



Caractérisation à température ambiante d'un "Ready to use therapeutic food": le produit Plumpy'Nut[®]

Jean Marc Saiter^{1,3}, Maxime C. Bohin², Chloé Sainlaud^{1,2}, Hubert Eudier³, Laura Dehondt³

¹ Laboratoire Sciences et Méthodes Séparatives, EA 3223, Université de Rouen Normandie, 76821 Mont Saint Aignan Cedex, France

² Nutriset, Groupe Nutriset, Hameau du Bois Ricard, CS 80035, 76770 Malaunay, France

³ Onyx Développement SAS, Groupe Nutriset, 640 Chemin du Château, 76770 Malaunay, France

Infos	Abstract - Résumé
Received: 15 February 2022 Accepted: 09 August 2022	The Plumpy'Nut [®] is a high energetic ready to use therapeutic food. This is a complex mixture of nutritive elements and fatty substances leading to have a material with many different coexisting phases which monitor the taste performances. This work is focused to try to associate one or various phases to one specific taste in order to be able to adapt a taste to a composition. This is how that the Crystallinity is monitored by the palm oil which gives the grainy aspect, very sensitive to the cooling rate. On the other hand this is the fatty liquid phases which control the viscosity, very sensitive to the temperature.
Keywords - Mots clés Complex mixture, fatty substance, taste performances, crystallinity, viscosity	
Mélanges complexes, corps gras, propriétés gustatives, cristallinité, viscosité	Le produit Plumpy'Nut [®] est un mélange complexe de corps gras et d'éléments nutritifs qui lui confère une haute valeur énergétique. Ce mélange complexe est constitué de plusieurs phases qui donnent au produit fini sa texture. Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à déterminer quelles sont les phases responsables des propriétés gustatives et nous avons déterminé quels sont les paramètres qui peuvent en changer les performances. Nous avons déterminé que l'huile de palme était le principal responsable de la cristallinité, qui donne l'aspect granuleux (ou pas) au produit et que ce sont les vitesses de refroidissement qui en contrôlent l'évolution. Tandis que ce sont les fractions grasses liquides (huile de palme, d'arachide, etc..) qui contrôlent la viscosité et que cette dernière est dépendante de la température.
Corresponding authors emails: jmsaiter@nutriset-dev.fr	

1. INTRODUCTION

Le produit Plumpy'Nut[®] est un aliment thérapeutique prêt à l'emploi (ou RUTF pour Ready to use therapeutic food) qui se présente sous la forme de sachets individuels d'une contenance de 92 g de pâte riche en arachide. Il cible plus particulièrement le problème de la malnutrition aiguë sévère des enfants à partir de 6 mois. Un sachet représente un apport énergétique de 500 kcal, ce qui du point de vue nutritionnel en fait un produit à haute valeur énergétique avec un rapport énergie reçue/masse absorbée > 5 kcal/g, à comparer pour l'exemple à ce que donne un fruit comme la banane (0,9 kcal/g) qui est considérée comme un fruit énergétique ; une fève comme le cacao qui présente un score de l'ordre de 2,3 kcal/g ou enfin le Nutella[®] qui est aussi une pâte (à base de noisette) et qui présente un score de 1,5 kcal/g. L'efficacité nutritionnelle du produit Plumpy'Nut[®] n'est plus à démontrer. Elle a fait l'objet de plusieurs travaux indépendants [1-4] ce qui conduit aujourd'hui à considérer le produit Plumpy'Nut[®] comme matériau de référence pour des études portant sur l'efficacité de recettes nouvelles [5,7].

Du point de vue matériau, nous pouvons définir le produit Plumpy'Nut[®] comme un mélange multiphasique complexe par le nombre des éléments qui le constitue, mais également par le nombre de structures obtenues après leur association. C'est la manière dont ces phases seront associées qui donnera à l'utilisateur la sensation d'un matériau homogène ou inhomogène. A cette complexité, nous avons à considérer la possibilité d'une difficulté supplémentaire du fait que la plupart des éléments de la recette sont issus de ressources naturelles. Ceci peut conduire à une grande dispersion des valeurs des grandeurs caractéristiques des constituants (compositions, pureté, ...) et donc limiter la possibilité de proposer des modèles propriétés/structures fiables.

