

Nanotechnologies dans le domaine agroalimentaire : que devons-nous savoir ?

Sarah O'Connor, Dt.P., Imane-Rockya Chaouch, Iwona Rudkowska, Dt.P., Ph. D.
et Nicolas Bertrand, B. Pharm., Ph. D.

Volume 16, numéro 3, hiver 2019

L'agroalimentaire en transformation

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/1059216ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/1059216ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Ordre professionnel des diététistes du Québec

ISSN

2561-620X (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

O'Connor, S., Chaouch, I.-R., Rudkowska, I. & Bertrand, N. (2019).
Nanotechnologies dans le domaine agroalimentaire : que devons-nous savoir ?
Nutrition Science en évolution, 16(3), 9–14. <https://doi.org/10.7202/1059216ar>

NANOTECHNOLOGIES DANS LE DOMAINE AGROALIMENTAIRE : QUE DEVONS-NOUS SAVOIR ?

Sarah O'Connor, Dt.P., Axe d'endocrinologie et néphrologie, Centre de recherche du CHU de Québec – Université Laval, Département de kinésiologie, Faculté de médecine, Université Laval, **Imane-Rockya Chaouch**, Axe d'endocrinologie et néphrologie, Centre de recherche du CHU de Québec – Université Laval, **Iwona Rudkowska**, Dt.P., Ph. D., Axe d'endocrinologie et néphrologie, Centre de recherche du CHU de Québec – Université Laval, Département de kinésiologie, Faculté de médecine, Université Laval, **Nicolas Bertrand**, B. Pharm., Ph. D., Axe d'endocrinologie et néphrologie, Centre de recherche du CHU de Québec – Université Laval, Faculté de pharmacie, Université Laval



Introduction

Les aliments d'aujourd'hui n'existeraient pas sans les avancées technologiques du secteur agroalimentaire : l'amélioration des techniques d'agriculture, la bonification des produits alimentaires ou l'optimisation des techniques de conservation. Depuis peu, la science des aliments s'intéresse à l'utilisation des nanotech-

nologies pour créer des aliments fonctionnels ou faciliter la conservation des aliments. Malgré cet engouement, les professionnels de la santé et le public connaissent peu les enjeux de l'utilisation de ces technologies dans les aliments. Les objectifs de cet article sont de faire comprendre ce que sont les nanotechnologies, leurs rôles et les avantages de leur utilis-

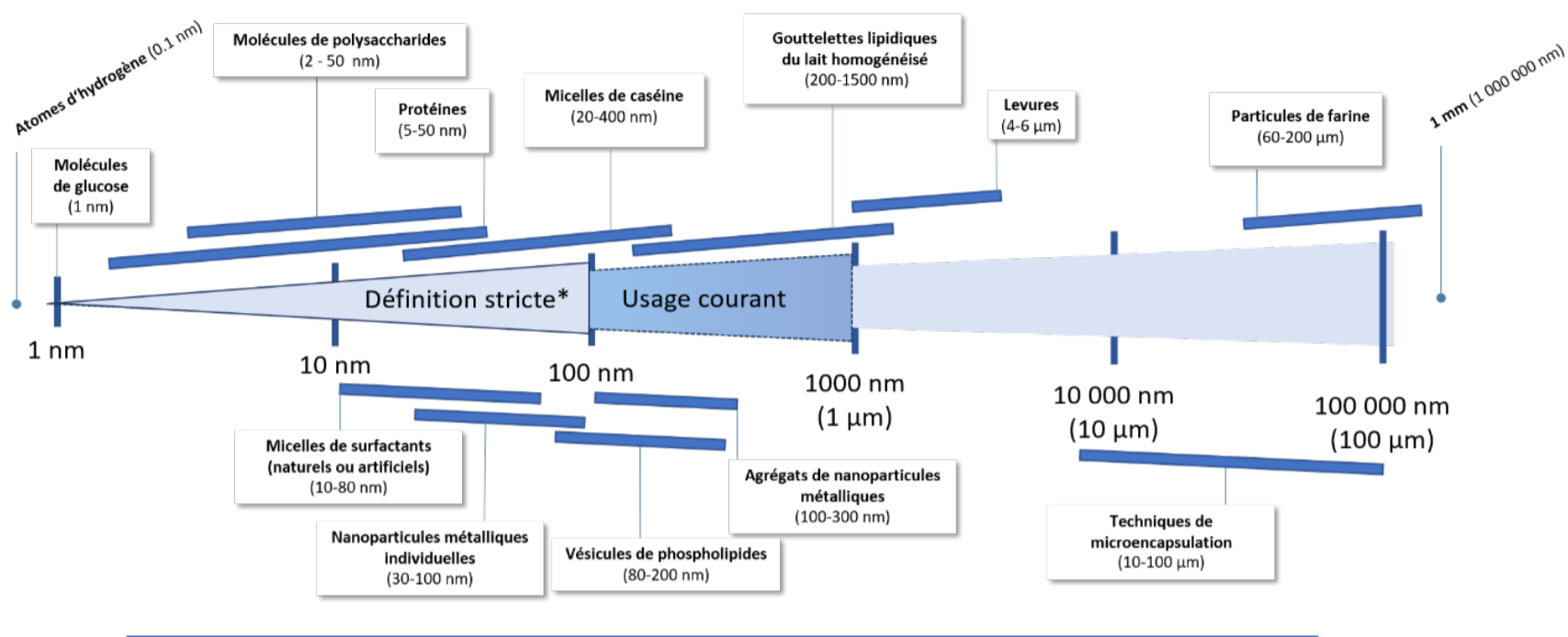
tion dans les aliments et présenter les préoccupations relatives à la santé et les défis associés à leur expansion sur le marché de l'alimentation.

