



HAL
open science

Des préparations pour nourrissons innovantes basées sur un mélange de protéines végétales et animales : de la fabrication à la digestion

Linda Le Roux, Raphaël Chacon, Romain Jeantet, Françoise Nau, Amélie Deglaire

► To cite this version:

Linda Le Roux, Raphaël Chacon, Romain Jeantet, Françoise Nau, Amélie Deglaire. Des préparations pour nourrissons innovantes basées sur un mélange de protéines végétales et animales : de la fabrication à la digestion. *Industries Alimentaires et Agricoles*, 2023, 83, pp.29-34. hal-04032279

HAL Id: hal-04032279

<https://hal.inrae.fr/hal-04032279>

Submitted on 16 Mar 2023

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

Des préparations pour nourrissons innovantes basées sur un mélange de protéines végétales et animales : de la fabrication à la digestion

Linda LE ROUX *, Raphaël CHACON *, Romain JEANTET **, Françoise NAU **, Amélie DEGLAIRE **

* SILL Dairy International, Raden, Plouvien

** STLO, INRAE, L'Institut Agro, Rennes

Les préparations pour nourrissons (PPNs), seul substitut au lait maternel nutritionnellement adéquat, sont majoritairement à base de protéines laitières. Ces dernières pourraient être remplacées en partie par des protéines végétales, constituant ainsi une éventuelle alternative nutritionnelle, fonctionnelle et durable. L'objectif de cette étude était d'évaluer les conséquences de la substitution des protéines du lactosérum par des protéines végétales (pois, féverole, riz ou pomme de terre) sur la fabrication de PPNs, leurs fonctionnalités et leur digestibilité in vitro. Les PPNs végétalisées répondaient aux exigences réglementaires quant à leur profil en acides aminés essentiels. Celles à base de protéines de riz ou pomme de terre présentaient des défauts de viscosité et de solubilité, mais celles à base de protéines de pois ou féverole avaient des propriétés physico-chimiques et nutritionnelles proches de la PPN laitière. Ces résultats prometteurs nécessitent d'être complétés par des études in vivo et confirmés à l'échelle industrielle.

Mots-clés : digestion, préparations pour nourrissons, protéines végétales, séchage par atomisation, fonctionnalité

ABSTRACT

Infant formulas (IF), the most nutritionally adequate substitute to human milk, are mostly based on dairy proteins. The latter could be replaced by plant proteins, as an eventual nutritional, functional and sustainable alternative. The objective of the present study was to investigate the consequences of the replacement of whey proteins by plant proteins (pea, faba bean, rice or potato) on the manufacturing, functionality and digestibility of IFs. The vegetalized IFs met the regulatory criteria in terms of essential amino acid profile. IFs based on rice or potato proteins had viscosity and solubility defaults, but those based on pea or faba bean proteins had physico-chemical and nutritional properties close to the dairy IF. These promising results have to be completed by in vivo studies and confirmed at the industrial level.

Keywords : digestion, infant formula, plant proteins, spray-drying, functionality

I. INTRODUCTION

Les préparations pour nourrissons (PPNs) sont destinées à l'alimentation des enfants pendant leurs quatre à six premiers mois de vie, lorsque l'allaitement n'est pas possible ou non désiré. Elles doivent répondre à elles seules aux besoins nutritionnels des nourrissons jusqu'à l'introduction d'une alimentation complémentaire (European Union, 2016). Même si les recommandations nutritionnelles préconisent un allaitement exclusif pendant les six premiers mois de vie de l'enfant (Victoria et al., 2016), les réalités s'en éloignent, avec une grande disparité dans le monde. Au niveau mondial, les dernières données indiquent un taux de 48% de nourrissons de moins de six mois exclusivement allaités (UNICEF, 2022). En France, la dernière enquête indique un taux de 18% de nourrissons encore allaités à six mois (Vilain, 2016).

Historiquement, la première PPN a été inventée en 1867. Elle était composée de farine de blé, de lait de vache, de farine de malt et de carbonate de potassium (Barnes, 1987). Il a fallu attendre plus d'un siècle pour voir apparaître le premier décret européen qui réglemente la composition ainsi que la fabrication des PPNs (Bourlieu et al., 2017). Puis, plusieurs directives et réglementations européennes déterminant encore plus spécifiquement la composition des PPNs (concentration en acides aminés essentiels, en macro- et micronutriments, présence obligatoire de DHA etc.) se sont succédées entre 1999 et 2018. La majorité des PPNs développées aujourd'hui sont fabriquées à partir de protéines de lait de vache auxquelles sont ajoutées des protéines de lactosérum, afin de se rapprocher du ratio caséines/protéines de lactosérum retrouvées dans le lait maternel humain, mais surtout pour couvrir les besoins en acides aminés essentiels (AAE) du nourrisson. Mais il existe aussi sur le marché des PPNs à base de protéines autres que les protéines du lait de vache. Notamment, des préparations à base de protéines de soja ou encore de lait de chèvre sont autorisées aujourd'hui dans la réglementation, pour certaines depuis plusieurs années. Ainsi, le marché des PPNs a connu récemment de nombreuses évolutions, dans un cadre toutefois strictement réglementé (Bourlieu et al., 2017).

