

LES CAHIERS

2011-02

DE LA SÉCURITÉ INDUSTRIELLE

L'ANALYSE COÛT-BÉNÉFICES

**COÛTS ET BÉNÉFICES
DE L'USAGE DES
NANOPARTICULES
D'ARGENT DANS LES
RÉFRIGÉRATEURS**

**RÉMY TELLO
ÉRIC MARSDEN
NICOLAS TREICH**

L'Institut pour une Culture de Sécurité Industrielle (ICSI) est une association de loi 1901 dont la vocation est de faire progresser la culture de sécurité en France. Il est né en 2003 de l'initiative de huit partenaires fondateurs (Airbus, Arcelor, CNRS, Communauté d'agglomération du Grand Toulouse, EDF, Institut National Polytechnique de Toulouse, Région Midi-Pyrénées et Total) qui ont été rapidement rejoints par d'autres industriels de branches diverses, des Instituts spécialisés, des Écoles et Universités, des acteurs de la société civile (associations de Maires, organisations syndicales, organisations non gouvernementales).

C'est donc l'ensemble des parties prenantes de la sécurité industrielle que l'ICSI fédère, ce qui en fait son originalité.

Cet Institut poursuit trois objectifs principaux :

- ▷ rechercher, pour une meilleure compréhension mutuelle et en vue de l'élaboration d'un compromis durable entre les entreprises à risques et la société civile, les conditions et la pratique d'un débat ouvert prenant en compte les différentes dimensions du risque ;
- ▷ contribuer à l'amélioration de la sécurité dans les entreprises industrielles de toute taille, de tous secteurs d'activité, par la prise en compte du risque industriel sous tous ses aspects ;
- ▷ favoriser l'acculturation de l'ensemble des acteurs de la société aux problèmes des risques et de la sécurité.



Institut pour une Culture de Sécurité Industrielle

Association de loi 1901

<http://www.icsi-eu.org/>

6 allée Émile Monso – BP 34038
31029 Toulouse Cedex 4
France

Téléphone : +33 (0) 534 323 200
Fax : +33 (0) 534 323 201
Courriel : contact@icsi-eu.org

Avant-propos

La sécurité industrielle doit faire face à deux mutations qui se juxtaposent. Alors qu'elle a jusqu'alors principalement concerné les activités de production, l'implication de plus en plus importante de la société dans les questions de sécurité impose de s'intéresser également aux **produits** (énergies, médicaments, systèmes de transports, *etc.*). D'autre part, si l'assurance d'un haut niveau de sécurité était justifiée par l'acquis de l'expérience, cette approche n'est plus applicable en situation d'**innovation**. En effet, si l'innovation est regardée avec un œil critique motivé par la mémoire de certains événements dramatiques survenus, elle est également source de progrès pour nos conditions de vie. Mais **comment choisir** ? L'Analyse Coût-Bénéfices est un outil qui peut aider à réfléchir sur ce choix fondamental pour nos sociétés. Cet outil permet en effet de comparer les impacts de natures très diverses des innovations, comme les dommages possibles sur la santé, sur l'environnement mais aussi les gains sociaux et économiques générés.

Ces interrogations sur l'apport effectif de l'innovation sont très présentes actuellement lorsqu'il est question des nanotechnologies. Les résultats présentés dans ce Cahier de la sécurité industrielle sont issus de travaux menés dans le cadre du projet « Nano & Société » du programme de recherche *NanoInnov* de l'ANR¹. Ces études n'ont pas pour but de conclure sur l'intérêt de l'utilisation des nanotechnologies dans un produit de consommation (ici les réfrigérateurs), mais plutôt de **proposer une approche** pour mener une telle étude. Ce document met en particulier en valeur les outils théoriques qui sont disponibles et fournit une illustration de leurs usages sur un exemple très concret.

La méthode Analyse Coût-Bénéfices oblige tout d'abord à exprimer les **critères** considérés et donc à fixer le **périmètre de l'étude** et les **scénarios envisagés**. Cette première étape nécessite donc de rendre explicites les objectifs choisis, alors qu'ils font souvent partie du non-dit. De mon point de vue, ceci répond à une première interrogation actuelle de la société : quel sens donner à l'innovation ? L'étude présentée considère un périmètre large, souligne les aspects exclus dont les justifications sont naturellement discutables, et pourrait sans doute intégrer d'autres points de vue.

