

Applications des nanotechnologies et méthodes de détection des nanoparticules dans la chaîne alimentaire

LUC PUSSEMIER

RÉSUMÉ

Les applications des nanotechnologies dans le domaine alimentaire restent, à l'heure actuelle, relativement modestes pour peu que l'on s'intéresse aux utilisations volontaires d'ingrédients manufacturés à l'état nanoparticulaire entrant directement dans la composition des aliments. Ce sont surtout les compléments alimentaires qui sont concernés car certains procédés de nanoencapsulation permettent une meilleure utilisation ou acceptation de divers micronutriments tels que vitamines, minéraux et acides gras polyinsaturés. Certains additifs technologiques peuvent également contenir des particules nanométriques mais souvent de façon indirecte ou non volontaire car il s'agit de matériaux non conçus pour leurs propriétés nanométriques mais contenant *de facto* une fraction de composants présents à l'état nanoparticulaire. En revanche, de nombreux matériaux nanométriques interviennent de façon indirecte dans le domaine agro-alimentaire. Il s'agit de composés permettant de décontaminer ou désinfecter l'environnement de production que ce soit tout en amont de la chaîne alimentaire (nombreuses applications pour la dépollution des sols et de l'eau) ou tout en aval (utilisation de revêtements contenant des nanoparticules d'argent et emballages améliorés ou intelligents). Enfin, le domaine agro-alimentaire connaît indirectement de nombreuses applications nanotechnologiques du fait que, par essence, de nombreuses manipulations ou produits sont basées sur la maîtrise de procédés intervenant à l'échelle nanométrique (émulsions inverses et nanofiltration, par exemple).

Les méthodes de détection de nanoparticules dans la chaîne alimentaire sont quant à elles dans un stade de développement très récent. Les techniques de prédilection pour la détection des nanoparticules telles que la microscopie électronique de transmission (TEM) ou microscopie électronique à balayage (SEM) demeurent incontournables pour s'assurer que l'analyte mesuré est bien à l'état nanoparticulaire mais la quantification est rendue difficile dès que l'on est confronté à une matrice aussi complexe que les denrées alimentaires. Les techniques de Dynamic Light Scattering (DLS) et de Field Flow Fractionation (FFF) permettent une détermination de la taille des nanoparticules mais doivent être couplées à d'autres techniques telles que l'Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICPMS) pour réaliser une quantification. Depuis peu la Single Particle Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (SP-ICPMS) est à l'étude pour application à la détection de nanoparticules dans des matrices alimentaires notamment dans le cadre du projet RT NANORISK financé par le SPF Santé Publique.

Applications dans la chaîne alimentaire

On entend par chaîne alimentaire l'ensemble des maillons impliqués dans la production d'aliments. La chaîne alimentaire commence par le milieu de production, son environnement (sol, eau, air), ses intrants (semences, engrais, pesticides). Viennent ensuite les productions primaires (végétale et animale), les produits de transformation (produits laitiers, boucherie-charcuterie, boulangerie-pâtisserie, conserves, surgelés, boissons, plats préparés) et, en bout de chaîne, on retrouve la distribution des denrées et, bien sûr, la consommation qu'elle soit individuelle, familiale ou collective, qu'elle se déroule au domicile, sur le lieu du travail ou dans des lieux de restauration spécifiques (restaurants traditionnels ou de type « fast food »). On s'intéressera exclusivement aux nanomatériaux manufacturés étant entendu que dans l'ensemble de la chaîne alimentaire la présence de nanostructures est généralisée que ce soit dans le milieu de production primaire (le sol contient nombre de matériaux argileux à l'état nanoparticulaire) ou dans des processus de transformations traditionnels tels que la fabrication de fromage de type ricotta qui repose sur la manipulation de structures à l'échelle nanoparticulaire (glomérules protéiques). Il existe des ouvrages et articles récents décrivant les principales applications dans le secteur alimentaire (FAO/OMS, 2011 ; Rikilt, 2007 ; Chaudhry *et al.*, 2008 ; FASFC, 2010)

1. types de nanostructures manufacturées présentes dans le secteur alimentaire

On mentionnera en premier lieu les matériaux utilisés comme intrants ou ingrédients à l'une ou autre étape du processus de production agricole ou de fabrication des aliments. Citons, par exemple, des fertilisants, des produits phytosanitaires, des additifs alimentaires, des compléments alimentaires. Ces matériaux peuvent être de composition relativement simple, ce qui les distingue de systèmes plus complexes tels que les enrobages destinés à faciliter l'assimilation (nanoencapsulation) ou d'autres articles destinés à entrer en contact directement ou indirectement avec les aliments (emballages dits intelligents, senseurs comprenant des structures

de type nano). Il est important également de mentionner la nanotexturation des denrées alimentaires comme les émulsions doubles, les émulsions inverses, les micelles surfactantes.