Ainsi dans ce travail, nous allons mettre en œuvre une batterie de tests en utilisant un principe simple dicté par la philosophie suivante : plus le problème est compliqué, plus sa modélisation doit en être simplifiée. La conséquence de ce principe est qu'il est illusoire d'analyser l'ensemble du matériau à des échelles fines (moléculaires) et que l'échelle macroscopique doit être largement suffisante. Il s'agit donc dans un premier temps d'étudier le matériau dans sa globalité. Dans ce papier, nous avons donc mis en pratique ce principe en faisant des études calorimétriques, structurales, et texturales. Nous tenterons d'en déduire les grandes tendances qui permettront de définir des propriétés mesurables en lien avec l'usage.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1. Matériels

Les essais ont été effectués sur des échantillons sélectionnés et issus d'une même production industrielle. Pour des raisons évidentes de confidentialité, il n'est pas possible d'en détailler précisément la composition, cependant nous pouvons donner les teneurs de chaque catégorie des constituants. Le tableau 1 donne ces quantités. Nous pouvons considérer le produit Plumpy'Nut[®] comme étant une matrice composée d'une dispersion de poudres au sein d'une fraction lipidique. Cette dernière est constituée d'huile de palme raffinée, de pâte d'arachides toastées, d'huile de colza et d'un « stabilisant » (mélange de matière grasse totalement hydrogénée et de mono et diglycérides d'acides gras). La pâte d'arachide est composée à hauteur de 50% en masse de lipides dont une fraction est non-libre car contenue dans des corps lipidiques non endommagés lors du broyage des arachides. Le produit Plumpy'Nut[®] contient moins de 2% en masse d'eau. La valeur d'activité de l'eau est de $a_w = 0,3$.

2.2. Indentation (texturométrie)

La texture est analysée à l'aide d'un texturomètre TA.XT Plus (Stable Micro System) doté d'une sonde conique (module HDP/SR) avec un angle d'inclinaison de 45°, d'un capteur de force limité à 50 N max. La vitesse de déplacement de la sonde est de 2 mm/s, et la profondeur de pénétration est de 5 mm.

2.3. Analyse calorimétrique

Les analyses thermiques ont été effectuées avec un calorimètre Netzsch DSC 214 Polyma. Les masses d'échantillons utilisées sont de l'ordre de 10 mg. Le domaine de température analysé est compris entre -70°C et 100°C. Les mesures sont effectuées sous gaz inerte (azote, 40ml/min). Les calibrations en température et énergie ont été réalisées en utilisant la fusion d'une batterie de standards scannant le domaine de température étudié (i.e. Mercure, Indium, Etain, Bismuth et Zinc).

2.4. Diffraction de rayons X

L'équipement utilisé est un diffractomètre In-situX[®] développé au sein du laboratoire SMS de l'Université de Rouen [8]. Il s'agit d'un goniomètre à géométrie inversée (- θ / θ) associé à un détecteur Lynx Eye[®] (Bruker, Germany), et une source de rayons X provenant d'une anticathode en cuivre. L'analyse est effectuée avec un pas de 0,04° sur une plage 2 θ allant de 3 à 30°.

Tableau 1. Composition du produit Plumpy'Nut[®]

Ingrédient	Proportion en masse
Sucre	15 – 25 %
Arachides	15 – 25 %
Huiles végétales	15 – 25 %
Poudre de lait	10 – 20 %
Poudre de lactosérum	< 15%
Minéraux et vitamines	< 5%
autres	< 1%

3. RESULTATS

La figure 1 montre les signaux obtenus par mesures calorimétriques pour le produit Plumpy'Nut[®]. Les signaux obtenus donnent une succession de phénomènes exothermiques au cours du refroidissement et de nombreux phénomènes endothermiques et exothermiques au cours du recuit. Cela conduit à dire que le matériau présente une signature thermique excessivement complexe. Sur la figure 1, une ligne pointillée a été ajoutée comme repère donnant une température dite d'usage $T_u=20^\circ\text{C}$. Notons que ces signaux se rapprochent de la signature de l'huile de palme. Pour des températures inférieures à 20°C , les corps gras concernés sont principalement insaturés (fraction oléine) et pour des températures supérieures à 20°C , principalement saturés (fraction stéarine). A la température de 20°C , il a été démontré que l'huile de colza et l'huile d'arachide sont à l'état liquide [9], le « stabilisant » est encore en phase solide et l'huile de palme, quant à elle, est constituée d'une partie liquide et d'une partie encore solide. Entre 0°C et 10°C au cours du chauffage, un signal exothermique apparaît qui tend à se superposer avec une fin de signal endothermique ($T < 0^\circ\text{C}$) caractéristique d'une fusion. Pour les systèmes macromoléculaires cristallins, il est commun d'avoir plusieurs formes polymorphiques qui fondent les unes après les autres. Lors de ces fusions, certaines devenues liquides peuvent précipiter dans un système cristallin plus stables pour fondre par la suite à plus haute température [10]. C'est ce qui est observé sur la figure 1. Il a été démontré que les amplitudes des phénomènes observés au cours du recuit sont très dépendantes des vitesses de refroidissement auquel est préalablement soumis le matériau [11,12]. Avec de tels signaux, vouloir déterminer les enthalpies caractérisant chaque transition est impossible. Cependant une analyse globale intégrant l'ensemble des phénomènes et conduisant à analyser comment l'enthalpie cumulée à une température T rapportée à l'enthalpie totale du signal estimé sur toute la gamme de température scannée (méthode des aires partielles) permet d'estimer l'évolution des fractions cristallines en fonction de la température. La figure 2 donne un exemple de ce qui est obtenu pour de l'huile de palme. Nous pouvons immédiatement conclure que la vitesse de refroidissement impacte fortement la quantité de phase solide qui persistera par la suite à 20°C .