Dans un second temps, des valeurs des paramètres caractérisant les critères sont estimées. La monétarisation a pour unique intérêt de disposer d'une seule unité permettant des cumuls et des comparaisons. Deux remarques importantes sur cet aspect souvent sujet à controverse. Tout d'abord, si les chiffres fournis sont ramenés à des individus (ici un ménage possédant un réfrigérateur), ils représentent des individus *statistiques*; il ne s'agit naturellement pas de l'appréciation d'une personne donnée mais d'un individu nous représentant collectivement. Peut-être serait-il d'ailleurs souhaitable de présenter des résultats chiffrés concernant l'*ensemble des ménages*. En second lieu, les valeurs fournies sont relatives. Ce qui est important est de pouvoir comparer ces valeurs entre elles; elles mesurent donc la « Valeur » que nous accordons à chacun des critères. À nouveau, il convient d'insister sur l'aspect « moyen » de ces valorisations. La méthode a cependant comme second intérêt d'imposer une réflexion collective sur ces valeurs, et même ses Valeurs. Ici encore, les chiffres fournis peuvent être discutés et même doivent l'être. L'outil doit d'ailleurs inciter à étudier les effets de nouvelles valeurs issues par exemple de la mise en place de mesures de prévention ou de protection des risques. L'ACB peut alors aider à évaluer l'efficacité réelle de telles mesures.

¹ANR : Agence Nationale de la Recherche

Enfin, les travaux présentés soulignent les **incertitudes** existantes sur de nombreuses données et mentionnent explicitement les hypothèses considérées. L'étude de l'influence effective de l'incertitude relative de chacun des paramètres sur le résultat final est, de mon point de vue, essentielle ; elle permet de mettre en valeur les sujets sur lesquels des connaissances complémentaires sont indispensables et ceux pour lesquels l'incertitude n'a pas d'impact tangible.

Ce travail apporte donc une pierre au débat sur les **outils nous permettant une réflexion collective sur les apports et dommages de l'innovation.**

Toulouse, le 26 janvier 2011
Gilles Motet
Professeur à l'INSA Toulouse
Directeur Scientifique de l'ICSI

Ce document a principalement été rédigé par Rémy Tello. Éric Marsden (FonCSI) et Nicolas Treich (Toulouse School of Economics) ont suivi les travaux et contribué à la rédaction. Les auteurs tiennent à remercier Garry Julieno et Nicolas Loreille, étudiants du Mastère Spécialisé *Risk Engineering* de l'INSA Toulouse, l'INP Toulouse et l'ICSI pour leur travail préliminaire sur l'impact des nano-particules d'argent dans les réfrigérateurs domestiques, dans le cadre d'un projet d'étude. Ils adressent également des remerciements à Henrik Andersson (LERNA) pour ses conseils avisés concernant l'étude des prix hédoniques, ainsi qu'à Roberte Manigat (Direction Générale de la Santé) et James Hammitt (Harvard Centre for Risk Analysis et Toulouse School of Economics) pour des suggestions qui ont permis d'améliorer ce document.

Votre avis nous intéresse ! Pour tout commentaire ou remarque permettant d'améliorer ce document, merci d'envoyer un courriel à cahiers@icsi-eu.org.

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Scénarios	2
1.2	Périmètre	2
2	Risque sanitaire évité vs risque toxicologique engendré	5
2.1	Risque sanitaire relatif aux bactéries	5
2.2	Mécanisme d'action du nano-argent	6
2.3	Effets toxicologiques associés au nano-argent	7
2.4	Identification des conséquences de chaque scénario	10
3	Bénéfice sanitaire des nanoparticules d'argent	11
3.1	Délimitation du risque et définition du ménage « moyen »	11
3.2	Impact des infections alimentaires sur la santé	12
3.3	Monétisation	14
3.4	Réduction du risque associée aux nanoparticules d'argent	15
4	Coûts toxicologiques des nanoparticules d'argent	19
4.1	Ecotoxicité	19
4.2	Toxicité pour l'homme	20
4.3	Quantification de la toxicité humaine	21
5	Coût additionnel d'acquisition lié au nano-argent	23
5.1	Prix hédoniques	23
5.2	Données	24
5.3	Spécification du modèle	27
5.4	Résultats des régressions et calcul du prix implicite du nano-argent	28
6	Résultats	31
6.1	Bénéfice net	31
6.2	Analyse d'incertitude via une simulation Monte-Carlo	31
6.3	Interprétation des résultats et limites de l'étude	34
6.4	Identification des données manquantes	35
7	Conclusions	37
A	Annexe : supplément électronique	39
B	Annexe : historique des révisions	41
	Bibliographie	43

Introduction

Les nanotechnologies sont l'un des moteurs de la prochaine révolution industrielle [Atтали 2008]. Elles représentent un potentiel considérable de croissance et de développement. La Commission européenne a estimé que le marché mondial des nanotechnologies était de plus de 700 milliards d'euros en 2008 alors qu'il ne représentait que 40 milliards d'euros en 2001 [Gaffet 2008]. Cependant, les nanoparticules, précisément parce que leur taille leur confère des propriétés nouvelles, introduisent aussi de nouveaux dangers pour nos sociétés. Malgré ces dangers, des milliers de produits de consommation comme des cosmétiques, des textiles, de l'électroménager, de l'informatique, de l'emballage alimentaire, des revêtements muraux, des peintures et des médicaments contiennent des nanoparticules¹.