Ce type de processus se rencontre souvent dans la préparation de pâtes à tartiner, mayonnaises et crèmes diverses et offre de réelles possibilités d'alléger les aliments en matières grasses tout en assurant un goût apprécié par le consommateur. Il s'agirait ici d'un créneau auquel s'intéresse fortement le secteur agro-industriel (FAO/OMS, 2011).

Plus spécifiquement dans le domaine des additifs alimentaires (que ce soit en alimentation humaine ou en alimentation des animaux) diverses applications voient le jour comme l'utilisation de matériaux argileux (éventuellement modifiés par voie physico-chimique), de nanostructures végétales ou minérales qui sont ajoutées intentionnellement aux aliments pour faciliter la fabrication de structures particulières (ex. liants pour mycotoxines dérivés de parois de levure et agents anti-caking dérivés de substances minérales), améliorer les propriétés de fluidification de certains solides (ex. lait en poudre) voire adsorber des composés nocifs (ex. liants de mycotoxines) ou relarguer des nutriments (ex. libération contrôlée de vitamines, pigments et minéraux).

De nombreuses autres applications dans le domaine des emballages font appel à des surfaces fonctionnalisées. Par incorporation de structures de types nano (matériaux argileux, par exemple) il est possible de renforcer la résistance mécanique, d'offrir une barrière au passage de certains gaz (ex. oxygène) ou de composés volatils tels que les arômes et à l'humidité. De cette façon il est possible d'obtenir des emballages plus légers et offrant une période de préservation des aliments plus étendue, surtout si, comme c'est le cas pour certains emballages dits intelligents, on incorpore également des senseurs permettant de visualiser (notamment à l'aide de codes de couleurs) la présence de composés chimiques indicateurs de contamination ou de perte de fraîcheur (exemple, sulfure d'hydrogène).

Le tableau 1 reprend toute une série d'exemples d'applications des nanotechnologies dans les différents maillons de la chaîne alimentaire.

Élément de la chaîne alimentaire	Exemple d'application	Type de nanostructure	Avantage recherché et mode de fonctionnement
Milieu de production agricole	- Dépollution du sol (métaux lourds) - Dépollution des eaux	- Zéolites partiellement transformées - nanofiltres & nanoparticules réactives	- Neutralisation d'éléments toxiques par diffusion au sein d'une structure tridimensionnelle, par ultrafiltration et par transformations chimiques
Production agricole primaire	- intrants (pesticides, engrais)	- nano-encapsulations, nanoémulsions	- relargage contrôlé ou différé des nutriments et matières actives
Production des aliments	- transformation des produits primaires en produits élaborés (fromage, ...)	- nanotexturation, émulsion en phase inverse, etc	- améliorations gustatives, diminution teneur en graisse, en sel
Conservation, distribution des aliments	- réfrigérateurs & équipement pour préparation des aliments	- nanoparticules (ex nanoargent) - nanosenseurs - matériaux composites pour emballages	- prolongation durée de conservation et protection contre contaminations bactériologiques
Alimentation fonctionnelle	- Compléments alimentaires, boissons fonctionnelles	- nanoparticules, nanostructures	- Amélioration de l'assimilation d'éléments minéraux, vitamines, ...

2. Exemples particuliers d'applications nanoparticulaires

Nanoargent et autres métaux précieux ou éléments minéraux

Le nanoargent est le nanométal le plus largement utilisé en alimentation. Outre ses usages reposant sur son incorporation dans des surfaces fonctionnalisées en vue du contrôle antibactérien (réfrigérateurs, ustensiles de cuisine, ...), des utilisations en tant que compléments alimentaires et en alimentation diététique existent également (Woodrow Wilson International Centre for Scholars, 2009). On retrouve également d'autres compléments alimentaires contenant de l'or ou du platine à l'état nanoparticulaire de même que des formes nanoparticulaires de toute une série d'éléments (B, Ca, Cr, Cu, I, Fe, Mg, Mn, K, Se, SiO₂, S, Zn). Ces compléments peuvent exister sous forme ionique ou sous forme colloïdale (en suspension dans l'eau) et avec des allégations nutritionnelles diverses voire thérapeutiques (action contre le cancer ou traitement d'autres pathologies graves).