L'utilisation de protéines autres que les protéines du lait de vache a été autorisée relativement tôt dans l'histoire et est aujourd'hui en plein essor. L'intérêt grandissant pour les protéines alternatives aux protéines animales s'explique notamment par l'augmentation de la population mondiale qui devrait atteindre 9,7 milliards d'habitants en 2050 (United Nations, 2022). Au rythme de consommation actuel, la demande en protéines animales pourrait alors entraîner de fortes problématiques environnementales, telles que l'augmentation d'émission de gaz à effet de serre que l'on sait en partie causée par l'agriculture. Au-delà de cet objectif de durabilité du système alimentaire, l'intérêt grandissant pour les protéines alternatives répond également à des préoccupations éthiques et de santé. Parmi les sources de protéines alternatives, on peut citer les micro-algues (50-70 % de protéines ; spiruline, chlorelle...), les légumineuses (20-40 % de protéines ; soja, pois, féverole, lupin, lentilles...), les

oléagineux (13-35 % de protéines ; soja, tournesol, colza, graines de coton...), les céréales (7-15 % de protéines ; blé, riz, avoine, orge, seigle, maïs...) ou encore les tubercules (1-3 % de protéines ; pommes de terre, manioc...). Ces différentes sources de protéines végétales pourraient constituer d'intéressants substituts aux protéines animales, présentant à la fois des propriétés nutritionnelles et fonctionnelles intéressantes (Ainis et al., 2018 ; Alves & Tavares, 2019 ; Guyomarc'h et al., 2021). Cependant, il existe des freins à leur utilisation, comme la limitation en un ou plusieurs AAE, la présence de facteurs antinutritionnels qui diminuent la digestibilité de ces protéines, ou encore la présence d'allergènes et certains défauts organoleptiques (Kalpanadevi & Mohan, 2013 ; Le Gall et al., 2005 ; Soetan et al., 2007). Ainsi, des solutions devront être trouvées pour pallier ces inconvénients et faciliter l'utilisation de ces protéines végétales en alimentation humaine.

L'apport en protéines tôt dans la vie est essentiel pour assurer le bon développement du nourrisson. Il affecte en effet sa croissance, la maturation de son tube digestif, son développement cérébral, son appétit ou encore sa régulation hormonale et ses défenses immunitaires. Une protéine est dite nutritionnellement équilibrée lorsqu'elle couvre les besoins métaboliques en azote et en AAE. Ceci dépend donc à la fois du profil en acides aminés de la protéine, mais aussi de sa digestibilité qui détermine la quantité de nutriments absorbée et ensuite délivrée à l'organisme pour assurer ses différentes fonctions métaboliques (Dupont & Nau, 2019). Le système digestif du nourrisson présente une certaine immaturité en comparaison de celui de l'adulte. Le pH gastrique est plus élevé (pH compris entre 3.2 et 6.5, comparé à un pH inférieur à 3 chez l'adulte), et la protéolyse est limitée au niveau gastrique du fait d'une moindre sécrétion de la pepsine. De plus, l'activité de la lipase au niveau intestinal est également limitée à la naissance (Bourlieu et al., 2014). Ces spécificités digestives doivent être prises en compte pour garantir la pertinence des modèles in vitro utilisés pour étudier la digestion chez le nouveau-né (Poquet & Wooster, 2016).

Les PPNs sont majoritairement commercialisées sous forme de poudres à reconstituer, plus intéressantes que les formules liquides en termes de conservation, transport et stockage. Au cours du projet présenté ici, seules des PPNs en poudre ont été étudiées. Elles ont été obtenues par un procédé de fabrication dit en « voie humide » (Blanchard et al., 2013), qui consiste tout d'abord à reconstituer les ingrédients secs avec de l'eau. Ensuite, une étape de pasteurisation est appliquée pour garantir la sécurité sanitaire du produit. Une homogénéisation est réalisée après avoir ajouté la matière grasse afin de créer une émulsion qui stabilise la matière grasse à la fois au cours de la fabrication mais également dans le produit fini. En amont du séchage, l'essentiel de l'eau (60 à 70%) est éliminé par concentration sous vide. Enfin, l'étape de séchage par pulvérisation proprement dite consiste à pulvériser le concentré liquide sous forme de très fines gouttelettes dans une enceinte dans laquelle circule un air chaud et sec, permettant en quelques secondes leur transformation en particules de poudre. Les poudres obtenues sont classiquement contrôlées sur différents critères de qualité (contrôles sanitaires, équilibre nutritionnel, solubilité, densité, profile granulométrique, test biberon etc.) avant d'être conditionnées (Schuck et al., 2007).