En quoi consistent les nanotechnologies ?

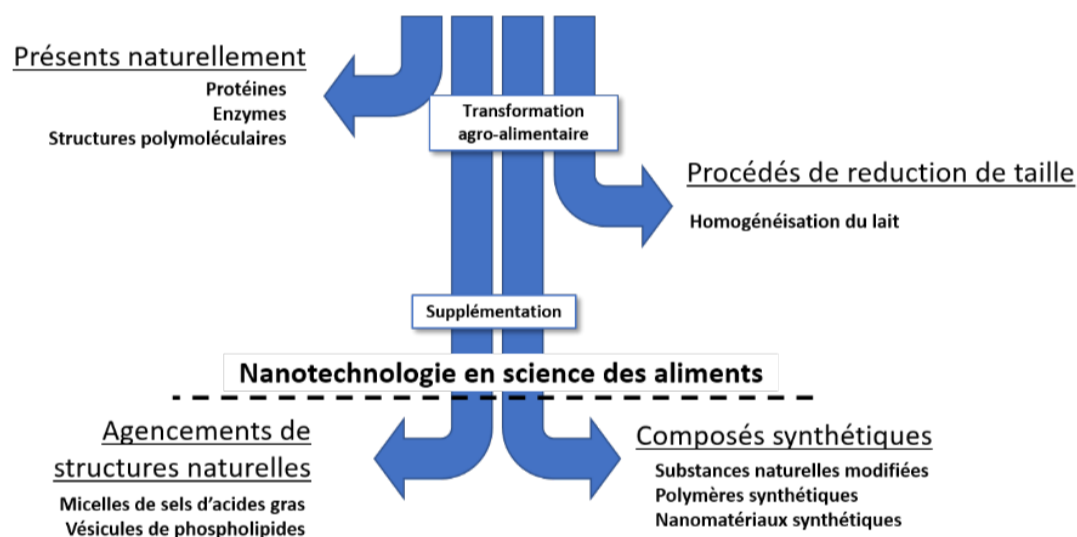
Le terme « nano » provient du mot grec signifiant « nain ». Au sens strict, **la nanotechnologie définit la science des matériaux et des structures dont la dimension est inférieure à 100 nanomètres, ou à un dix-millième de millimètre**^[1]. Cependant, par abus de langage, le terme est parfois utilisé dans l'étude des matériaux d'une taille inférieure à 1000 nanomètres, c'est-à-dire un millième de millimètre^[2,3]. Bien que la nanotechnologie soit une science relativement récente, des structures de taille nanométrique, indispensables à la vie, existent dans la nature. La figure 1 présente quelques objets naturels et synthétiques dont les dimensions sont de l'ordre de 10 à 1000 nanomètres.