Dioxyde de titane

Le dioxyde de titane est bien connu depuis longtemps déjà comme additif alimentaire (E 171). Il est utilisable pour décorer et enrober, notamment en confiserie et en fabrication de chewing-gum. Le dioxyde de titane existe également sous forme non-nano et c'est la teneur en particules plus fines qui va, en définitive, conditionner sa catégorisation ou non dans le registre nano (voir définition de nanomatériaux dans la section introductive du Prof. Guy Maghuin-Rogister). Divers brevets ont été introduits pour des applications plus typiquement nano, par exemple pour réaliser des revêtements nanométriques sur des surfaces alimentaires en vue d'offrir une barrière à l'humidité et à l'oxygène. Le nanodioxyde de titane est également utilisé pour le traitement de l'eau (photocatalyseur servant à oxyder des contaminants et tuer des pathogènes microbiens).

Silice

Le dioxyde de silicium (silice) est également un additif alimentaire connu depuis longtemps (E551). C'est un anti-agglomérant qui est utilisé pour assurer la fluidification de nombreuses denrées alimentaires présentes sous forme de poudres (sucre, lait écrémé, sel et substituts, etc.). Ici aussi son appartenance à la catégorie nano dépend fortement de la définition adoptée (importance de la fraction nano par rapport au total) et son origine (produit naturel transformé par hydrolyse). La question se complique davantage lorsque l'on prend en considération le fait que la fraction non-nano est formée d'agrégats susceptibles de libérer des particules individuelles à l'échelle nano sous l'effet d'une digestion acide ou enzymatique, par exemple au niveau du tractus intestinal.

Il existe quantité d'autres dérivés de la silice (aluminosilicates divers tels que les matériaux argileux et les zéolites) dont la catégorisation en nano peut être avancée suivant l'origine du produit (naturel ou synthétique), suivant le traitement subi (purification, hydrolyse, modification chimique), suivant la fraction de particules nano présentes dans le produit (en l'état ou après digestion), et compte tenu de la présence dans l'alimentation en tant que constituant normal (présence naturelle), fortuite (par exemple sous forme de contaminant) ou résultant d'une action volontaire (par exemple sous forme d'additif technologique).

Sel

Le sel (chlorure de sodium) est également souvent cité comme potentiellement applicable à l'échelle nano bien qu'il s'agisse d'un composé soluble dans l'eau qui ne subsistera donc pas longtemps à l'état nanoparticulaire dans les organismes vivants. Toutefois, certaines formes d'applications du sel pourraient bénéficier de la technologie nano comme par exemple les applications de gros sel ou d'autres formes de salage à partir de grains solides. Ces applications de sel bien que prisées pour certaines préparations gastronomiques nécessitent l'administration

de quantités importantes de chlorure de sodium. De nouvelles formulations basées sur les nanotechnologies pourraient permettre de réduire la quantité totale de chlorure de sodium réellement appliquée tout en induisant au niveau des papilles gustatives un goût salé de même intensité que l'homologue traditionnel.

Nanovitamines et autres nanonutriments organiques

De nombreuses (pro)vitamines, co-enzymes, antioxydants et autres nutriments (par exemple, acides gras polyinsaturés) mais également des arômes et des produits de conservation peuvent être administrés sous forme nanoparticulaire par le biais de dispositifs permettant un relargage contrôlé des constituants (nanodistribution). Cette forme d'administration permet notamment d'augmenter la biodisponibilité (amélioration de l'absorption intestinale) et de contrer certains effets indésirables (odeur de poisson de certains compléments alimentaires contenant des acides gras oméga-3. Le lycopène, caroténoïde relativement peu absorbé lorsqu'il est présent sous forme naturelle dans des aliments crus (tomate), peut être produit sous une forme synthétique nanométrique. Cette forme dispersable dans l'eau permet d'obtenir des particules dont la taille avoisine les 100 nanomètres, ce qui favorise l'absorption intestinale. L'EFSA s'est prononcé favorablement à propos de l'utilisation de lycopène dans les aliments et les boissons (EFSA, 2008) sans, toutefois, prendre en compte la forme nanométrique du produit. Le JECFA (Comité mixte FAO-OMS d'experts des additifs alimentaires), quant à lui, a stipulé que ni les spécifications (doses recommandées) ni les doses journalières admissibles fixées pour les formes traditionnelles (c'est à dire non-nano) ne pouvaient être appliquées aux constituants de compléments alimentaires distribués sous forme nano (OMS, 2007).