Les travaux présentés ici sont le fruit d'une thèse CIFRE réalisée en collaboration entre l'Unité Mixte de Recherche STLO (Sciences et Technologies du Lait et de l'Œuf), associant l'INRAE et L'Institut Agro Rennes-Angers, et l'entreprise SILL (Société Industrielle Laitière du Léon, Plouvien, France), qui souhaitait développer des PPNs innovantes au regard des enjeux environnementaux et sociétaux actuels, tout en respectant les recommandations nutritionnelles du nourrisson.

II. OBJECTIF & STRATÉGIE EXPÉRIMENTALE

L'objectif poursuivi dans ce travail de thèse était d'évaluer l'influence du changement de source de protéines sur les propriétés fonctionnelles et la digestibilité de PPNs. Pour cela, la part des protéines de lactosérum habituellement ajoutées aux protéines de lait de vache pour fabriquer les PPNs (représentant 50% des protéines totales), a été remplacée par des protéines alternatives (Figure 1). Ces nouvelles sources de protéines n'étant pas encore autorisées sur le marché européen, le but du projet était d'explorer de manière prospective de potentielles innovations futures.

Pour répondre à cet objectif, une première étape de sélection des protéines alternatives a été conduite, principalement sur des critères nutritionnels. Ensuite, le développement de nouvelles PPNs incorporant ces protéines alternatives a été réalisé d'abord à l'échelle pilote, afin de cribler un grand nombre de produits, puis dans un deuxième temps à l'échelle semi-industrielle. Enfin, la digestibilité de ces nouvelles PPNs a été évaluée en utilisant des modèles de digestion in vitro mimant les conditions physiologiques du nourrisson, en utilisant d'abord un modèle statique, puis un modèle dynamique. Cette démarche est résumée en Figure 1.

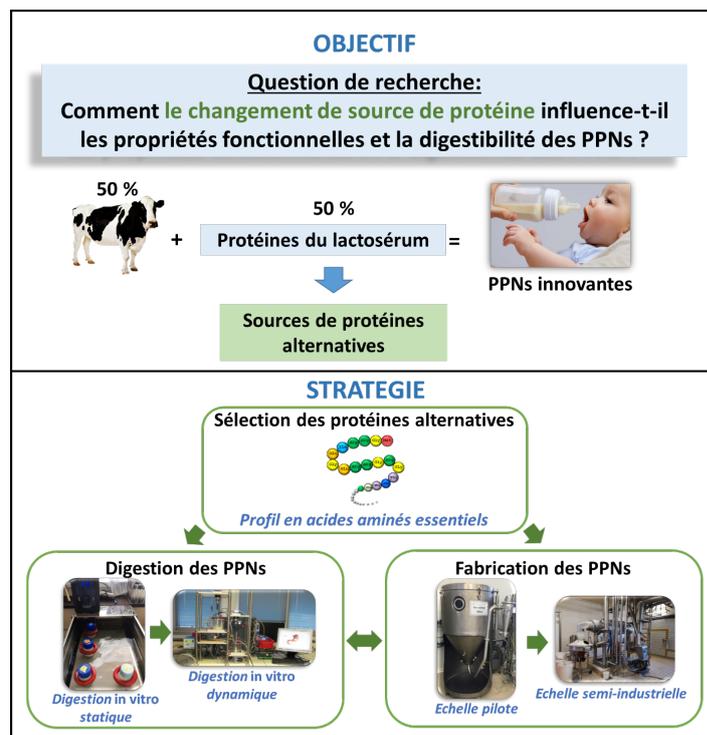


Figure 1. Objectif & Stratégie expérimentale de l'étude (PPN : Préparation pour nourrissons).

III. RÉSULTATS & DISCUSSION

III.1. SÉLECTION DES PROTÉINES ALTERNATIVES

Pour la sélection des sources de protéines alternatives les plus adaptées nutritionnellement, 19 ingrédients protéiques, principalement d'origine végétale, ont été comparés en simulant leur incorporation, en remplacement des protéines de lactosérum, à une PPN laitière classique respectant la réglementation européenne (European Union, 2016) actuellement en vigueur, et considérée comme la référence dans cette étude. En partant de données de la littérature, la comparaison a tout d'abord porté sur la composition en AAE des préparations ainsi modifiées (incorporant des protéines