Les nanomatériaux possèdent des propriétés physiques et chimiques différentes de celles de leurs homologues de plus grandes dimensions : une taille plus petite permet notamment de limiter la séparation causée par la sédimentation et d'augmenter la surface de contact du matériau avec l'environnement^[4,5]. Cela peut permettre la stabilisation de systèmes hétérogènes non miscibles, ou encore faciliter la dissolution de composés peu solubles^[4,6]. La mise au point de nouveaux nanomatériaux permet une multitude d'applications dans les domaines de l'électronique, de la chimie et des sciences biomédicales^[2,7,8]. Cependant, la nature

Figure 1. Quelques nanostructures présentes dans la nature ou ajoutées aux aliments [6,8-11,33,34]



Structures aux dimensions nanométriques dans les aliments



*Selon l'Union internationale de chimie pure et appliquée (en anglais, IUPAC, pour International Union of Pure and Applied Chemistry)

exploite aussi certaines structures aux dimensions nanométriques, comme les enzymes dont la petite taille accélère les processus biochimiques^[9,10] ou les micelles de caséine qui contribuent à la solubilisation des lipides dans le lait grâce à leur taille de 20 à 400 nm^[9].

Pour contextualiser l'usage des nanotechnologies dans l'alimentation, il faut distinguer les nanostructures naturelles de celles qui sont produites ou ajoutées lors des processus de transformation alimentaire. Certains composants nutritifs comme

les polysaccharides, les protéines et les structures lipidiques ont des tailles de l'ordre de quelques nanomètres^[5,8,11]. Ces éléments prévalent naturellement dans notre alimentation contrairement à n'importe quelle autre nanostructure synthétique ajoutée. **Les êtres vivants ont évolué pour tirer profit de leur taille et de leur architecture**^[7,8].

Lorsqu'il est question d'utilisation des nanotechnologies en sciences des aliments, l'on s'intéresse plus spécifiquement aux procédés où un maté-

riel exogène est ajouté aux aliments pour en améliorer les qualités nutritionnelles, esthétiques ou organoleptiques^[13,14]. Les nanotechnologies dans l'alimentation peuvent être classifiées en fonction de l'origine naturelle ou synthétique de leurs constituants^[2,11,14]. Autrement dit, on peut différencier les structures artificielles formées à partir de composantes naturellement présentes dans les matrices alimentaires (par exemple, des vésicules de phospholipides naturels) et les systèmes impliquant des molécules fabriquées

Tableau 1. Rôles de certaines nanotechnologies en agroalimentaire et exemples d'application [6,8,11,19,33,35-40]

Rôles	Exemples d'application
Augmentation de la solubilité : amélioration de la dispersion des molécules dans les aliments	<ul style="list-style-type: none"> • Ajout de caroténoïdes aux jus de fruits • Encapsulation de phytostérols, d'oméga-3, de coenzyme Q10, de lycopène, de lutéine ou d'autres composés bioactifs lipophiles dans l'huile de canola
Augmentation de la stabilité physique : atténuation de la sédimentation et de l'écémage	<ul style="list-style-type: none"> • Stabilisation des vinaigrettes, des sauces à salade et des huiles aromatisées • Ajout d'anti-agglomérants dans les agents en poudre
Amélioration de la texture et de la consistance des crèmes glacées	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation de la stabilité chimique : réduction de l'oxydation et de la photodégradation • Enrichissement du thé en sélénium • Protection des probiotiques en capsules
Amélioration des propriétés organoleptiques : amélioration des saveurs, des flaveurs et de l'apparence	<ul style="list-style-type: none"> • Ajout d'agents de masquage du goût. Exemple : masquer le goût et l'odeur du thon dans du pain enrichi en huile de thon • Ajout de nanoparticules de silice comme transporteurs de saveurs et de flaveurs • Ajout de nanoparticules de titane comme colorant ou opacifiant • Optimisation des capacités colorantes des caroténoïdes et du paprika

en laboratoire, incluant des protéines et des polysaccharides naturels dont la structure a été altérée chimiquement.

Pourquoi supplémenter les produits alimentaires au moyen des nanotechnologies ?

Le recours aux nanotechnologies peut conférer à un produit alimentaire une fonction additionnelle ou créer de la valeur ajoutée, que ce soit du point de vue nutritif, organoleptique, esthétique ou encore pour en prolonger la conservation [8,13] (voir le tableau 1).