Méthodes de détection de nanoparticules dans la chaîne alimentaire

1. Généralités concernant le dosage chimique des nanoparticules

En matière de dosage chimique il existe plusieurs niveaux de complexité. Tout d'abord, on peut se contenter de mesurer la présence de tel ou tel élément dans une matrice donnée et ce, par

rapport à une limite de détection préalablement fixée. Plus compliquée déjà est l'analyse quantitative qui exprime le résultat avec une certaine justesse et précision en unités de l'élément à déterminer par unité de masse. Dans bien des cas, on est obligé d'aller plus loin en faisant la différence entre les différentes formes sous lesquelles le dit-élément peut être présent. Ainsi on fera une différence entre teneur en As organique ou inorganique voire, au sein de cette dernière catégorie, en As trivalent ou pentavalent. Dans les dosages nanoparticulaires, le degré de complexité est plus élevé encore car il s'agit de pouvoir déterminer la quantité d'un élément présente à l'état de nanoparticules et non sous forme micro- ou macro-cristalline ou à l'état dissous ou amorphe. Et même en ce qui concerne l'état nanoparticulaire, il faudra pouvoir donner des informations au moins sur la taille (et la distribution des tailles) voir sur les formes présentes. De ce fait les techniques mises en œuvre sont souvent complexes et allient des techniques de microscopie électronique à d'autres techniques basées sur des couplages permettant, d'une part, de réaliser la séparation des particules en fonction de leur taille et, d'autre part, de réaliser la quantification de celles-ci.

Dans le domaine de l'étude de la chaîne alimentaire, les méthodes disponibles les plus communément utilisées pour évaluer la concentration en particules ainsi que la distribution des tailles comprennent la microscopie électronique, les techniques chromatographiques et de centrifugation, l'ultrafiltration et diverses techniques spectroscopiques (Tiede *et al.*, 2008 ; Calzolari *et al.*, 2012). Il est fréquent que diverses techniques soient combinées de façon à contrer des problèmes liés au manque de spécificité (analyse de matrices complexes) ou de sensibilité. Ci-dessous, nous détaillerons plus avant quelques techniques particulièrement dédiées à la détermination des nanoparticules dans des matrices alimentaires et environnementales

2. Méthodes de microscopie électronique

Les deux techniques les plus utilisées en matière de microscopie électronique sont la SEM (scanning electron microscopy) et la TEM (transmission electron microscopy). Ces techniques bien que précises nécessitent une préparation de l'échantillon (séchage sous vide), préparation qui peut conduire à la formation d'agglomérats, ce qui rend difficile la caractérisation exacte des

nanoparticules dans les échantillons analysés (Dudkiewicz et *al.*, 2011). En revanche, les techniques de microscopie électronique permettent de déterminer la taille exacte de la nanoparticule alors que d'autres techniques (comme la DLS) ne permettent de déterminer que la taille hydrodynamique apparente. Les techniques microscopiques fournissent également des informations intéressantes non seulement sur la taille mais aussi sur la distribution des tailles et la forme des particules (figure 1). Cependant, les enrobages organiques ne sont visualisables qu'après application d'une technique de coloration, ce qui peut conduire à des erreurs dans l'estimation du diamètre de la particule.