potentiel intéressant

La présente étude est, à notre connaissance, la **première analyse socio-économique des coûts et des bénéfices associés à la présence de nanoparticules dans un produit de consommation courante**. Plus précisément, elle porte sur l'usage des nanoparticules d'argent dans les réfrigérateurs. Le bénéfice des réfrigérateurs équipés de nano-argent tient à la diminution des infections bactériennes d'origine alimentaire due à ses propriétés antimicrobiennes, tandis que les coûts tiennent au prix additionnel d'acquisition des appareils d'une part, et à l'impact toxicologique potentiel du nano-argent sur la santé et l'environnement, d'autre part.

analyse
coût-bénéfices

Il est important de signaler d'emblée que l'étude est entachée d'une **incertitude considérable**. Ainsi, les résultats obtenus, même si leur expression chiffrée peut donner une illusion de précision, doivent être interprétés avec extrême prudence ; au mieux, l'étude donne des ordres de grandeur relatifs aux différents effets. En ce sens, l'étude est exploratoire, ayant pour objectif principal d'illustrer l'application de la méthodologie économique à un domaine d'application nouveau : les nanotechnologies. Aussi, et dans la perspective de développer des analyses socio-économiques plus abouties dans le futur, cette étude permet d'identifier le manque, et donc le besoin, de données supplémentaires, notamment sur les effets des nanoparticules sur la santé humaine.

On sait identifier les sources d'incertitude ayant le plus fort impact sur l'estimation du bénéfice social net de cette technologie, pour lesquelles davantage de recherches seraient nécessaires pour éclairer les décideurs

Même si l'étude n'est pas *stricto sensu* une analyse coût-bénéfices (ACB)—puisqu'il ne s'agit pas d'évaluer une décision publique [Treich 2005]—elle se base fortement sur la méthodologie de l'ACB. En effet, nous définissons en premier lieu deux scénarios, un scénario de référence (réfrigérateurs « standards ») et un scénario alternatif (réfrigérateurs « nano »), ainsi que le périmètre de l'étude. Nous identifions ensuite les conséquences possibles pour chaque scénario, avant de quantifier et monétiser les bénéfices et les coûts relatifs aux réfrigérateurs équipés de nano-argent. Enfin, nous analysons les résultats en termes de bénéfice net social et leur robustesse.

Le présent document présuppose une connaissance des principes et méthodes de l'analyse coût-bénéfices. Le lecteur souhaitant se documenter sur ces sujets pourra utilement se référer à deux autres Cahiers dans la même collection :

- ▷ *L'analyse coût-bénéfices en 10 questions*, par Nicolas Treich [Treich 2008], qui fournit une introduction à l'approche et les principales questions que soulève son utilisation ;



¹ Consulter par exemple <http://www.nanotechproject.org/inventories/consumer/>, qui recense sur la base d'autodéclarations les produits contenant des nanoparticules.

- ▷ *L'analyse coût-bénéfices: guide méthodologique*, par Valérie Meunier et Éric Marsden [Meunier et Éric Marsden 2009], qui présente les principes de l'ACB, détaille ses principales étapes méthodologiques et illustre son application sur des questions liées à des décisions d'investissement en matière de sécurité industrielle.

1.1 Scénarios

On considère deux scénarios :

- ▷ Scénario de référence : Un ménage français moyen est équipé d'un réfrigérateur dit « standard », c'est-à-dire sans revêtement antibactérien en nanoparticules d'argent.
- ▷ Scénario alternatif : Le même ménage français moyen est équipé d'un réfrigérateur dit « nano », c'est-à-dire avec revêtement antibactérien en nanoparticules d'argent.

Le ménage français « moyen » qui est au centre de l'analyse correspond à un ménage de 2009, dont seul l'équipement en matière de réfrigérateur est modifié d'un scénario à l'autre.

1.2 Périmètre

L'étude porte sur les réfrigérateurs des particuliers (ou ménages) en France métropolitaine. Elle exclut les réfrigérateurs utilisés dans la chaîne de distribution des aliments ainsi que ceux utilisés dans la restauration. On postule en effet que le risque associé à la conservation d'aliments en réfrigérateur est prédominant chez les particuliers, puisque les professionnels respectent généralement des normes d'hygiène strictes, ce qui réduit fortement le risque.

1.2.1 Acteurs

Les ménages constituent ici les acteurs principaux. Le secteur de la production des réfrigérateurs est aussi étudié dans le chapitre sur le coût additionnel (§5).