alternatives) et celle d'une PPN classique. Un indicateur de la qualité nutritionnelle des protéines, adapté du score PDCAAS (protein digestibility-corrected amino acid score, exprimé en %), a également été calculé pour chacune des préparations. Le PDCAAS est calculé à partir de la valeur minimale du ratio entre la proportion d'AAE dans la protéine d'intérêt et celle dans la protéine de référence (adaptée à la catégorie d'âge, ici le nourrisson), puis en multipliant ce ratio correspondant à l'AAE limitant par la valeur de digestibilité vraie de la protéine d'intérêt, qui devait initialement être déterminée au niveau fécale chez un modèle de rat en croissance (FAO/WHO, 1991 ; WHO, 2007). Dans cette étude, nous avons utilisé un score modifié du PDCAAS, en ce sens que la composition en AAE choisie comme référence n'était pas celle de la protéine de référence, mais celle imposée par la réglementation pour les PPNs, et sachant d'autre part que les valeurs de digestibilité utilisées, issues de la littérature, ont été mesurées selon les cas in vivo ou in vitro. Malheureusement, nous n'avons pas pu comparer les différentes préparations sur la base du DIAAS (digestible indispensable amino acid score, exprimé en %), nouvel indicateur jugé plus pertinent par le dernier comité d'experts de la FAO (2013). En effet, cet indicateur prend en compte non pas la digestibilité fécale de la protéine mais la digestibilité iléale vraie de chaque AAE, valeur qui n'est pas toujours disponible dans la littérature, et notamment pour bon nombre des protéines alternatives étudiées ici.

En plus de ces critères nutritionnels, les nouvelles sources de protéines devaient dans l'idéal être exemptes d'allergènes, de défauts organoleptiques, de facteurs antinutritionnels identifiés et être disponibles commercialement sous forme purifiée. Pour finir, la digestion des ingrédients protéiques respectant au mieux tous ces critères a été étudiée à l'aide d'un modèle de digestion in vitro statique, par la mesure du taux de protéolyse et de bioaccessibilité des AAE. La présence de facteurs antinutritionnels a également été testée par mesure d'activité de la trypsine.

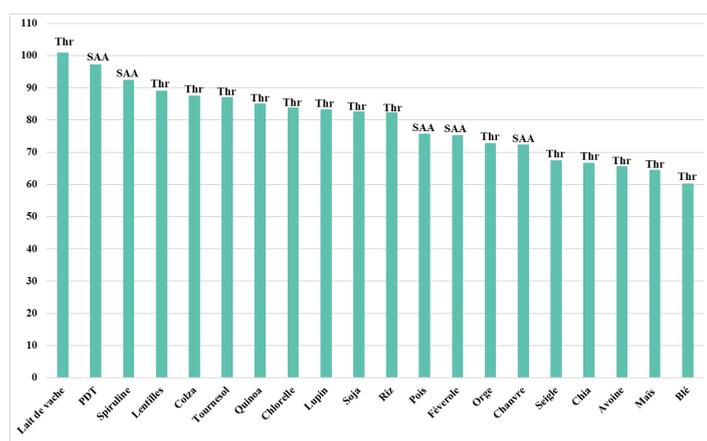


Figure 2. Score modifié de PDCAAS (%) calculé pour des préparations incorporant différentes sources de protéines en remplacement des protéines de lactosérum ; ces scores ont été calculés par rapport à la composition réglementaire en AAE des PPNs 1er âge à 1,6 g de protéines pour 100 ml, prise comme référence. Les acides aminés indiqués pour chaque source protéique correspondent aux acides aminés limitants dans la préparation correspondante. SAA : acides aminés soufrés ; PDT : pomme de terre.

Sur les 19 ingrédients protéiques initialement recensés, 14 ont été jugés de bonne qualité nutritionnelle par rapport aux besoins du nourrisson, avec un score de « PDCAAS modifié » supérieur à 70% (Figure 2). Après avoir écarté les sources de protéines présentant un risque d'allergie, selon la liste officielle à déclaration obligatoire, et

celles présentant des défauts de couleur ou d'odeur, les ingrédients commercialement disponibles ont finalement été sélectionnés, à savoir les protéines de pois, féverole, riz et pomme de terre. La digestion de ces différentes sources protéiques a alors été comparée à celle des protéines de lactosérum qu'elles viendraient remplacer au sein des PPNs.

Les résultats des digestions in vitro n'ont pas montré de différence significative entre les protéines de pois et les protéines de lactosérum, avec des taux de protéolyse respectivement de $42,5 \pm 1,2\%$ et $37,8 \pm 1,8\%$. En revanche, des taux de protéolyse significativement plus faibles ont été mesurés pour les protéines de féverole ($24,9 \pm 3,8\%$), de riz ($16,4 \pm 5,1\%$) et de pomme de terre ($13,2 \pm 2,7\%$). La bioaccessibilité des différents AAE, estimée par la fraction libérée en fin de digestion, était quant à elle maximale pour les protéines de lactosérum (excepté pour la lysine et la leucine), mais avec très peu de différences significatives par rapport aux protéines végétales étudiées, à l'exception des protéines de pomme de terre qui montraient des valeurs 5 à 20 fois inférieures aux autres protéines, selon l'AAE considéré. Enfin, la présence de facteurs antinutritionnels (anti-trypsiniques), souvent retrouvés dans les protéines végétales, n'a été mise en évidence que dans la protéine de pomme de terre (Le Roux, 2019).