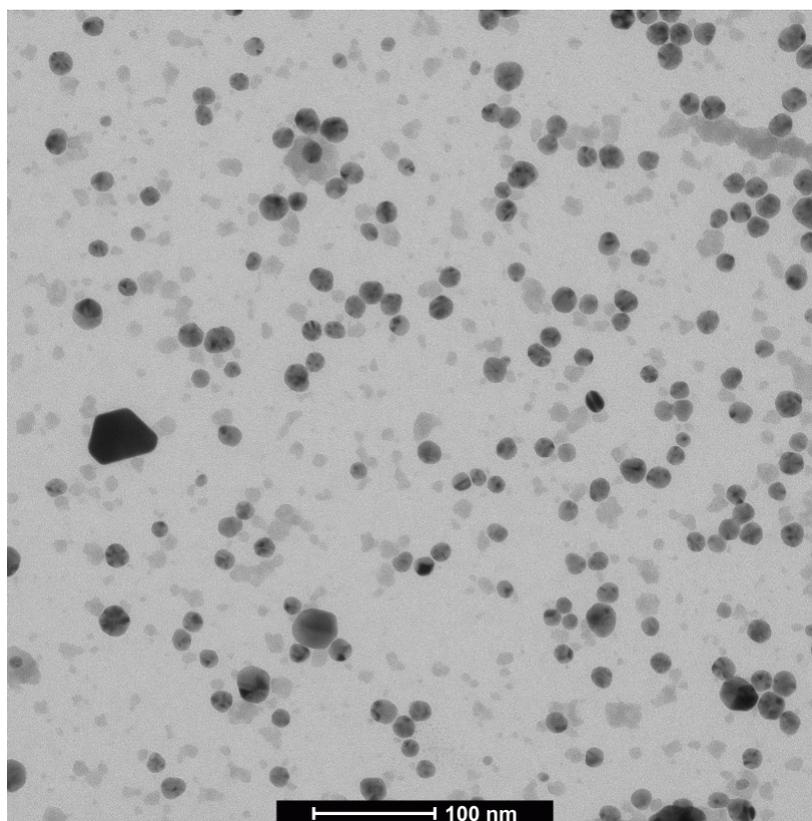


Figure 1 : Exemple d'analyse de nanoparticules d'argent par TEM (Résultat obtenu par le CODA-CERVA (Labo du Dr J. Mast) dans le cadre du projet RT NANORISK financé par le service de recherche contractuelle du SPF SPSCAE)

3. Dynamic light scattering (DLS)

La DLS est une technique optique basée sur la dispersion de la lumière sous l'effet de particules. Cette technique est relativement aisée d'utilisation en milieu liquide. Elle est rapide, bon marché et permet de mesurer le diamètre de particules monodispersées en mouvement dans un milieu liquide tel que l'eau, ce qui permet d'estimer le diamètre hydrodynamique y compris pour les particules enrobées avec des molécules organiques. En revanche la DLS souffre de handicaps majeurs liés au manque de sensibilité et de spécificité, ce qui rend l'analyse de matrices complexes particulièrement problématique (Kato et al., 2012).

4. Field-flow fractionation (FFF)

La technique de FFF est en réalité une technique de type chromatographique (von der Krammer et al., 2011). Elle se base sur une distribution différentielle des constituants entre une phase stationnaire et une phase mobile et est la plus performante des méthodes de séparation des espèces de petite et moyenne masse moléculaire. Les constituants du mélange à analyser sont entraînés par un écoulement laminaire de liquide vecteur vers la sortie du séparateur où ils sont détectés généralement au moyen d'un photomètre UV. Dans toutes les techniques de FFF, un champ de force est appliqué perpendiculairement à la direction de l'écoulement, selon l'épaisseur du canal. Ce champ de force induit un transport des nanoparticules, en fonction de leurs caractéristiques intrinsèques, vers une des parois ce qui conduit à une distribution non uniforme de leur concentration dans l'épaisseur du canal. Ce phénomène, associé à une non-uniformité du profil de vitesses du liquide vecteur (plus rapide au centre du canal qu'au voisinage de la paroi), confère à chaque constituant une vitesse de migration qui lui est propre, les particules de plus petites tailles migrant le plus rapidement (voir figure 2). Par rapport à la technique de DLS, le FFF offre l'avantage d'une meilleure résolution des tailles, ce qui permet de déterminer la taille des particules avec davantage de précision.