Le principal objectif à développer des aliments fonctionnels est d'améliorer la santé humaine et animale [15]. L'aspect nutritif d'un aliment peut être bonifié par l'ajout de molécules hydrophobes (c.-à-d., insolubles dans l'eau), par exemple des acides gras (oméga-3), des vitamines (A, D ou E), ou d'autres composés bioactifs (phytostérols, polyphénols) [16]. Puisqu'elles permettent la stabilisation de systèmes hétérogènes, les nanotechnologies peuvent améliorer la dispersibilité des molécules hydrophobes dans les matrices aqueuses. Ainsi, des nanoé-

mulSIONS, des vésicules de phospholipides [17], mais aussi des complexes de protéines et de polysaccharides [18] ont été proposés pour solubiliser différentes molécules bioactives dans des matrices alimentaires [5]. Ces procédés de nano/microencapsulation reposent sur la stabilisation de nanostructures par des molécules amphiphiles qui possèdent une affinité à la fois pour l'eau et les lipides. Les nanotechnologies peuvent aussi prévenir la dégradation de molécules bioactives durant l'entreposage ou la transformation des aliments [5,6,8,13-15,19]. Ces fonctions peuvent être accomplies en protégeant physiquement la molécule encapsulée de l'oxydation ou de la lumière, en la séquestrant, par exemple, dans une enveloppe protectrice [18].

Des exemples de molécules stabilisantes pouvant donner lieu à des structures de taille nanométrique sont présentées au tableau 2. Par rapport aux particules de plus grande taille, les nanomatériaux ne peuvent être discernés à l'œil nu, sédimentent moins vite et contribuent à augmenter la

biodisponibilité des agents bioactifs. Ces propriétés peuvent être désirables dans certains cas, mais superflues dans d'autres. Par exemple, un jus de pomme, dont la transparence et l'homogénéité sont essentielles à l'acceptation du consommateur, pourrait bénéficier d'une supplémentation à base de nanomatériaux invisibles et miscibles, alors que ce ne serait pas nécessairement indiqué pour un jus d'orange (plus opaque et qui doit être agité avant sa consommation).

Les nanotechnologies peuvent également servir à améliorer les propriétés organoleptiques des aliments. En encapsulant certaines molécules au goût désagréable, il est possible d'en améliorer la palatabilité [20], comme c'est le cas de certains suppléments de polyphénols extraits du thé vert [21]. Dans d'autres cas, des nanofibres de chitine, la chitine étant un polymère naturel tiré de la carapace des crustacés, ont aussi été proposées pour retenir le sel à la surface du poisson en saumure, diminuant potentiellement l'apport en sodium sans compromettre le goût [22].

Tableau 2. Surfactants et émulsifiants pouvant conduire à la présence de structures de taille nanométrique dans les aliments

		Classes d'ingrédients	Exemple (dénomination européenne)	Types de structure
Molécules d'origine naturelle		Sels d'acides gras	Stéarate de potassium (E470a)	Micelles, émulsions
		Protéines	Gélatine (E441)	Complexes, gels
		Phospholipides	Lécithine	Vésicules
Molécules synthétiques	Dérivés synthétiques de produits d'origine naturelle	Lactylates d'acides gras	Stéaryl de sodium lactylé (E481i)	Micelles, émulsions
		Esters d'acides gras et de sucres (sucroglycérides)	Stéarate de sucrose (E474)	Micelles, émulsions
	Dérivés synthétiques	Polysorbates	Polysorbate 80 (E433)	Micelles, émulsions
		Esters d'acides gras de polyéthylène glycol	Stéarate de polyoxyéthylène 40 (E431)	Micelles, émulsions
		Copolymères d'oxyde d'éthylène et d'oxyde de propylène	Pluronic F87	Micelles, émulsions

Dans un but purement esthétique, des nanoparticules d'oxydes de métaux, notamment d'oxyde de zinc, de dioxyde de titane (connu sous le nom de E171 en Europe) ou de dioxyde de silice (E551, en Europe), peuvent être ajoutées à certaines confiseries et pâtisseries à titre de colorant ou d'agent opacifiant pour améliorer l'apparence des produits. Les dimensions nanométriques des cristaux leur permettent de se disperser dans diverses matrices alimentaires et d'y réfléchir fortement la lumière visible et ultraviolette. Des nanoparticules de silice peuvent également être ajoutées aux aliments en poudre pour en faciliter l'écoulement et en limiter l'agglomération, par exemple dans des épices ou aliments déshydratés^[23].