Pour finir, compte tenu de ces résultats, nous pouvons proposer la figure 3 comme un premier modèle très synthétique de ce qu'est le produit Plumpy'Nut[®] lorsqu'il est maintenu à 20°C .

L'huile de palme joue un rôle essentiel en ce qui concerne les structures cristallines qui existent dans le produit Plumpy'Nut[®] lorsqu'il est maintenu à 20°C , c'est donc sur cet élément que les études structurales vont principalement porter. La figure 4 présente les résultats obtenus en SAXS lors de la cristallisation de l'huile de palme suivant un profil de refroidissement dit lent ($0,08^\circ\text{C}/\text{min}$).

Les deux premiers pics à se former en SAXS apparaissent à $q=0,147 \text{ \AA}^{-1}$ [$42,6 \text{ \AA}$] (à 30°C) et à $q=0,293 \text{ \AA}^{-1}$ [$21,4 \text{ \AA}$] (à 8°C), relatifs à une structure en deux longueurs de chaîne (2L). À partir de -2°C , deux autres pics apparaissent aux positions $q=0,098 \text{ \AA}^{-1}$ [$64,3 \text{ \AA}$] et $q=0,193 \text{ \AA}^{-1}$ [$32,6 \text{ \AA}$] et correspondent à une structure en trois longueurs de chaîne (3L). Ces résultats sont conformes à ceux de Chong et al. [13].

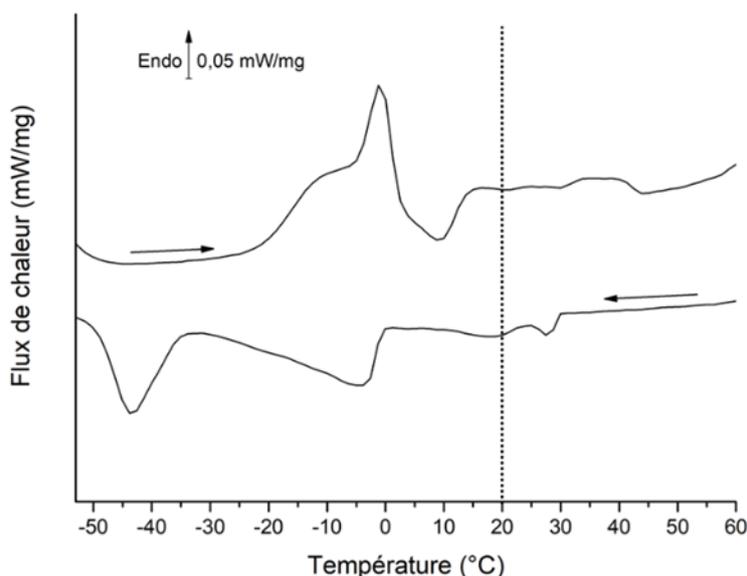


Figure 1. Profil thermique du produit Plumpy'Nut[®] au chauffage et au refroidissement à la vitesse de $5^\circ\text{C}/\text{min}$, après suppression de l'histoire thermique. La ligne en pointillée correspond à la température dite d'usage.