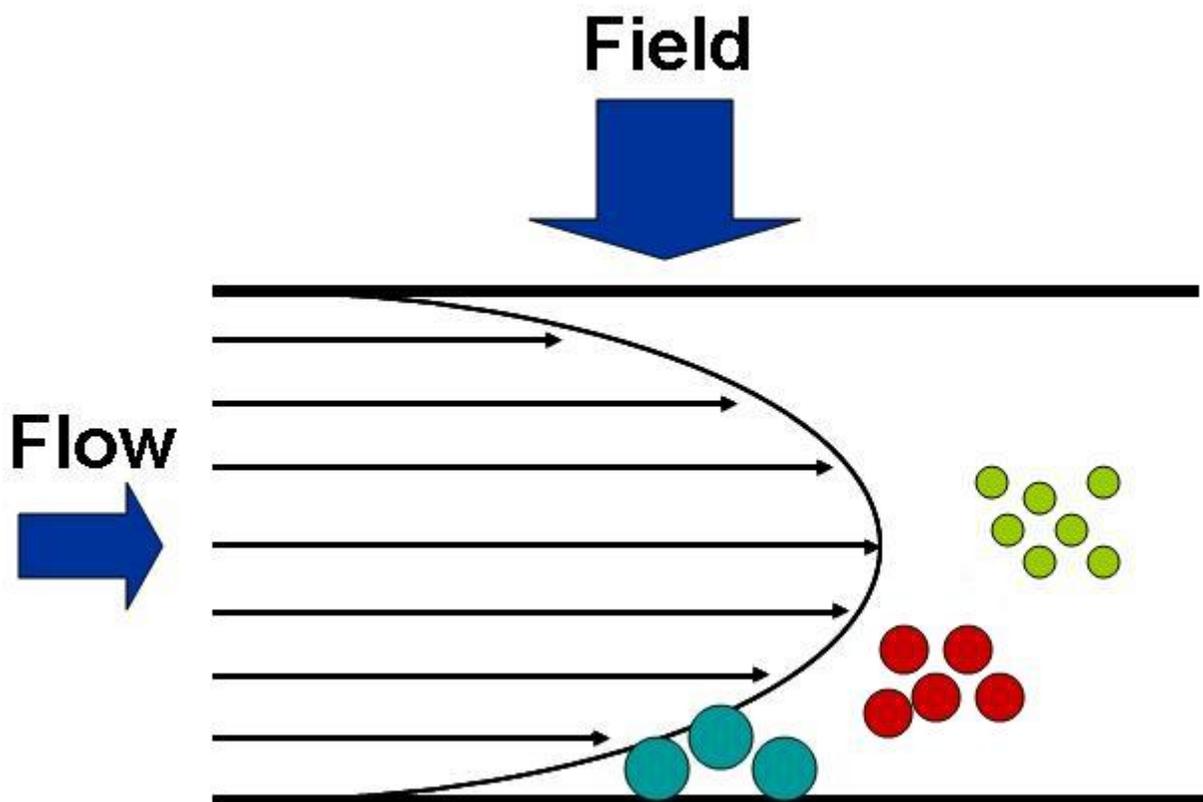


Figure 2 : Représentation schématique de la distribution des profils de vitesse dans un flux laminaire (Flow) sous l'effet d'un champ de force (Field)

5. Single-particle ICPMS

Cette technique, en plein développement, repose sur l'usage de l'ICPMS (inductively coupled plasma mass spectrometry), une des techniques les plus raffinées pour l'analyse quantitative d'éléments inorganiques à l'état de trace. Pour cette application, l'ICPMS est utilisé (sans minéralisation ou mise en solution préalable de l'échantillon) en mode particulier dans la mesure où le signal de l'échantillon (envoyé pour analyse dans le générateur de plasma et ensuite dans

le spectromètre de masse) est enregistré en continu avec une résolution temporelle de 10 à 20 ms. De ce fait, on obtient, à la masse choisie pour détecter l'élément en question, un signal continu

(bruit de fonds) avec apparition de pics d'intensité élevée. Ceux-ci correspondent au passage d'une nanoparticule et le nombre de pic observé est donc directement proportionnel au nombre de particules présentes dans l'échantillon. En outre, l'intensité du pic varie proportionnellement avec la taille de la nanoparticule en question (figure 3). Cette technique prometteuse permet donc de déterminer la quantité et la distribution de nanoparticules dans l'échantillon à étudier avec une grande sensibilité et précision. Elle a déjà été utilisée avec succès pour la détermination de nanoAg dans des eaux usées (Mitrano et al., 2012), et est actuellement testée sur matrices alimentaires dans le cadre du projet RT NANORISK financé par le service de recherche contractuelle du SPF Santé Publique, Sécurité de la Chaîne Alimentaire et Environnement (voir www.cerva-coda.be).

