
- ✧ Alignement des crêtes marginales : oui non
- ✧ Présence d'une courbe de Spee : oui non
- ✧ Présence d'une courbe de Wilson : oui non

► Schéma dentaire



R : restauration (c : composite, v : CVI, a : amalgame).
 X : dent absente, avulsée.
 C : lésion carieuse potentielle
 CC/CCM : couronne prothétique (coulée ou céramo-métallique)
 I : implant
 A : abfractions
 U : Usure
 M : myololyse

- ✧ Soins dentaires en cours : oui non
Si oui, le ou lesquelles ?
- ✧ Présence de dents couronnées : oui non
Si oui, intégration des couronnes dans l'occlusion :
 correcte incorrecte
- ✧ Présence de dents restaurées (amalgames, composites, CVI) :
 oui non
Si oui, nombre de dents restaurées :
Si oui, intégration de ces restaurations (nombre) :
 correcte incorrecte
- ✧ Absence de dents sur l'arcade ?
Si oui, pourquoi ?

✧ Usures, abfractions, mylolyse : présence absence

CONCLUSION DU BILAN BUCCO-DENTAIRE

▶ Patient pouvant être inclus dans l'étude : oui non

Modalités pratiques :

▶ Le patient se dit prêt à se rendre 4 journées complètes au CRNH et à la faculté de chirurgie dentaire (laboratoire CROC) 1 x 2h ? oui non

*Attention : tout choix de réponse annotée par * entraîne une exclusion du patient de l'étude*

Annexe 2 : Fiche de manipulation pour chaque sujet

Nom :

Prénom :

Date :

BISCUITS

BOLS DEGLUTIS

Analyse d'image

Bol	m initiale	Nb cycle	Temps	M bol
1				
2				
3				
4				
5				

Rhéologie

Bol	m initiale	Nb cycle	Temps	M bol
1				
2				
3				
4				
5				

Tamisage

Bol	m initiale	Nb cycle	Temps	M bol
1				
2				
3				
4				
5				

Biochimie

Bol	m initiale	Nb cycle	Temps	M bol
1				
2				
3				

DEMI- BOLS

Analyse d'image

Bol	m initiale	Nb cycle	Temps	M bol
1				
2				
3				
4				
5				

Rhéologie

Bol	m initiale	Nb cycle	Temps	M bol
1				
2				
3				
4				
5				

Tamisage

Bol	m initiale	Nb cycle	Temps	M bol
1				
2				
3				
4				
5				

Biochimie

Bol	m initiale	Nb cycle	Temps	M bol
1				
2				
3				

BIBLIOGRAPHIE

Azerad J. (1992). *Physiologie de la mastication*. Masson, Paris 175p.

Bourne M.-C. (1968.) Texture profile of ripening pears. *Journal of Food Society*, 33, 223-226.

Breene W.-M. (1975). Application of texture profile analysis to instrumental food texture evaluation. *Journal of Texture Studies*, 6, 53-82.

Coster S.-T., Schwartz W.-H. (1987). Rheology and the swallow-safe bolus. *Dysphagia*, 3, 113-118.

Hennequin M., Faulks D., Veyrune J.-L., Bourdiol P. (1999). Significance of Oral Health in Persons with Down Syndrome : a Litterature Review. *Developmental Medicine ans Chil Neurology*, 41(4), 275-283.

Hiiemae K., Heath M.-R., Heath G., Kazazoglu E., Murray J., Sapper D. (1996). Natural bites, food consistency and feeding behaviour in man. *Archives of Oral Biology*, 41, 175–189.

Hoebler C., Devaux M.-F., Karinthi A., Belleville C., Barry J.-L. (2000). Particle size of solid food after human mastication and in vitro simulation of oral breakdown. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 80(5), 353-366.

Humphrey S.-P., Williamson R.-T. (2001). A review of saliva: normal composition, flow and function. *J Prosthet Dent*, 85 : 162-169.