Finalement, les nanomatériaux sont aussi présents dans des emballages permettant d'augmenter la durée de conservation des aliments^[8]. Ces nanomatériaux sont généralement intégrés à des matrices de plastique

pour limiter la croissance bactérienne ou empêcher la perméation des gaz ou des rayons UV. Les nanoparticules d'argent métallique, d'oxyde de zinc et de dioxyde de titane possèdent des propriétés antibactériennes intrinsèques. L'ajout de nanoparticules solides peut également contribuer à ralentir la diffusion des gaz et des liquides à travers le plastique tout en préservant ses propriétés (résistance, malléabilité, transparence). Des nanomatériaux peuvent aussi rendre les emballages absorbants plus performants en augmentant la surface de contact disponible pour retenir les liquides, notamment pour capter plus efficacement l'exsudat des viandes crues^[24].

Les nanotechnologies dans les aliments : est-ce sécuritaire ?

La prémisse justifiant le recours aux nanotechnologies est que les dimensions des nanomatériaux utilisés modifient la fonctionnalité. Il est

donc indiqué de se questionner sur leur innocuité, étant donné la petite taille de ces matériaux. **Malgré de nombreux efforts pour mieux comprendre la nanotoxicologie depuis plusieurs années, beaucoup d'interrogations subsistent encore^[11].** En d'autres mots, s'il peut être sage de faire preuve de prudence quant à leur utilisation dans la nourriture, les nanomatériaux ne semblent pas avoir de toxicité aiguë flagrante. Leur toxicité éventuelle se manifesterait de façon subtile et pourrait potentiellement être liée à une exposition chronique^[5]. En comparaison à d'autres domaines, les nanotechnologies n'ont encore que faiblement pénétré le domaine agroalimentaire. En 2014, 1800 produits de consommation contenant des nanomatériaux avaient été répertoriés dans 32 pays, mais seulement 4 % étaient des produits alimentaires ou des boissons^[25]. Peu d'études s'intéressant aux conséquences de la consommation

d'aliments supplémentés en nanomatériaux chez l'humain sont disponibles.

Malgré leur petite taille, la perméabilité des nanoparticules à travers l'épithélium du tractus gastro-intestinal sain demeure faible^[26]. C'est donc la lumière du système digestif qui est la plus exposée aux nanoparticules contenues dans la nourriture : les nanomatériaux peuvent s'accumuler dans le mucus intestinal ou encore dans les plaques de Peyer. Les nanoparticules réussissant à franchir ces barrières s'accumuleraient dans le foie, possiblement retenues lors d'un premier passage hépatique^[27]. Finalement, il est possible qu'une exposition chronique aux nanoparticules puisse altérer l'intégrité de l'épithélium et potentialiser l'absorption systémique des nanoparticules.

La majorité des études nanotoxicologiques s'intéresse aux effets des nanoparticules métalliques ou d'oxydes de métaux qui sont plus faciles à détecter que les composés organiques. Certains de ces matériaux, comme les nanoparticules d'oxyde de fer, peuvent se dégrader dans l'organisme au fil du temps grâce à leur petite taille, mais plusieurs métaux restent non biodégradables. Des travaux effectués chez le rat ont démontré que l'ingestion de nanoparticules de dioxyde de titane (E171) pouvait possiblement conduire au développement de lésions précancéreuses^[28]. Ces nanoparticules pourraient s'accumuler dans le mucus intestinal sans nécessairement en modifier les fonctions^[29]. Si la possibilité de lésions précancéreuses chez ces modèles appelle à la prudence, il reste difficile d'établir si cette toxicité est directement due aux dimensions nanométriques des particules ou simplement aux contacts prolongés de la muqueuse intestinale avec du titane non biodégradable.

Moins de données sont disponibles quant aux conséquences d'une exposition à des nanomatériaux orga-

niques. Une étude s'intéressant à des nanoparticules de polystyrène, un polymère non biodégradable utilisé dans l'emballage des aliments, a démontré qu'une exposition chronique aux nanoparticules pouvaient augmenter l'absorption de fer, possiblement par un remodelage des villi intestinaux^[30]. En théorie, un contact prolongé des parois du tractus gastro-intestinal avec d'autres nanomatériaux organiques pourrait entraîner les mêmes effets. Cependant, les nanomatériaux à base de phospholipides, de protéines ou de polysaccharides sont dégradés dans l'intestin par les enzymes de la digestion et ne devraient pas provoquer une exposition intestinale aussi prolongée^[31].