1.2.2 Effets antibactériens

L'estimation des effets antimicrobiens du nano-argent dans les réfrigérateurs requiert de définir quelles bactéries sont à la fois affectées par le matériau et responsables des maladies d'origine alimentaire véhiculées par les aliments réfrigérés.

De nombreuses études [Birla et al. 2009; Cheng et al. 2006; Cho et al. 2005; Feng et al. 2000; Kim et al. 2007] démontrent que les bactéries *Escherichia coli*² (*E. coli*) et *Staphylococcus Aureus*³ (*S. Aureus* ou encore *staphylocoque doré*) sont affectées par le nano-argent. D'autres études corroborent ces résultats et concluent à des résultats du même ordre sur les bactéries *Listeria monocytogenes* [Kampmann et al. 2008] et *Salmonella Typhimurium*⁴ (*S. Typhi*) [Shrivastava et al. 2007; Song et al. 2006].

Impacts sanitaires de la bactérie *Listeria monocytogenes*

La bactérie Listeria monocytogenes cause la listériose, qui se manifeste principalement sous la forme de méningite et de septicémie chez l'adulte, les enfants et les nouveau-nés, et par des avortements chez la femme enceinte, avec une forte létalité (20 à 30%). La consommation d'aliments contaminés est la principale voie de transmission [InVS 2004].

²Les infections à *Escherichia coli* producteurs de shigatoxines (STEC) peuvent se manifester sous forme de diarrhée banale non sanglante ou de colite hémorragique, et se compliquent parfois en syndrome hémolytique et urémique (SHU). Le SHU, plus fréquent aux âges extrêmes de la vie, représente la principale cause d'insuffisance rénale aiguë chez les enfants âgés de 1 mois à 3 ans. Plus d'un tiers des cas de SHU ont des séquelles rénales à long terme et la létalité est de 3 à 5% [InVS 2004]. Les véhicules alimentaires de STEC les plus fréquents sont d'origine bovine : viande de bœuf en particulier hachée et lait non pasteurisé [InVS 2004].

³L'intoxication par *Staphylococcus aureus* se manifeste par des symptômes digestifs hauts prédominants (nausées, vomissements importants et douleurs abdominales), souvent accompagnés de diarrhées. Le réservoir de *S. aureus* producteurs d'entérotoxines est habituellement humain et le plus souvent la contamination des aliments (sandwichs, salades, pâtisseries, viandes tranchées, etc.) se fait lors de leur préparation par un porteur sain (rhino-pharyngé) ou présentant une plaie infectée. L'entérotoxine peut aussi être d'origine bovine et consommée dans certains produits laitiers crus (fromages, lait) [InVS 2004].

⁴La *Salmonella enterica* sérotype Typhi est responsable de fièvres typhoïdes qui se traduisent par une augmentation progressive de la fièvre jusqu'à 40°C, asthénie, céphalées, insomnie, puis diarrhée, obnubilation, pouls dissocié, tumeurs... Des complications (digestives, myocardiques ou neurologiques) peuvent survenir. Le réservoir est strictement humain et la transmission se fait le plus souvent par absorption d'aliments souillés par un porteur, ou par ingestion d'eau, coquillages, fruits de mer ou légumes crus contaminés [INRS 2008].

S. Typhi est néanmoins exclue du périmètre de l'étude par manque de données. La littérature sur le coût de la maladie et sur les effets sur le bien-être associés aux salmonelles porte en général sur *S. Typhi* et *S. non Typhi* sans distinction. De plus, les infections aux *S. Typhi* ont une incidence très faible en France—estimée à 54 cas par an dans les années 1990 [InVS 2004]—comparée à celles d'*E. coli* et de *S. Aureus*, de l'ordre de 10 et 100 fois plus grandes respectivement.

Par ailleurs, les *Pseudomonas aeruginosa* (*bacilles pyocyaniques*) ne sont pas retenues dans l'ACB malgré la démonstration d'effets antibactériens du nano-argent dans plusieurs références [Birla et al. 2009; Kampmann et al. 2008; Song et al. 2006]. La transmission des *Pseudomonas* étant principalement manuportée et due à la contamination d'un réseau d'eau [InVS 2008], une réduction des cas d'infection due à des revêtements en nano-argent dans les réfrigérateurs semble particulièrement discutable.

L'étude des effets antibactériens du nano-argent portera donc sur *E. coli*, *S. Aureus* et *Listeria monocytogenes*. Pour les raisons invoquées précédemment, l'étude ne peut hélas pas tenir compte des effets antibactériens sur toutes les souches potentiellement concernées, ce qui tend à sous-estimer les effets bénéfiques du nano-argent.