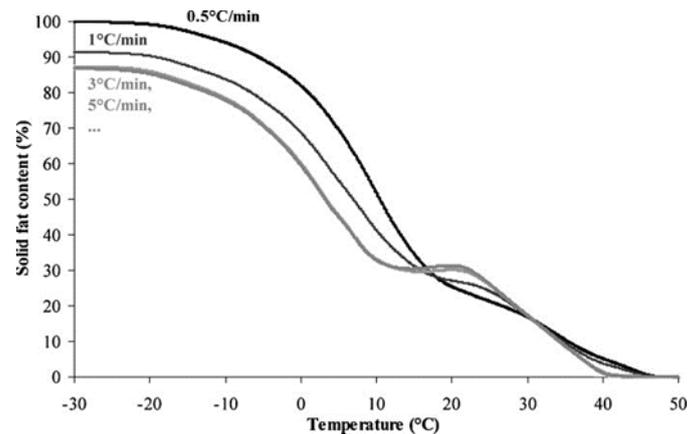


Figure 2. Exemple de l'évolution des fractions solides dans le cas de l'huile de palme seule et pour des refroidissements de 0,5°C/min à 5°C/min (d'après [11]).

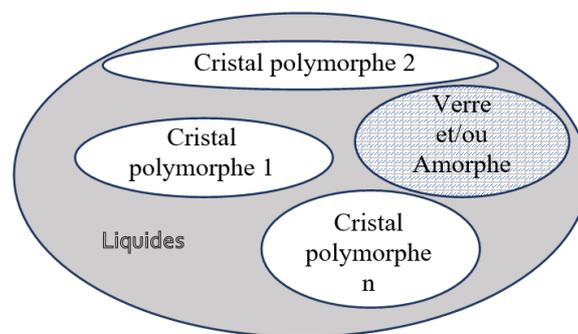


Figure 3. Modèle synthétique de ce qu'est le produit Plumpy'Nut[®] lorsqu'il est maintenu à 20°C.

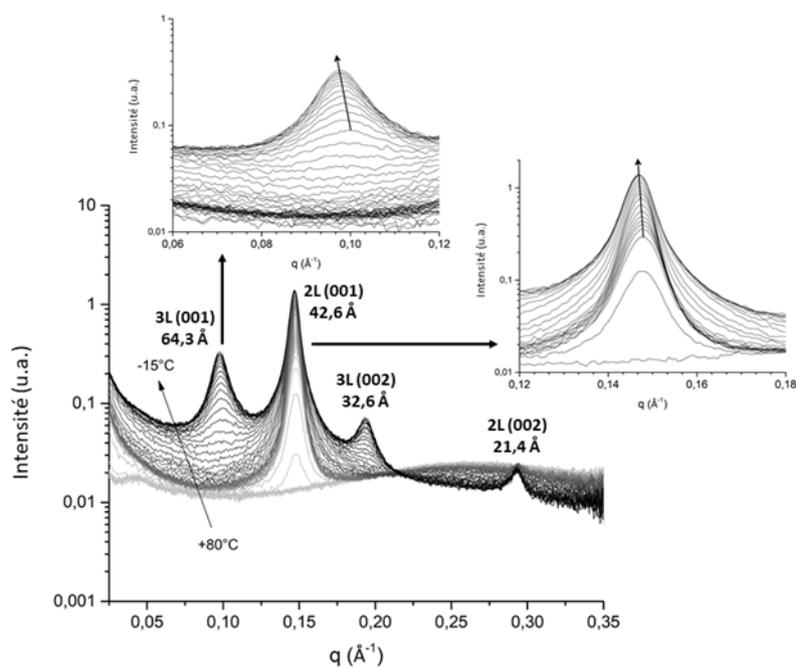


Figure 4. Résultats de l'analyse SAXS d'un échantillon d'huile de palme refroidi selon un profil de refroidissement « lent » de 80°C à -15°C (du gris vers le noir). Les deux inserts correspondent à des zooms sur les pics situés à $q=0,098\text{Å}^{-1}$ et $q=0,147\text{Å}^{-1}$. Les flèches montrent la tendance du maximum de ces pics à se décaler vers de plus basses valeurs de q pendant le refroidissement.

En se basant sur la bibliographie où une analyse WAXS est disponible, il est possible d'associer les structures en 2L et 3L à une forme polymorphique β' . Les cinétiques d'apparition des pics observés en SAXS associés aux structures cristallines correspondantes sont représentées sur la figure 5. L'évolution des tailles des cristaux alors observés par microscopie optique à lumière polarisée et les valeurs des diamètres moyens des sphérulites observés sont présentées sur la figure 6.