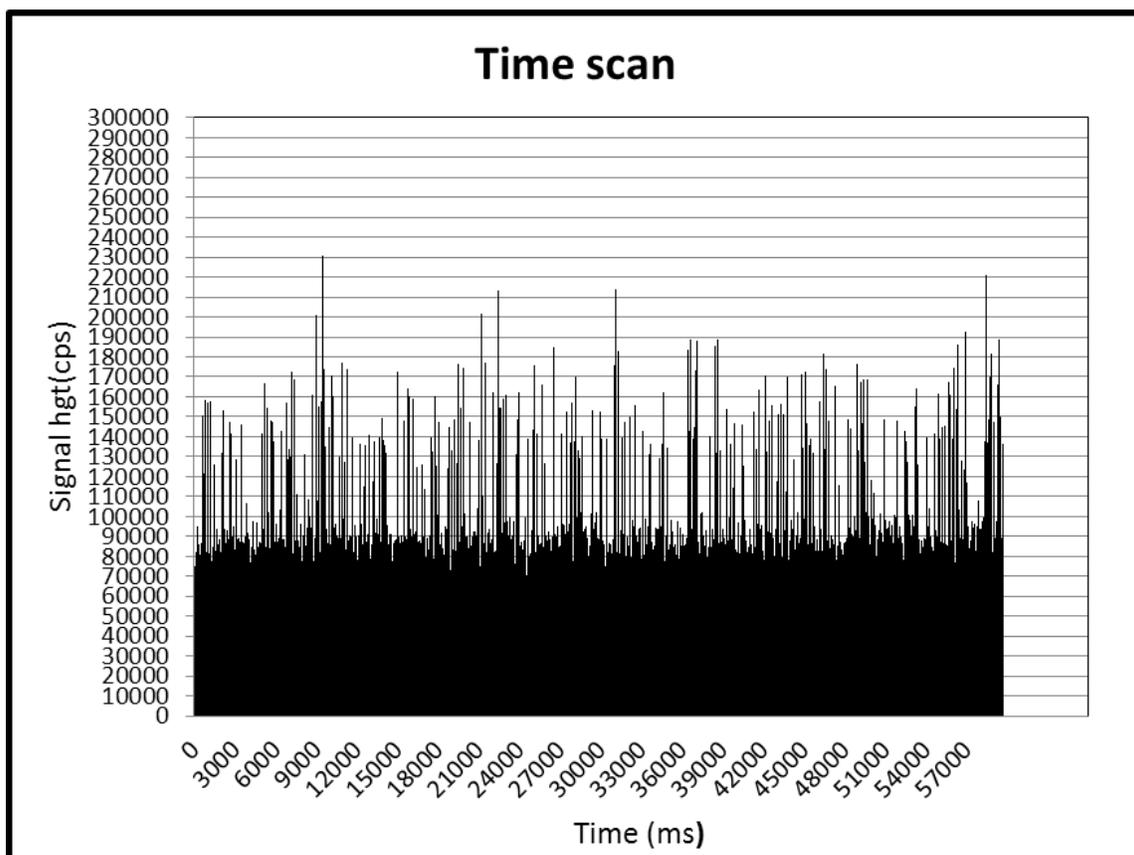


Figure 3 : Exemple d'un résultat d'analyse de nanoparticules d'argent par SP-ICP-MS (le nombre de pic est proportionnel au nombre de nanoparticules présentes dans l'échantillon et leur intensité est fonction de la taille de la particule analysée par le détecteur MS ; résultat obtenu au CODA-CERVA (labo du Dr N. Waegeneers) dans le cadre du projet RT NANORISK financé par le service de recherche contractuelle du SPF SPSCAE).