1.2.3 Propriété désodorisante

Le nano-argent est également intégré dans les réfrigérateurs pour ses propriétés désodorisantes. On choisit d'exclure les effets bénéfiques relatifs à ces propriétés, et ce pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, cette propriété est présente à partir du moment où le nano-argent est incorporé dans le système de filtration de l'air de l'appareil, or cela n'est pas systématique. Souvent, les nanoparticules d'argent ne sont présentes que dans le revêtement intérieur de l'appareil.

De plus, la monétisation d'une réduction de l'odeur émanant d'un réfrigérateur semble peu évidente. La qualité de l'air des réfrigérateurs ne cause *a priori* pas à elle seule de maladies ; par conséquent, la littérature relative à la qualité de l'air atmosphérique ne semble pas adaptée pour estimer le bénéfice imputable à la réduction des mauvaises odeurs.

Enfin, il existe des objets désodorisants pour réfrigérateurs ayant un coût très modeste⁵.

1.2.4 Effets toxicologiques

Nous adoptons une **approche par cycle de vie** pour mieux comprendre les effets toxicologiques potentiels (chapitre 4), dans l'optique d'intégrer *a priori* l'ensemble des risques sur l'environnement et sur l'homme, et de les expliquer. Un manque de données dans la littérature nous contraint cependant à exclure les risques spécifiques aux travailleurs produisant le nano-argent de la quantification (§4.2). Celle-ci est entreprise sur les autres domaines d'exposition, sous contrainte des données actuellement disponibles et à l'aide d'hypothèses de travail. Un travail de quantification est proposé par la suite (§4.3), sous contrainte des données actuellement disponibles.

La figure 1.1 résume la nature des coûts et les bénéfices qui ont été intégrés à la présente étude, et les principaux coûts et bénéfices exclus du périmètre.

⁵Par exemple, un petit récipient de bicarbonate de soude dans son réfrigérateur, par son effet sur l'acidité, neutralise une grande partie des odeurs.

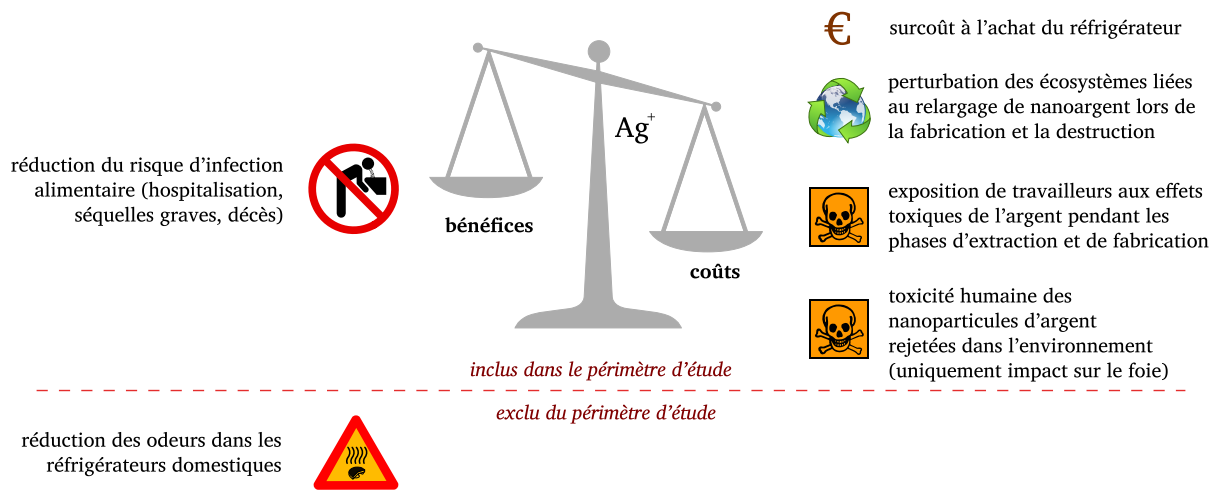


FIG. 1.1 – Synthèse des coûts et des bénéfices qui ont été inclus dans cette étude.

Risque sanitaire évité vs risque toxicologique engendré

2.1 Risque sanitaire relatif aux bactéries

Les nanoparticules d'argent sont incorporées dans les réfrigérateurs dans le but d'éliminer le développement de bactéries et moisissures tout en réduisant les mauvaises odeurs.