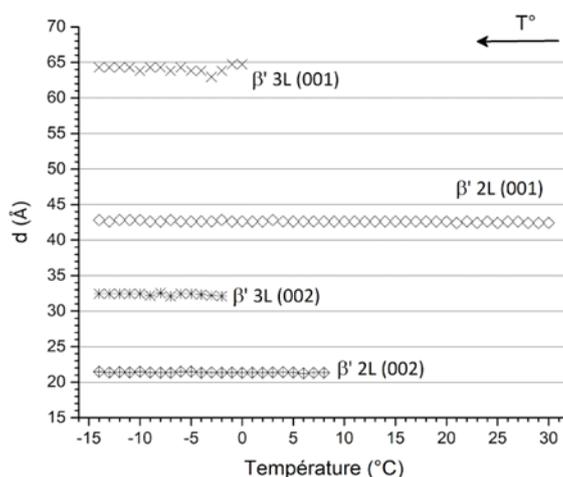


Figure 5. Distances d (Å) associées aux pics formés pendant le refroidissement d'un échantillon d'huile de palme selon un profil dit lent.

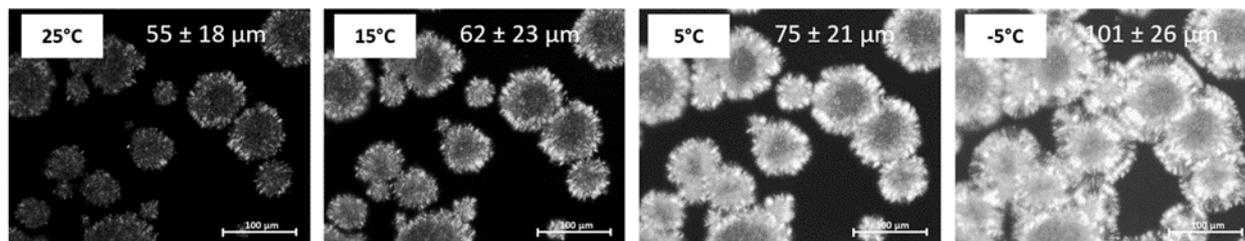


Figure 6. Évolution de la taille des cristaux en fonction de la température au cours d'un refroidissement dit lent.

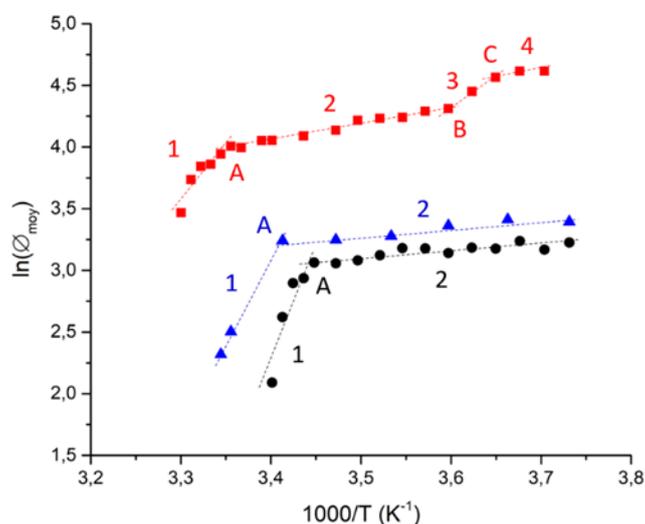


Figure 7. Évolution de $\ln(d_{\text{moy}})$ ($d_{\text{moy}} = \Phi_{\text{moy}} =$ diamètre moyen des cristaux) en fonction de $1000/T$.

A partir de l'évolution des valeurs des tailles des cristaux en fonction de la température et en choisissant des coordonnées réduites de type $\ln(d) = f^*1/T$ il est possible, si une ou plusieurs droites sont obtenues, de vérifier l'existence d'une loi d'Arrhenius et donc de déterminer des énergies d'activation apparentes caractérisant les cinétiques de cristallisation. La figure 6 présente les évolutions des diamètres des cristaux au cours d'un refroidissement lent. Nous pouvons distinguer 3 secteurs notés de 1 à 3 dans le sens des températures décroissantes. Le secteur 1 correspondant au domaine des températures comprises entre 30°C et 25°C présente une activation apparente de 72 kJ/mol. Le second domaine s'étend de 20°C à 4°C et présente une valeur d'activation relativement faible de 11 kJ/mol. Concernant le troisième domaine correspondant aux températures inférieures à 4°C, il paraît plus difficile de le considérer comme Arrhénien (existence possible d'un quatrième régime noté 4 sur la figure 7).

Sur la figure 7, la température d'usage est voisine de $1000/T = 3,4$ ainsi, si le produit Plumpy'Nut® est stocké à des températures basses et s'il est obtenu avec une vitesse de refroidissement lente, il y aura peu de transformation de la taille des cristaux car pour ces températures la cristallisation est très faiblement activée (mode 2). Cependant, si la température de stockage augmente alors le système passera en mode 1 avec une cinétique de transformation beaucoup plus activée (7 fois plus que le mode 2) et des poursuites de modifications des structures cristallines auront lieu.