III.2. DÉVELOPPEMENT DES PPNs À ÉCHELLES PILOTE ET SEMI-INDUSTRIELLE

Les sources de protéines alternatives les plus pertinentes ayant été sélectionnées, il s'est agi ensuite de vérifier qu'il était possible de fabriquer des PPNs à partir de ces nouveaux ingrédients protéiques, et d'évaluer l'impact du changement de sources de protéines sur les étapes de fabrication et sur les propriétés fonctionnelles des produits finis.

Pour cela, cinq PPNs (les quatre préparations « végétalisées » et la PPN laitière de référence) ont été fabriquées à l'échelle pilote dans un premier temps, pour évaluer la faisabilité de la fabrication. Dans un deuxième temps, la fabrication a été réalisée à l'échelle semi-industrielle afin de se rapprocher au mieux des conditions industrielles sur un choix plus restreint de préparations. Le même schéma technologique a été suivi pour la fabrication à ces deux échelles, à savoir le mélange en solution des ingrédients secs, sa pasteurisation et sa concentration, l'ajout de matière grasse (mélange d'huiles) et l'homogénéisation du mélange ainsi formé, puis son séchage par pulvérisation. De plus, deux voies technologiques différentes ont été testées à l'échelle semi-industrielle : homogénéisation basse pression et température de séchage supérieure ($8/2 \text{ MPa} - 165^\circ\text{C}$) vs homogénéisation haute pression et température de séchage inférieure ($14/4 \text{ MPa} - 150^\circ\text{C}$). Des analyses physico-chimiques et de microscopie confocale ont été réalisées au cours des fabrications et sur les produits finis, afin de caractériser les propriétés fonctionnelles de ces PPNs innovantes (Le Roux, 2019).

Le développement à l'échelle pilote a permis de mettre en évidence certains points critiques, notamment des limites de viscosité lors de la fabrication de la préparation à base de protéines de pomme de terre, mais également des limites de solubilité pour celle à base de protéines de riz (Figure 3). A l'inverse, les PPNs à base de protéines de pois et de féverole ont montré à la fois des comportements au cours de la fabrication et des propriétés fonctionnelles relativement proches de la PPN de référence. Suite à ces premiers résultats, il a été décidé d'écartier les protéines de pomme de terre et de riz pour la suite du projet, sachant qu'en plus des facteurs antinutritionnels avaient été préalablement détectés dans la protéine de pomme de terre (Cf. § III.1.).



Figure 3. Illustration des limites de solubilité pour la préparation à base de protéines de pomme de terre (PDT) après l'étape de concentration ; Limites de solubilité pour la préparation à base de protéines de riz comparée à celle à base de protéines de féverole au cours de leur fabrication (M : mélange ; P : pasteurisation ; C : concentration ; H : homogénéisation).

La fabrication à l'échelle semi-industrielle a donc été réalisée uniquement pour les PPNs contenant des protéines de pois et de féverole, en comparaison à la préparation laitière de référence (Le Roux et al., 2020). Le suivi de la fabrication de ces trois préparations en microscopie confocale a mis en évidence des agrégats de protéines insolubles présentes tout au long de la fabrication dans les PPNs « végétalisées » (Figure 4). Les analyses physico-chimiques ont cependant montré peu de différences entre les trois PPNs, hormis une plus forte viscosité pour celle à base de protéines de pois (0,8 Pa.s vs 0,06 Pa.s pour la PPN à base de protéines de féverole et 0,03 Pa.s pour la PPN laitière de référence). De plus, des résultats sensiblement meilleurs ont été obtenus avec les paramètres de la voie technologique basse pression d'homogénéisation et haute température de séchage, notamment en termes de viscosité du concentré avant séchage (moins visqueux) et de matière grasse libre (moins de matière grasse libre dans la poudre finale). Des calculs théoriques ont également permis de montrer que la quantité de protéines laitières présentes dans les trois PPNs était suffisante pour stabiliser l'émulsion, malgré la présence d'agrégats protéiques en amas peu solubles dans les préparations « végétalisées » (Figure 4).