En terminant, l'augmentation de la biodisponibilité d'une molécule bioactive par l'utilisation de nanotechnologies pourrait aussi considérablement en changer la pharmacologie. Une molécule faiblement biodisponible naturellement pourrait donc, en théorie, devenir toxique lorsqu'absorbée plus efficacement. Ces considérations ont été soulignées par l'Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA) lors de la commercialisation d'une formulation synthétique de lycopène, un carotène naturellement présent dans les tomates et utilisé comme colorant^[24].

Les lois concernant les substances ajoutées aux produits alimentaires varient d'un pays à l'autre^[30]. L'utilisation des nanotechnologies dans les aliments n'est donc actuellement assujettie à aucune réglementation internationale^[8,32,33]. De plus, les quelques lignes directrices s'intéressant au cycle de vie des nanotechnologies ne visent pas directement l'alimentation^[2]. Si quelques règlements encadrent l'utilisation des nanomatériaux autorisés dans les emballages alimentaires, notamment aux États-Unis et en Europe^[8,32] pour les additifs alimentaires, l'évaluation des risques se fait indépendamment

de leur taille et de leurs propriétés physicochimiques^[8,24]. Une réglementation uniformisée à l'échelle mondiale permettrait de : mieux répertorier les produits contenant des nanomatériaux ; favoriser des études nanotoxicologiques plus adaptées au domaine agroalimentaire ; mieux évaluer le risque de ces technologies^[2,33].

Les défis reliés à l'utilisation des nanotechnologies dans le domaine agroalimentaire

Les nanotechnologies permettraient la préparation d'aliments différenciés plus stables, plus appétissants ou plus nutritifs. Cependant, à ce jour, ces technologies ont trouvé leur place principalement dans la préparation d'aliments ultra-transformés (confiseries, aliments déshydratés, etc.) considérés comme moins sains, peu importe s'ils contiennent des ingrédients à la taille nanométrique ou non.

Jusqu'à maintenant, les techniques de microencapsulation (se traduisant par des additifs de plus grande taille comparativement à la nanoencapsulation) suffisent à la préparation de la majorité des aliments fonctionnels. Beaucoup d'efforts seront donc nécessaires pour y intégrer des nanotechnologies, plus difficiles à préparer, potentiellement plus dispendieuses et soulevant davantage de questions relativement à leur innocuité. **Avec la tendance de certains consommateurs à priser des aliments complets non transformés, les bienfaits sur la santé devront être importants pour les convaincre de changer leurs habitudes de consommation et d'investir dans des produits enrichis au moyen des nanotechnologies**^[34]. Les professionnels de la santé, notamment les nutritionnistes, pourraient jouer un rôle important en évaluant la pertinence de ces aliments fonctionnels et, le cas échéant, en informant le public de leurs bienfaits.

En conclusion, beaucoup de questions demeurent quant au rôle que joueront les nanotechnologies dans

14 la préparation d'aliments fonctionnels sains et sécuritaires. Le développement de tels produits implique, d'une part, la collaboration des chercheurs en science des aliments et en nanotoxicologie et, d'autre part, l'arrimage de la recherche avec les préoccupations des agences réglementaires. Finalement, les nutritionnistes auront aussi certainement un rôle à jouer pour évaluer les bienfaits éventuels de ces nouveaux produits et orienter le public quant à leur consommation. ■