De nombreux facteurs expliquent le développement de bactéries avant, puis, et surtout durant la conservation des aliments au réfrigérateur. Prenons l'exemple de *Listeria monocytogenes*, souvent surnommée la « bactérie des réfrigérateurs », dont l'Institut de veille sanitaire [InVS 2000] explique le développement par :

- ▷ une contamination dans la chaîne de production : selon une enquête DGCCRF¹, environ 10% des aliments sensibles à *Listeria monocytogenes* (produits laitiers, charcuterie, produits de la pêche) sont contaminés à la distribution ;
- ▷ une contamination par contact avec l'environnement (croûte des fromages, légumes crus, herbes aromatiques, aliments crus d'origine animale) ;
- ▷ des contaminations croisées, d'un aliment à l'autre, généralement d'un aliment cru (viandes, légumes, etc.) à un aliment cuit ;
- ▷ une température inadaptée, celle-ci ne devant excéder 4°C ;
- ▷ le non-respect des dates limites de consommation.

Comme indiqué en notes de bas de page à la §1.2.2, les infections alimentaires causées par la consommation d'aliments contaminés causent des maladies bénignes à graves, pouvant mener à l'hospitalisation, voire au décès dans certains cas. L'InVS fournit des estimations de nombre de cas annuels moyens pour chaque pathogène sur la période 1990–1999, indiquées dans le tableau 2.1 (les colonnes - et + indiquent le nombre le plus faible et le plus élevé de cas sur la période de 10 ans)².

Infections à	Cas d'infection d'origine alimentaire		Cas d'hospitalisés		Cas décédés	
	-	+	-	+	-	+
<i>Escherichia Coli</i>	373	747	110	220	0	1
<i>Staphylococcus Aureus</i>	3 257	10 422	596	1 907	0	0
<i>Listeria monocytogenes</i>	304	304	304	304	78	78

TAB. 2.1 – Estimations du nombre annuel moyen de cas, de cas hospitalisés et de cas décédés par infections d'origine alimentaire en France métropolitaine dans les années 1990. Source : [InVS 2004].

Nous utilisons ces données pour estimer l'impact des conséquences sanitaires associées aux infections à *E. coli*, *Listeria monocytogenes* et *S. Aureus* sur le bien-être dans le scénario de

¹DGCCRF : Direction Générale de la Concurrence, de la Consommation et de la Répression des Fraudes

²Ces estimations sont basées sur des données issues des systèmes de surveillance sanitaire nationaux, en corrigeant pour les sous-notifications (personnes ayant souffert d'intoxications mais ne s'étant pas soignées chez un médecin ou en hôpital, oublis de reporting dans les établissements de santé, etc.) et en confrontant aux données de pays étrangers.

référence (réfrigérateurs « standards »). Malgré une éventuelle évolution des risques depuis les années 1990, le choix de cette période comme référence permet de poser sereinement l'hypothèse qu'aucun réfrigérateur ne comportait alors de nano-argent. Un second intérêt de ces chiffres tient à leur caractère pluriannuel, ce qui permet de tenir compte d'éventuels épisodes épidémiques rares afin d'obtenir une valeur annuelle moyenne.

2.2 Mécanisme d'action du nano-argent

Le nano-argent est incorporé aux réfrigérateurs de deux manières différentes. Le plus souvent, un revêtement contenant des nanoparticules d'argent couvre l'espace intérieur du réfrigérateur. Le revêtement peut entrer en contact avec la nourriture, l'utilisateur ou les contaminants en suspension dans l'air. Un deuxième mode d'intégration du nano-argent est en partie emprunté aux technologies appliquées aux climatiseurs. Avec des nanoparticules intégrées aux filtres de l'unité désodorisante et/ou du distributeur d'eau de l'appareil, le nano-argent est destiné à nettoyer l'air circulant à l'intérieur du réfrigérateur et l'eau du distributeur.

Le brevet de Daewoo pour ses « réfrigérateurs avec un boîtier interne contenant des nanoparticules d'argent » définit les effets antibactériens de la manière suivante : Lorsque les ions Ag^+ sont absorbés dans les cellules de virus, bactéries, champignons et assimilés, les ions argent entravent la croissance de l'enzyme requise pour la respiration cellulaire, ce qui les détruit par conséquent. Par ailleurs, les ions argent inhibent le métabolisme des bactéries et mettent ainsi fin à leur reproduction (Office européen des brevets, 2007). Par ailleurs, [Kampmann et al. 2008] détermine que la fixation de l'argent sur les bactéries inhibe les protéines, provoque le détachement de la paroi cellulaire, la condensation de l'ADN et mène à la destruction de la bactérie.