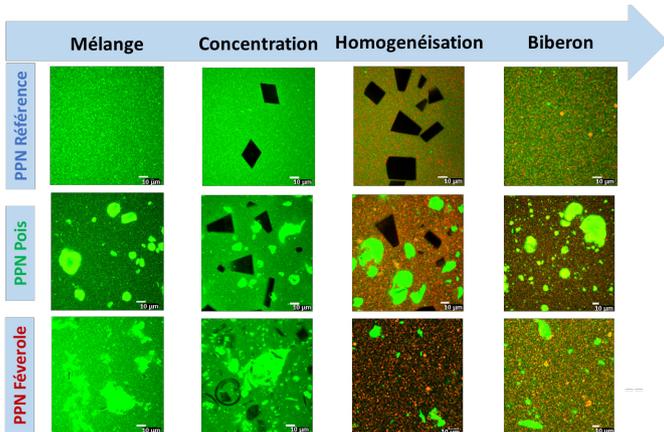


Figure 4. Organisation spatiale des lipides (rouge) et des protéines (vert) observée en microscopie confocale dans les trois préparations pour nourrissons (PPNs) au cours des différentes étapes de fabrication à l'échelle semi-industrielle (obtenues par la voie technologique basse pression d'homogénéisation et haute température de séchage), du mélange des ingrédients jusqu'à la reconstitution des poudres en biberons.

III.3. DIGESTIBILITÉ IN VITRO DES PRÉPARATIONS POUR NOURRISSONS

Pour évaluer l'impact du changement de sources de protéines sur la digestibilité des PPNs, des digestions in vitro simulant les conditions physiologiques du nourrisson ont été réalisées, selon des protocoles adaptés de Ménard et al. (2014) et Ménard et al. (2018). Dans un premier temps, les cinq PPNs développées à l'échelle pilote (pois, féverole, riz, pomme de terre et référence laitière) ont été soumises

à un modèle de digestion en conditions statiques, relativement simplifié et facile à mettre en œuvre. Puis, les trois préparations développées à l'échelle semi-industrielle ont été évaluées en utilisant un modèle de digestion en conditions dynamiques, plus sophistiqué et qui se rapproche davantage des réalités physiologiques. Des mesures de protéolyse et de bioaccessibilité des acides aminés ont été réalisées sur les échantillons collectés au cours de ces digestions. Pour les digestas obtenus avec le modèle dynamique, des mesures de répartition de taille des peptides, des bilans de matière et un suivi en microscopie confocale ont également été effectués.

La composition des cinq PPNs a montré qu'elles étaient toutes équilibrées nutritionnellement par rapport aux besoins du nourrisson. Suite aux digestions in vitro en conditions statiques, les PPNs à base de protéines de pois et de féverole se sont avérées relativement proches de la préparation de référence en termes de protéolyse finale (respectivement $51,4 \pm 3,2\%$ pour PPN pois, $42,2 \pm 3,3\%$ pour PPN féverole et $47,0 \pm 4,4\%$ pour la PPN de référence) et de libération d'AAE. A l'inverse, la PPN à base de protéines de riz, et encore plus celle à base de protéines de pomme de terre, présentaient des taux de protéolyse finale plus bas (respectivement $28,8 \pm 3,3\%$ de protéolyse pour PPN pomme de terre et $33,3 \pm 4,3\%$ pour la PPN riz) par rapport aux trois autres PPNs (Le Roux et al., 2020b). Au cours des digestions in vitro en conditions dynamiques, le suivi de la microstructure a mis en évidence la présence d'agrégats protéiques dans les PPNs à base de protéines de pois et de féverole (comme au cours de la fabrication), mais aussi des différences notables dans le compartiment gastrique entre ces deux préparations et par rapport à la préparation de référence (Figure 5) (Le Roux et al., 2020c). En effet, l'agrégation des protéines était retardée pour la préparation de référence par rapport aux deux PPNs « végétalisées », probablement en raison des différences de nature et de sensibilité de chaque type de protéines vis-à-vis de l'acidification. Dans le compartiment intestinal, les différences de structure étaient moins marquées et finalement, les trois PPNs semblaient assez proches en fin de digestion. Par ailleurs, la protéolyse était légèrement plus faible pour la préparation à base de protéines de féverole, alors que peu de différences étaient décelables en termes de libération des AAE et de répartition de tailles des peptides en fin de digestion entre les trois PPNs. Cependant, les calculs de digestibilité in vitro ont abouti à une valeur significativement plus faible pour la préparation à base de protéines de pois ($74,9 \pm 6,7\%$) par rapport aux deux autres formules ($89,2 \pm 3,9\%$ et $91,1 \pm 3,1\%$ pour respectivement les préparations référence et à base de protéines de féverole). Cette différence pourrait s'expliquer en partie par des problèmes de solubilité de la protéine de pois, qui aurait entraîné à minima sa sous-estimation dans les bilans de matière.