Après l'étape de cristallisation obtenue avec ce profil de refroidissement « lent », l'échantillon d'huile de palme a été soumis à un recuit de -15°C à 30°C par paliers de 12 min tous les 5°C. Le résultat obtenu en SAXS est présenté sur la figure 8.

Nous observons qu'un décalage vers les plus hautes valeurs de q (petites distances) au cours de la fusion s'opère. Le phénomène observé au cours du refroidissement est donc réversible. La solution solide adapte sa composition à la température. Cette observation rejoint celle faite par Chong et al.[13]. Les pics situés à $0,099 \text{ \AA}^{-1}$ [63 Å], $0,196 \text{ \AA}^{-1}$ [32 Å] et $0,295 \text{ \AA}^{-1}$ [21 Å] disparaissent à partir de 15°C. À 30°C, seul le pic relatif à la structure $2L\beta'$ (001) ($0,148 \text{ \AA}^{-1}$ [43 Å]) subsiste. Il s'agit donc de la structure la plus stable en température. Du point de vue usage, l'existence de cristaux dont la taille n'est pas constante peut impacter les propriétés sensorielles en donnant un caractère plus ou moins granuleux. Plus les cristaux seront gros, plus cet aspect granuleux en bouche se fera sentir (pour mémoire, la limite de détection d'un grain par la langue est de l'ordre de 25 micromètres).

Les mesures d'indentation (analyse texturale) obtenues sur le produit Plumpy'Nut® sont reportées sur la figure 9. Afin de vérifier si nos mesures ont du sens, les mêmes mesures ont également été effectuées sur un autre produit commercial (le Nutella®). Les résultats obtenus sont également présentés sur la figure 9.

En premier lieu, les formes des courbes obtenues pour ces deux types de produits sont similaires. Elles présentent une augmentation continue de la valeur de la force avec le déplacement de la sonde dans les matériaux. Ce type de comportement se classe dans la rubrique des comportements visco-elastico-plastiques [14]

Si nous définissons la fermeté comme étant la résistance d'un matériau à subir une déformation, soit ici la valeur de la force (F_d) nécessaire pour que la sonde effectue un déplacement donné d dans le matériau. Nous obtenons $F_{5(\text{plumpy})} = 0,3 \text{ N}$ et $F_{5(\text{nutella})} = 0,2 \text{ N}$. Ce qui nous amène à conclure que le produit Plumpy'Nut® est beaucoup plus ferme que le Nutella®.

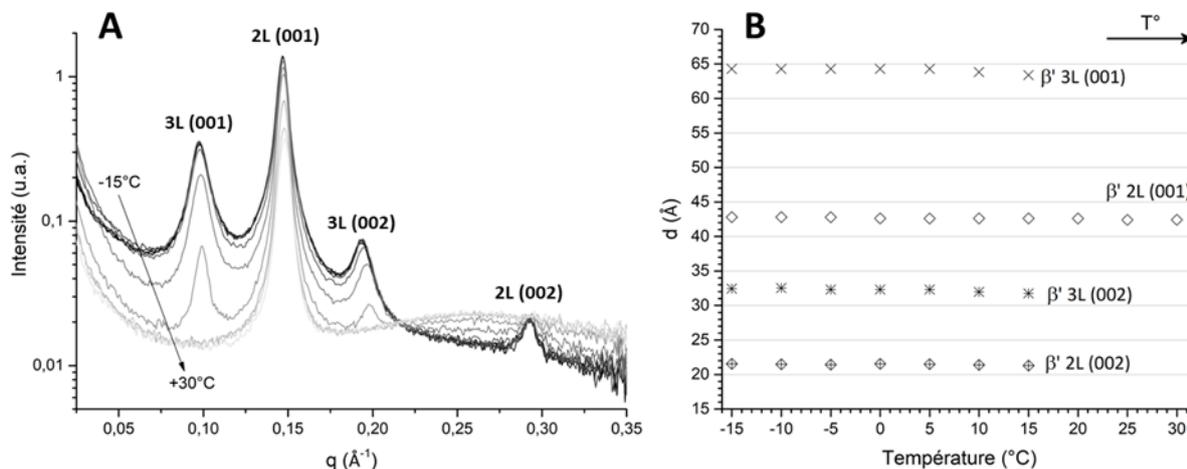


Figure 8. (A) Analyse SAXS d'un échantillon d'huile de palme lors d'une étape de chauffage allant de -15°C à 30°C (du noir au gris) après avoir suivi un refroidissement « lent » ; (B) Distances $d(\text{Å})$ associées.