L'action antibactérienne et antimicrobienne des nanoparticules d'argent est similaire à celles des particules de métal d'argent de plus gros volumes. Cependant, les ions Ag^+ qui se dispersent et agissent donc comme antimicrobiens sont ceux qui se trouvent à la surface des particules. La taille nano des particules garantit une plus grande surface de métal en contact avec l'extérieur par masse d'argent, et donc une meilleure capacité de dispersion (solubilité en contact avec les molécules d'eau notamment) [Height 2009]. En règle générale, le taux de dispersion définit la durabilité des particules d'argent, et donc les niveaux de dosages requis pour garantir une durabilité donnée. La figure 2.1 classe les additifs argent antimicrobiens en fonction de la dispersion des ions (axe des ordonnées) et de la quantité d'argent requise dans l'utilisation finale (axe des ordonnées). Le nano-argent constitue selon ce schéma la technologie la plus « durable » car nécessitant une moins grande quantité d'argent que les antimicrobiens qui rejettent moins d'ions Ag^+ (à gauche sur la figure 2.1) ainsi qu'une plus faible quantité d'argent sur sa durée de vie comparé à des produits rejetant de plus fortes quantités d'ions Ag^+ (à gauche sur la figure 2.1).

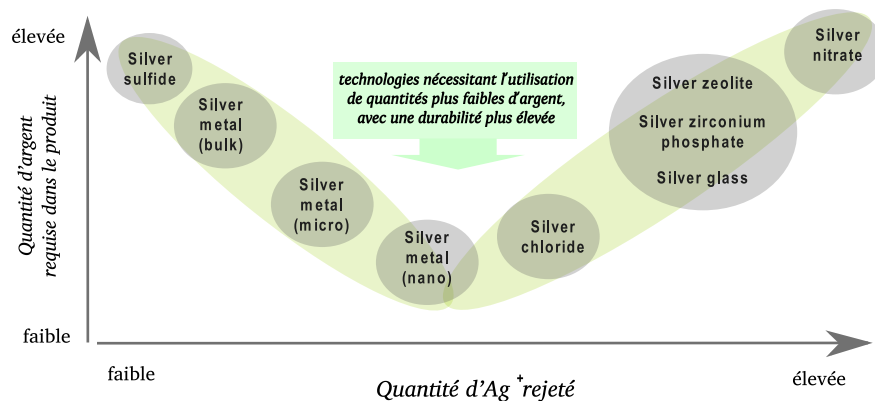


FIG. 2.1 – Quantité requise d'additif argent antimicrobien en fonction de la dispersion des ions, d'après [Height 2009]

2.3 Effets toxicologiques associés au nano-argent

La figure 2.1 a été présentée lors d'une consultation ouverte à l'agence de protection de l'environnement des États-Unis (US EPA)³ par M. J. Height au nom du Silver Nanotechnology Working Group (SNWG)⁴. Le schéma illustre le nano-argent comme une « technologie soutenable », mais montre également que le nano-argent induit un relargage plus soutenu d'ions Ag^+ que l'argent conventionnel. Une fois relarguées dans l'environnement, les nanoparticules se comportent généralement de la manière suivante :

relargage d'ions Ag^+

1. elles restent en suspension comme particules individuelles ;
2. elles forment des « clusters » avec d'autres particules ;
3. se dissolvent dans un liquide ;
4. subissent une transformation chimique au contact de matière organique ou autre [Luoma 2008].

Le risque toxicologique potentiel émane du relargage des ions et/ou nanoparticules d'argent, mais pas seulement. Sur le modèle des travaux entrepris par la US EPA sur le nano-argent appliqué aux sprays désinfectants [US EPA 2010], les effets peuvent être appréhendés via une approche par cycle de vie. L'analyse du cycle de vie permet de quantifier les impacts d'un produit, depuis l'extraction des matières premières qui le composent jusqu'à son élimination en fin de vie, en passant par les phases de production, de distribution et d'utilisation, soit « du berceau à la tombe ».

cycle de vie

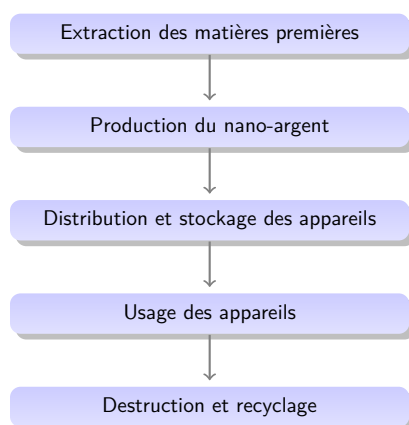


FIG. 2.2 – Les étapes du cycle de vie des réfrigérateurs analysés

Extraction ou récupération de matières premières. L'extraction (et la récupération) d'argent conventionnel destiné à la production de nano-argent est estimée à hauteur de 500 à 1230 tonnes par an, au niveau mondial [Mueller et Nowack 2008]. Une démarche approfondie en cycle de vie nécessiterait que l'on tienne compte du risque associé aux procédés de minage par exemple. Ce dernier induit des risques d'accident du travail, ou encore des problématiques environnementales, relatives notamment à la gangue (minerai sans valeur récupéré lors du minage de l'argent⁵) laissée en vrac sur les sites de minage [Johnson et al. 2005].