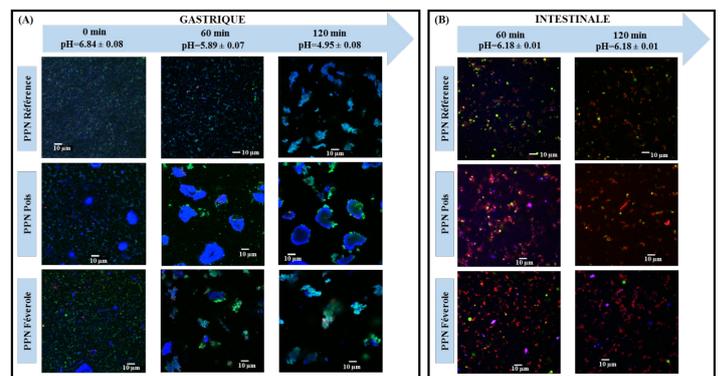


Figure 5. Organisation spatiale des lipides (vert), des protéines (bleu) et des composés amphiphiles (rouge) observée en microscopie confocale pour les trois préparations pour nourrissons (PPNs) dans les compartiments gastrique (A) et intestinal (B) au cours de la digestion in vitro en conditions dynamiques.

CONCLUSION

C'est à notre connaissance la première fois que des préparations pour nourrissons contenant des protéines végétales autres que des protéines de soja ou protéines de riz hydrolysées, qui étaient préalablement autorisés avant le dernier règlement, ont été développées, et que leur comportement au cours de la digestion a été étudié. Ce travail a été mené selon une approche multi-échelle en partant de la fabrication jusqu'à la digestion de ces préparations innovantes, permettant ainsi d'apporter une vision globale de l'aptitude des protéines végétales candidates à remplacer partiellement les protéines de lactosérum dans les PPNs. Ce travail a tout d'abord montré qu'il est possible de formuler des produits nutritionnellement adaptés aux besoins du nourrisson, tout du moins sur le plan de la composition en AAE, en substituant une partie des protéines de lactosérum par certaines protéines végétales. Cependant, certains critères physico-chimiques comme la solubilité des protéines et la viscosité qu'elles engendrent, doivent être pris en compte car ils conditionnent la faisabilité industrielle de leur fabrication et, au final, les propriétés des PPNs. Ainsi, les protéines de riz et de pomme de terre se sont finalement avérées moins adaptées à la fabrication de PPNs, tout du moins pour ce qui concerne les concentrés protéiques utilisés dans ce projet. Ces limites technologiques des protéines de riz et de pomme de terre expliquent sans doute en partie leur moindre digestibilité *in vitro*. A l'inverse, les PPNs à base de protéines de pois et de féverole présentent des propriétés physico-chimiques et nutritionnelles proches de la référence laitière. Ces résultats prometteurs éclairent les possibilités d'innovation en nutrition infantile, mais nécessitent d'être complétés par des études *in vivo* et une optimisation de la fabrication au niveau industriel. Des études *in vivo* seront notamment indispensables pour étudier l'éventuel effet allergène, l'impact sur la maturation du tube digestif ou encore l'impact sur le microbiote de ces nouvelles sources de protéines. L'inclusion de ces protéines végétales dans les préparations de suite (6-12 mois) pourrait être plus intéressante car moins impactante sur l'enfant qui a alors une alimentation diversifiée, étant ainsi moins à risque de développer des allergies, et avec un tube digestif plus mature que chez le nourrisson. Quel que soit l'âge ciblé, les problématiques demeurent cependant les mêmes en terme de fabrication, puisque les compositions sont assez proches. Ainsi, la fabrication des PPNs « végétalisées » devra être optimisée, notamment pour améliorer leur solubilité au cours de la fabrication et dans le produit fini. A plus long terme, des essais industriels seront à mettre en place afin de confirmer la faisabilité industrielle de ces nouvelles PPNs. Dans tous les cas, l'incorporation de ces protéines végétales dans les PPNs ne pourra bien évidemment être envisagée qu'après obtention de l'autorisation réglementaire de conformité pour leur utilisation, ce qui passe impérativement par la réalisation d'études scientifiques poussées démontrant l'innocuité de ces protéines dans l'alimentation du nourrisson.

RÉFÉRENCES

Ainis WN, Ersch C, Ipsen R. 2018. Partial replacement of whey proteins by rapeseed proteins in heat-induced gelled systems: Effect of pH. *Food Hydrocoll.* 77:397–406

Alves AC, Tavares GM. 2019. Mixing animal and plant proteins: Is this a way to improve protein techno-functionalities? *Food Hydrocoll.* 97:105171

Barnes LA. 1987. History of infant feeding practices. *Am. J. Clin. Nutr.*, pp. 168–70

Blanchard E, Zhu P, Schuck P. 2013. Infant formula powders. In *Handbook of Food Powders*, pp. 465–83. Elsevier

Bourlieu C, Deglaire A, de Oliveira SC, Ménard O, Le Gouar Y, et al. 2017.