Jalabert-Malbos M.-L., Mischellany-Dutour A., Woda A., Peyron M.-A. (2007). Particle size distribution in the food bolus after mastication of natural foods. *Food Quality and Preference*, 18, 803-812.

Johnston B.-T., Li Q., Castel D.-O. (1995) Swallowing and Esophageal Function in Parkinson's Disease. *The American Journal of Gastroenterology* 90(10), 1741-1746.

Lillford P.-J. (1991). Texture and acceptability of human foods. In : Vincent V.F.V., Lillford P.-J. (Eds.), *Feedings and the Texture of Food*. Cambridge University Press, Cambridge, 231-243.

Loret et al, 2011

Loret C., Walter M., Pineau N., Peyron M.-A., Hartmann C., Martin N. (2011). Physical and related sensory properties of a swallowable bolus. *Physiology & Behavior*, 104(5), 855-864.

Lund J.-P. (1991). Mastication and its control by the brain stem. *Critical Reviews in Oral Biology and Medicine*, 2, 33-64.

Mahmood W.-A., Watson C.-J., Ogden A.-R., Hawkins R.-V. (1992). Use of image analysis in determining masticatory efficiency in patients presenting for immediate dentures. *Int J Prosthodont* 5:359–366

Mishellany A., Woda A., Labas R., Peyron M.-A. (2006). The Challenge of Mastication: Preparing a Bolus Suitable for Deglutition. *Dysphagia*, 21(2), 87-94.

Mischellany-Dutour A., Renaud J., Peyron M.-A., Rimek F., Woda A. (2008). Is the goal of mastication reached in young dentates, aged dentates and aged denture wearers ? *British Journal of Nutrition*, 99, 121-128.

Newton J.-P., Abel E.-W., Robertson E.-M., Yemm R. (1987). Changes in Human Masseter and Medial Ptérigoid Muscles with Age : a Study by Computed Tomography. *Gerodontology* 3(4):151-154

Palmer J.-B., Rudin N.-J., Lara G., Crompton A.-W. (1992). Coordination of mastication and swallowing. *Dysphagia*, 7, 187–200.

Peyron M.-A., Mischellany A., Woda A. (2004). Particule size distribution of food boluses after mastication of six natural foods. *Journal of Dental Research*, 83(7), 578-582.

Peyron M.-A., Mischellany-Dutour A., Bourdiol P., Woda A. (2008). Poor Mastication Could Result in Poor Nutrition. The Effects of Age on Oral Functions and Consequences on Nutrition. *New Research on Nutrition for the Middle-Aged and Elderly*, Nova Science Publishers, Inc., 978-1-60456-220-0.

Peyron M.-A., Gierczynshi I., Hartmann C., Loret C., Dardevet D., Martin N. (2011). Role of physical bolus properties as sensory inputs in the trigger of swallowing. *PLoS ONE*, 6, e21167.

Peyron M.-A., Mischellany A., Woda A. (2014). Particle size distribution of food boluses after mastication of six natural foods. *Journal of dental research*, 83, 578-582.

Peyron M.-A., Santé-Lhoutellier V., François O., Hennequin M. (2018). Oral declines and mastication deficiencies cause alteration of food bolus properties. *Food and function* 1112-1122.

Prinz J.-F., Lucas P.-W. (1995). Swallow thresholds in human mastication. *Archive of Oral Biology*, 40 (5), 401-403.

Rémond D., Machebeuf M., Yven C., Buffière C., Mioche L., Mosoni L., Patureau P. (2007). Postprandial whole-body protein metabolism after a meat meal is influenced by chewing efficiency in elderly subjects. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 85 (5), 1286-1292.

Szczesniak A.-S. (2002). Texture is a sensory property. *Food Quality and Preference*, 13, 215-225.

Woda A., Mischellany A., Peyron M.-A. (2006). The regulation of masticatory function and food bolus formation. *Journal of Oral Rehabilitation*, 33, 840-849.

Woda A., Foster K., Mischellany A., Peyron M.-A. (2006). Adaptation of healthy mastication to factors pertaining to the individual or to the food. *Physiology & Behavior*, 89, 28-35.