Références

- Roco MC, Mirkin CA, Hersam MC. Nanotechnology Research Directions for Societal Needs in 2020: Retrospective and Outlook [Internet]. 2010 [cited 2018 Jun 19]. Available from: https://www.nano.gov/sites/default/files/pub_resource/wtec_nano2_report.pdf
- Handy RD, Shaw BJ. Toxic effects of nanoparticles and nanomaterials: Implications for public health, risk assessment and the public perception of nanotechnology. *Health Risk Soc.* 2007 Jun 1;9(2):125–44.
- Roco MC. Nanotechnology: convergence with modern biology and medicine. *Curr Opin Biotechnol.* 2003 Jun 1;14(3):337–46.
- Singh T, Shukla S, Kumar P, Wahla V, Bajpai VK, Rather IA. Application of Nanotechnology in Food Science: Perception and Overview. *Front Microbiol.* 2017;8:1501.
- Pathakoti K, Manubolu M, Hwang H-M. Nanostructures: Current uses and future applications in food science. *J Food Drug Anal.* 2017 Apr 1;25(2):245–53.
- Pradhan N, Singh S, Ojha N, Shrivastava A, Barla A, Rai V, et al. Facets of Nanotechnology as Seen in Food Processing, Packaging, and Preservation Industry. *BioMed Res Int.* 2015;2015:365672.
- Edgar Perez-Esteve, Andrea Bernardos, Ramon Martinez-Manez and Jose M. Barat. Nanotechnology in the Development of Novel Functional Foods or their Package. An Overview Based in Patent Analysis. *Recent Pat Food Nutr Agric.* 2013;5(1):35–43.
- Ravichandran R. Nanotechnology Applications in Food and Food Processing: Innovative Green Approaches, Opportunities and Uncertainties for Global Market. *Int J Green Nanotechnol Phys Chem.* 2010 May 20;1(2):P72–96.
- Sozer N, Kokini JL. Nanotechnology and its applications in the food sector. *Trends Biotechnol.* 2009 Feb 1;27(2):82–9.
- Sekhon BS. Nanotechnology in agri-food production: an overview. *Nanotechnol Sci Appl.* 2014;7:31–53.
- Martirosyan A, Schneider Y-J. Engineered Nanomaterials in Food: Implications for Food Safety and Consumer Health. *Int J Environ Res Public Health.* 2014 Jun;11(6):5720–50.
- Di Marzo L, Cree P, Barbano DM. Prediction of fat globule particle size in homogenized milk using Fourier transform mid-infrared spectral. *J Dairy Sci.* 2016 Nov 1;99(11):8549–60.
- Ismail H, Tekiner, Hayrettin Mutlu, Selcuk Algingil and Elif Dincerler. Considerations for Nanosciences in Food Science and Nutrition: “Enhanced Food Properties.” *Recent Pat Food Nutr Agric.* 2015;7(1):3–8.
- Sanjiv Sonkaria, Sung-Hoon Ahn and Versha Khare. Nanotechnology and its Impact on Food and Nutrition: A Review. *Recent Pat Food Nutr Agric.* 2012;4(1):8–18.
- Singh H. Nanotechnology Applications in Functional Foods; Opportunities and Challenges. *Prev Nutr Food Sci.* 2016 Mar;21(1):1–8.
- Hawthorne KM, Abrams SA, Heird WC. Docosahexaenoic Acid (DHA) Supplementation of Orange Juice Increases Plasma Phospholipid DHA Content of Children. *J Acad Nutr Diet.* 2009 Apr 1;109(4):708–12.
- Mozafari MR, Johnson C, Hatziantoniou S, Demetzos C. Nanoliposomes and their applications in food nanotechnology. *J Liposome Res.* 2008;18(4):309–27.
- Chapeau A-L, Bertrand N, Briard-Bion V, Hamon P, Poncelet D, Bouhallab S. Coacervates of whey proteins to protect and improve the oral delivery of a bioactive molecule. *J Funct Foods.* 2017 Nov 1;38:197–204.
- Chaudhry Q, Castle L. Food applications of nanotechnologies: An overview of opportunities and challenges for developing countries. *Agri-Food Nano Appl Ensuring Soc Benefits.* 2011 Nov 1;22(11):595–603.
- Yang X, Li S, Zhang Q-W, Zheng Y, Bardelang D, Wang L-H, et al. Concealing the taste of the Guinness World’s most bitter substance by using a synthetic nanocontainer. *Nanoscale.* 2017;9(30):10606–9.
- Massounga Bora AF, Ma S, Li X, Liu L. Application of microencapsulation for the safe delivery of green tea polyphenols in food systems: Review and recent advances. *Food Res Int.* 2018 Mar 1;105:241–9.