Towards infant formula biomimetic of human milk structure and digestive behaviour. *OCL.* 24(2):D206

Bourlieu C, Ménard O, Bouzerzour K, Mandalari G, Macierzanka A, et al. 2014. Specificity of Infant Digestive Conditions: Some Clues for Developing Relevant *In Vitro* Models. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 54(11):1427–57

Dupont D, Nau F. 2019. From Bite to Nutrient: The Importance of Length Scales. In *Interdisciplinary Approaches to Food Digestion*. New York, NY: Springer Science+Business Media

European Union. 2016. Commission directive 2016/127/EC of 25 september 2015 on infant formulas and follow-on formulas and completed regulation n° 609/2013 and amending directive 2006/141/EC. European Commission

FAO. 2013. Dietary Protein Quality Evaluation in Human Nutrition: Report of an FAO Expert Consultation [on Protein Quality Evaluation in Human Nutrition] - 2 April, 2011, Auckland, New Zealand. Food and Agriculture Organization of the United Nations

FAO, WHO, Joint Expert Consultation on Protein Quality Evaluation. 1991. Protein Quality Evaluation: Report of the Joint FAO WHO Expert Consultation, Bethesda, USA 4 - 8 December 1989. Rome

Guyomarc'h F, Arvisenet G, Bouhallab S, Canon F, Deutsch S.M., Drigon V, Dupont D. et al. 2021. Mixing milk, egg and plant resources to obtain safe and tasty foods with environmental and health benefits. *Trends in Food Science & Technology* 108 (2021) 119–132

Kalpanadevi V, Mohan VR. 2013. Effect of processing on antinutrients and *in vitro* protein digestibility of the underutilized legume, *Vigna unguiculata* (L.) Walp subsp. *unguiculata*. *LWT - Food Sci. Technol.* 51(2):455–61

Le Gall M, Guéguen J, Séve B, Quillien L. 2005. Effects of Grinding and Thermal Treatments on Hydrolysis Susceptibility of Pea Proteins (*Pisum sativum* L.). *J. Agric. Food Chem.* 53(8):3057–64

Le Roux L. 2019. De la fabrication à la digestion *in vitro* de formules infantiles innovantes en partie composées de protéines végétales : une approche multi-échelle. Thèse de Doctorat d'Agrocampus Ovest, n° 2019-20 / B-327

Le Roux L., Mejean S., Chacon R., Lopez C., Dupont D., Deglaire A., Nau F., Jeantet R. 2020a. Plant proteins partially replacing dairy proteins greatly influence infant formula functionalities. *LWT - Food Sci. Technol.* 120:108891

Le Roux L., Chacon R., Dupont D., Jeantet R., Deglaire A., Nau F., 2020b. *In vitro* static digestion reveals how plant proteins modulate model infant formula digestibility. *Food Res. Internat.* 130 :108917

Le Roux L., Ménard O., Chacon R., Dupont D., Jeantet R., Deglaire A., Nau F., 2020c. Are Faba Bean and Pea Proteins Potential Whey Protein Substitutes in Infant Formulas? An *In Vitro* Dynamic Digestion Approach. *Foods* 9 :362

Ménard O, Cattenoz T, Guillemain H, Souchon I, Deglaire A, et al. 2014. Validation of a new *in vitro* dynamic system to simulate infant digestion. *Food Chem.* 145:1039–45

Ménard, O., Bourlieu, C., De Oliveira, S. C., Dellarosa, N., Laghi, L., Carrière, F., Capozzi, F., Dupont, D., & Deglaire, A. (2018). A first step towards a consensus static *in vitro* model for simulating full-term infant digestion. *Food Chemistry*, 240, 338-345.

Poquet L, Wooster TJ. 2016. Infant digestion physiology and the relevance of *in vitro* biochemical models to test infant formula lipid digestion. *Mol. Nutr. Food Res.* 60(8):1876–95

Schuck P, Mejean S, Dolivet A, Jeantet R, Bhandari B. 2007. Keeping quality of dairy ingredients. *Le Lait.* 87(4–5):481–88

Soetan KO, Oyewole OE. 2007. The need for adequate processing to reduce the anti-nutritional factors in plants used as human foods and animal feeds: A review. *African J. Food Sci. Res.* 7 (11):1-10

United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division. 2022. World Population Prospects 2022: Summary of Results. UN DESA/POP/2022/TR/NO. 3

UNICEF. 2022. Global Databases: Infant and Young Child Feeding: Exclusive breastfeeding.

Victoria CG, Bahl R, Barros AJ, França GV, Horton S, et al. 2016. Breastfeeding in the 21st century: epidemiology, mechanisms, and lifelong effect. *The Lancet.* 387(10017):475–490

Vilain A. (2016) Deux nouveau-nés sur trois sont allaités à la naissance. Etudes & Résultats, Direction de la recherche, des études, de l'évaluation et des statistiques, n°0958. <https://drees.solidarites-sante.gouv.fr/sites/default/files/2020-08/er958.pdf>

WHO/FAO, United Nations University. 2007. Protein and Amino Acid Requirements in Human Nutrition: Report of a Joint WHO/FAO/UNU Expert Consultation. Geneva: WHO