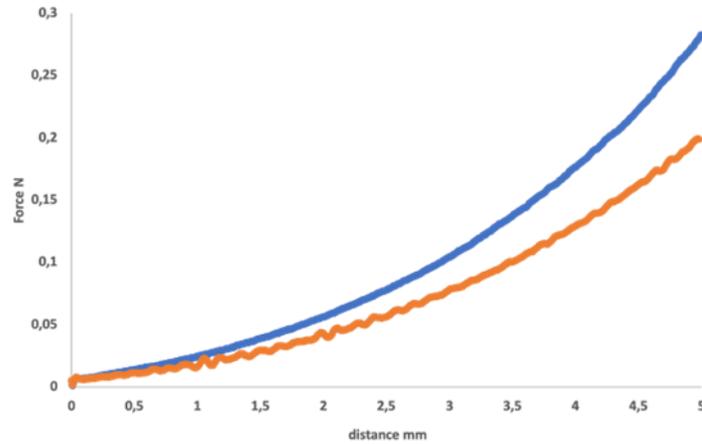


Figure 9. Mesures par indentation effectuées sur le produit Plumpy'Nut[®] et du Nutella[®]

La modélisation des comportements observés est souvent effectuée par l'utilisation de régression polynomiale pouvant aller jusqu'à l'utilisation de polynômes de degrés 4 [15-16]

$$Y = \sum_i a_i x^i \quad (1)$$

Ceci n'est pas satisfaisant car les valeurs des paramètres d'ajustement a_i n'ont aucune signification physique. Par ailleurs, l'expérience montre que le degré du polynôme à utiliser est directement fonction de la profondeur de pénétration testée (si nous diminuons le domaine de lissage, un polynôme de degrés 4 pourra être remplacé par un polynôme de degré 3 etc. et les coefficients d'ajustement a_i obtenus seront différents d'un lissage à l'autre). C'est pour cela que nous préférons tester une loi du type :

$$y = y_0(e^{(bx)^n} - 1) \quad (2)$$

qui peut être comprise comme une fonction de distribution de type exponentielle étendue et dont la valeur de n donne une idée de la largeur de la distribution (plus la valeur de n est proche de zéro, plus le système étudié est largement distribué et de façon inverse, si n est proche de 1 plus le système se comporte comme un phénomène équivalent à ce que donnerait une simple exponentielle). La valeur de b est supposée être une constante du matériau dont l'inverse (D_c) est une distance caractéristique du matériau si x est une distance mais peut aussi être une constante de temps (τ) si x est un temps. Pour cette dernière formulation, l'équation 2 devient

$$y = y_0(e^{\left(\frac{t}{\tau}\right)^n} - 1) \quad (3)$$

Avec cette dernière équation, il est plus aisé de se faire une idée du sens de Y_0 . En effet pour $t = \tau$, $Y = Y_\tau$, ce qui permet d'écrire que $Y_0 = Y_\tau / 1,72$. Ainsi avec ce modèle, la fermeté n'est plus déterminée à partir d'une valeur d'une force pour un déplacement choisi arbitrairement mais à partir du lissage complet de la courbe force déplacement.

L'utilisation de l'équation 2 aux résultats présentés sur la figure 9, conduit aux valeurs suivantes :

- Pour le produit Plumpy'Nut[®]
 - $Y_0 = 0,00535 \text{ N}$
 - $b = 2,16 \text{ m}^{-1}$
 - $n = 0,582$
- Pour le Nutella[®]
 - $Y_0 = 0,00300 \text{ N}$
 - $b = 2,78 \text{ m}^{-1}$
 - $n = 0,550$

Il faut noter que la sensibilité du lissage à la valeur de n est très importante. Aussi une valeur de $n = 0,58$ est très différente de $n = 0,55$.

Ainsi, si nous souhaitons comparer les résultats des deux produits, la valeur Y_0 nous donnerait que la fermeté du produit Plumpy'Nut[®] est plus importante que celle du Nutella[®], que les distances caractéristiques des déformations sont plus faibles pour le Nutella[®] et enfin que la largeur de la distribution du phénomène de déformation est plus faible pour le produit Plumpy'Nut[®].