- Hsueh C-Y, Tsai M-L, Liu T. Enhancing saltiness perception using chitin nanofibers when curing tilapia filets. *LWT.* 2017 Dec 1;86:93–8.
- Peters RJB. Nano-silica in selected food items. The Netherlands: RIKILT-Institute of Food Safety; 2010 p. 11. Report No.: 972.659.01.
- Agence française de sécurité sanitaire des aliments. Nanotechnologies et nanoparticules dans l'alimentation humaine et animale. Agence française de sécurité sanitaire des aliments; 2009.
- Vance ME, Kuiken T, Vejerano EP, McGinnis SP, Hochella MFJ, Rejeski D, et al. Nanotechnology in the real world: Redeveloping the nanomaterial consumer products inventory. *Beilstein J Nanotechnol.* 2015;6:1769–80.
- MacNicoll, A., M. Kelly, H. Aksoy, E. Kramer, H. Bouwmeester, and Q. Chaudhry, A study of the uptake and biodistribution of nano-titanium dioxide using in vitro and in vivo models of oral intake. *J Nanoparticle Res.* 2015. 17(2): p. 66.
- Blanco E, Shen H, Ferrari M. Principles of nanoparticle design for overcoming biological barriers to drug delivery. *Nat Biotechnol.* 2015 Sep;33(9):941–51.
- Bettini S, Boutet-Robinet E, Cartier C, Coméra C, Gaultier E, Dupuy J, et al. Food-grade TiO₂ impairs intestinal and systemic immune homeostasis, initiates preneoplastic lesions and promotes aberrant crypt development in the rat colon. *Sci Rep.* 2017 Jan 20;7:40373.
- Talbot P, Radziwill-Bienkowska JM, Kamphuis JBJ, Steenkeste K, Bettini S, Robert V, et al. Food-grade TiO₂ is trapped by intestinal mucus in vitro but does not impair mucin O-glycosylation and short-chain fatty acid synthesis in vivo: implications for gut barrier protection. *J Nanobiotechnology.* 2018;16:53.
- Mahler GJ, Esch MB, Tako E, Southard TL, Archer SD, Glahn RP, et al. Oral exposure to polystyrene nanoparticles affects iron absorption. *Nat Nanotechnol.* 2012 Feb 12;7:264.
- Shishir, M.R.I., L. Xie, C. Sun, X. Zheng, and W. Chen, Advances in micro and nano-encapsulation of bioactive compounds using biopolymer and lipid-based transporters. *Trends Food Sci Technol.* 2018. 78: p. 34–60.
- Mlalila N, Kadam DM, Swai H, Hilonga A. Transformation of food packaging from passive to innovative via nanotechnology: concepts and critiques. *J Food Sci Technol.* 2016 Sep;53(9):3395–407.
- Hulla J, Sahu S, Hayes A. Nanotechnology: History and future. *Hum Exp Toxicol.* 2015 Nov 26;34(12):1318–21.
- Cushen M, Kerry J, Morris M, Cruz-Romero M, Cummins E. Nanotechnologies in the food industry—Recent developments, risks and regulation. *Trends Food Sci Technol.* 2012 Mar 1;24(1):30–46.
- Kuan C-Y, Yee-Fung W, Yuen K-H, Liang M-T. Nanotech: Propensity in Foods and Bioactives. *Crit Rev Food Sci Nutr.* 2012 Jan 1;52(1):55–71.
- Kumari A, Yadav SK. Nanotechnology in Agri-Food Sector. *Crit Rev Food Sci Nutr.* 2014 Jan 1;54(8):975–84.
- Magnuson Bernadene A., Jonaitis Tomas S., Card Jeffrey W. A Brief Review of the Occurrence, Use, and Safety of Food Related Nanomaterials. *J Food Sci.* 2011 Aug 5;76(6):R126–33.
- Walker R, Decker EA, McClements DJ. Development of food-grade nanoemulsions and emulsions for delivery of omega-3 fatty acids: opportunities and obstacles in the food industry. *Food Funct.* 2015 Jan;6(1):42–55.
- Huang Qingrong, Yu Hailong, Ru Qiaomei. Bioavailability and Delivery of Nutraceuticals Using Nanotechnology. *J Food Sci.* 2010 Jan 11;75(1):R50–7.
- Chaudhry Q, Scotter M, Blackburn J, Ross B, Boxall A, Castle L, et al. Applications and implications of nanotechnologies for the food sector. *Food Addit Contam Part A.* 2008 Mar 1;25(3):241–58.
- Kalpana Sastry R, Anshul S, Rao NH. Nanotechnology in food processing sector—An assessment of emerging trends. *J Food Sci Technol.* 2013 Oct;50(5):831–41.
- Pan K, Zhong Q. Organic Nanoparticles in Foods: Fabrication, Characterization, and Utilization. *Annu Rev Food Sci Technol.* 2016 Feb 28;7(1):245–66.