6. Comparaison des avantages et inconvénients des principales techniques évoquées

Les différentes techniques présentées dans cet article présentent chacune un profil particulier qui est résumé de façon qualitative dans le tableau 1

	SEM	TEM	DLS	FFF	SP-ICPMS
Taille minimale	++	+++	+++	+++	+
Échelle dynamique	+++	++	+++	++	++
Précision de la mesure	++	++	+	+	+
Applicabilité aux mélanges	+	+	-	++	++
Applicabilité <i>in situ</i>	-	-	++	+	++
Facilité	-	-	++	+	+
Coût	-	-	+++	++	+

Tableau 1 : évaluation qualitative des avantages et inconvénients présentés par diverses techniques d'analyse (adapté de Calzolari *et al.*, 2012)

Il ressort de ce tableau que les techniques de microscopie électronique (SEM et TEM) restent les plus précises et applicables universellement bien qu'elles souffrent de lacunes importantes liées à la préparation des échantillons qui peut introduire un biais dans la mesure de la distribution des tailles. En outre, ces techniques sont peu accessibles, coûteuses et non propices à l'analyse d'échantillons en grands nombres. La FFF et la DLS de même que la SP-ICPMS

pourraient constituer des alternatives utiles (Samontha et al., 2011; Schmidt et al., 2011) sans oublier les techniques plus traditionnelles basées sur la centrifugation et l'ultrafiltration (non évoquées en détail dans le présent article).

Références bibliographiques

Calzolari L, Gilliland D and Rossi F (2012) Measuring nanoparticles size distribution in food and consumer products : a review. *Food Additives and Contaminants*, 29(8), 1183-1193

Chaudhry Q, Scotter M, Blackburn J, Ross B, Boxall A, Castle L, Aitken R and Watkins T (2008) Applications and implications of nanotechnologies for the food sector. *Food Additives and Contaminants* 25(3) : 241-258

Dudkiewicz A, Tiede K, Löschner K, Jensen LHS, Jensen E, Wierzbicki R, Boxall A and Molhave K (2011) Characterization of nanomaterials in foods by electron microscopy. *TrAC – Trend Analyt chem.* 30(1) : 28-43

EFSA (2008) Opinion : Safety of synthetic lycopene : Scientific Opinion of the Scientific Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies, adopté le 10 avril 2008

FAO/OMS (2011) Réunion d'experts FAO/OMS sur l'application des nanotechnologies dans les secteurs de l'alimentation et de l'agriculture : incidences possibles sur la sécurité alimentaire – rapport de la réunion (123p)

FASFC (2010) Nanotechnology in the food Chain – opportunities & risks. Proceedings of the international symposium held in Brussels, 24th november 2010 (138p)

Kato H, Nakamura A, Takahashi K and Kinugasa S (2012) Accurate size and size-distribution determination of polystyrene latex nanoparticles in aqueous medium using DLS and asymmetrical FFF with multi-angle light scattering. *Nanomaterials* 2: 15-30

Mitrano DM, Leshner EK, CBednar A, Monserud J, Higgins CP and Ranville JF (2012) Detecting nanoparticulate silver using single-particle ICPMS. *Environ Toxicol Chem.* 31(1): 425-436

OMS (2007) Evaluation of certain food additives and contaminants (67^{ème} rapport du Comité Mixte FAO-OMS d'experts des additifs alimentaires). WHO Technical report series, N° 859

RIKILT (2007) Health impact of nanotechnologies in food production. RIKILT /RIVM Report 2007.014 (91p)

Samontha A, ShiowatanaJ and Siripinyanond A (2011) Particle size characterization of titanium oxyde in sunscreen products using sedimentation FFF – ICPMS. *Analyt Bioanalyt Chem.* 399 : 973-978

Schmidt B, Loeschner K, Hadrup N, Mortensen A, Sloth JJ, Bender Koch CB and Larsen EH (2011) Quantitative characterization of gold nanoparticles by FFF coupled online with light scattering detection and ICPMS. *Analyt Chem.* 82 : 2461-2468

Tiede K, Boxall A, Tear S, Lewis J, David H and Hasselöv M (2008) Detection and characterization of engineered nanoparticles in food and the environment. *Food Additives and Contaminants*, 25(7), 795-821

Von der Kammer F, Legros S, Hofmann T, Larsen EH and Loeschner K (2011) Separation and characterization of nanoparticles in complex food and environmental samples by FFF. *TrAC – Trend Analyt Chem.* 30 : 425-436

Woodrow Wilson International Centre for Scholars, 2009. *The nanotechnology consumer Inventory*. Disponible à l'adresse : www.nanotechproject.org/inventories/consumer/