4. CONCLUSION

Dans ce travail, une première approche utilisant des méthodes analytiques simples a été déployée pour tenter de mettre en place une compréhension des comportements d'un matériau complexe, le produit Plumpy'Nut[®]. Ces premiers résultats permettent d'en proposer un modèle simplifié lié à son usage. C'est ainsi que pour ce qui concerne le comportement en bouche, deux aspects ont été abordés ; la sensation de grain et la consistance. La première est liée à la cristallinité de l'huile de palme, la seconde est liée aux mélanges des phases liquides et solides. Pour la consistance, une nouvelle loi est proposée pour l'utilisation des mesures d'indentation, qui permet de déterminer des grandeurs caractéristiques du matériau de façon indépendante des conditions opératoires.

REFERENCES

- [1] A. Briend, R. Lacsala, C. Prudhon, B. Mounier, Y. Grellety, M. H. N. Golden. Ready-to-use therapeutic food for treatment of marasmus, *The Lancet*, 353, (1999), 1767-8
- [2] I. Potani, C. Spiegel-Feld, G. Brixi, J. Bendabenda, N. Siegfried, R. H. J. Bandsma, A. Briend, A. I. Daniel. Ready-to-Use Therapeutic Food (RUTF) Containing Low or No Dairy Compared to Standard RUTF for Children with Severe Acute Malnutrition: A Systematic Review and Meta-Analysis, *Advances in Nutrition*, 12, (2021), 1930–1943
- [3] E. Boahen, S. Wiredu. Assessment of Malnourished Children under Plumpy'Nut Clinical Trial, *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, 6, (2016), 81-99
- [4] H.U. Rehman, M. Nasir, M. Abdul Jabbar, M. Ayaz, M. A. Ali, M. Imran, T. A. Gondal, T. Tufail, F. Aslam, T. B. Qaisrani, M. U. Sattar, B. Salehi, N. Martins, J. Sharifi-Rad. Bio-therapeutics effects of probiotic strain on the gastrointestinal health of severely acute malnourished children. *Cellular and Molecular Biology*, 66, (2020), 65-72
- [5] M. Sangare, N. Conde, A. Sangare. Aliment alternatif au Plumpy'Nut dans la prise en charge de la malnutrition aiguë en Guinée, *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, 37, (2021), 212 - 226
- [6] E. Dery. Acceptability of Plumpy'Nut among malnourished children in selected rehabilitation centres in Accra metropoli, Thèse de l'Université du Ghana, département nutrition et diététique, (2018)
- [7] D. L. Swai, Nutritional and sensory quality of extruded peanuts-soybeans-cassava composite flakes for rehabilitating acutely malnourished children, Dissertation pour un degré de Master en sciences de nutrition humaine de l'Université de Sokoine, Université d'agriculture de Morogoro, Tanzanie, (2013)
- [8] A. Lafontaine. Développement et validation d'un prototype de diffractomètre à rayons X insitu sur poudre. Thèse de doctorat en Chimie des Matériaux, Université de Rouen, (2009)
- [9] C. Sainlaud. Caractérisation du vieillissement de matrices alimentaires enrichies à base lipidique. Etude de l'évolution de leurs propriétés texturales au cours du temps. Thèse de doctorat en Physique, Université de Rouen Normandie, (2021)
- [10] N. Delahaye, R. Duclos, J.M. Saiter, S. Varnier, Characterization of solid dispersion phase transitions using a new optical thermal analyzer. *Drug development and Industrial Pharmacy*, 23, (1997), 299-303
- [11] A. Vuillequez, L. Koza, B. Youssef, M. Bridier, J.M. Saiter. Thermal and Structural Behavior of Palm Oil. Influence of Cooling Rate on Fat Crystallization, *Macromolecular Symposia*, 290, (2010), 137–145
- [12] A. Vuillequez. Stabilité physique de mélanges complexes à caractère cristallin et amorphe : application à l'huile de palme et à la poudre de lait, Thèse de doctorat en Physique, Université de Rouen, (2010)
- [13] CL. Chong, Z. Kamarudin, P. Lesieur, A. Marangoni, C. Bourgaux, M. Ollivon. Thermal and structural behaviour of crude palm oil: Crystallisation at very slow cooling rate, *European Journal of Lipid Science and Technology*, 109, (2007), 410-421
- [14] Z. Huang, M. Lucas, M. J. Adams. A numerical and experimental study of the indentation mechanics of plasticine, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 37, (2002), 141-150
- [15] C. Mardoc, M.C. Bohin, L. Gohin, A. Bion-Robin, J.M. Saiter. Indentation and Calorimetric Measurements on a Peanut-Based Path, *Macromolecular Symposia*, 379, (2018)