accidents dans les mines

En comparaison avec l'argent conventionnel, le nano-argent a pour spécificité d'être employé dans les produits finaux en **faibles quantités**. Étant donné le périmètre de notre étude, le calcul du risque que l'on peut associer à chaque appareil équipé de nano-argent est très faible. Cela semble suffisant pour choisir d'ignorer le risque inhérent à l'extraction ou autres modes de récupération de l'argent conventionnel. Mais un autre type d'argument peut être avancé pour intégrer les impacts potentiels sans nécessairement les estimer au cas par cas :

De très faibles quantités d'argent sont utilisées pour chaque réfrigérateur

Il est en effet souvent avancé que les risques de maladie et d'accident du travail sont intégrés via des **primes de risques** dans les salaires [Viscusi 1998]. On peut alors penser que ces risques

risques intégrées dans le coût d'achat

³US EPA : United States Environmental Protection Agency

⁴Le SNWG est un groupe de travail faisant partie de l'association internationale « Silver Institute » regroupant mineurs, raffineurs et fabricants d'argent.

⁵Plomb, cadmium et zinc par exemple, selon Bernard Fontaine [Nanoforum 2009].

sont au moins partiellement répercutés par les producteurs sur le **prix des produits finis**. D'autre part, si le secteur de la production est régulé de telle sorte à ce que la réhabilitation des sites miniers soit financée par les producteurs d'argent, le risque environnemental associé à l'extraction pourrait aussi être répercuté sur le prix du produit fini. Cependant, on peut *a priori* émettre quelques doutes quant au niveau de régulation des secteurs miniers de certains pays producteurs d'argent (Pérou, Chine, *etc.*).

Production de nano-argent. De multiples procédés de fabrication existent. [Park et al. 2009] ont caractérisé les nanoparticules d'argent en suspension dans une usine coréenne d'une capacité de production de 3 tonnes de nanoparticules par mois. La fabrication de nano-argent procède en quatre étapes : la réduction chimique de l' $AgNO_3$, la filtration, le séchage, et le broyage. L'étude indique la concentration de nanoparticules en suspension la plus élevée après la phase de réaction. Elle montre également que du nano-argent est relargué et se dépose sur le sol et d'autres surfaces à la fin de chaque étape de fabrication.

Quant aux effets des nanoparticules d'argent sur la **santé des travailleurs**, ils demeurent peu connus. Certaines études qui ont servi de références pour la mise en place de la réglementation actuelle sur l'argent conventionnel remontent aux années 1930. Le SNWG met en avant le fait que l'une de ces études [Gaul et Staud 1935] établissait les risques pour des colloïdes à usage médical Argyrol et Collargol, répondant au critère de taille du nano-argent (35 nm et 10–20 nm respectivement). L'impact le plus connu de l'argent conventionnel ingéré sous forme de poussières—lors de la fabrication du nano-argent par exemple—ou sous forme colloïdale est l'*argyrie* ou l'*argyrose* lorsque l'affection concerne les yeux.

argyrie

L'argyrie

Définition

L'argyrie (ou *argyrie*) est une affection provoquée par l'ingestion de l'élément argent, sous forme de poussière d'argent métal ou de composés d'argent. Le symptôme le plus frappant de l'argyrie est la coloration de la peau qui prend une teinte gris-ardoise, gris brun ou bleutée sur les parties découvertes. L'argyrie peut se présenter comme un argyrie généralisé ou un argyrie local. L'*argyrose* est une affection analogue qui atteint l'œil.

fabrication des filtres

Hormis la fabrication du nano-argent évoquée jusqu'ici, on peut également tenir compte de l'incorporation des nanoparticules d'argent aux réfrigérateurs (sous forme de revêtement ou sous forme de filtres). Cependant, on peut raisonnablement considérer le risque associé à cette dernière—sur laquelle on ne dispose par ailleurs pas de données spécifiques—comme mineur comparativement à celui de la première phase. De plus, si tant est qu'elles existent, les données relatives à l'exposition des travailleurs durant la fabrication des revêtements (et filtres) spécifiques aux réfrigérateurs « nano » ne sont pas disponibles.

Distribution et stockage des appareils. La caractéristique « nano » des réfrigérateurs n'induit *a priori* pas ou peu de risque durant la distribution et le stockage des appareils. Les modèles d'exposition peuvent éventuellement relarguer des nanoparticules et/ou ions argent, mais dans des proportions sans doute peu préoccupantes. Pour comparaison, dans les travaux de l'EPA sur les sprays désinfectants, il est question de risques associés à la dégradation du conditionnement durant le transport ou aux points de vente conduisant à des fuites de bouteille de spray [US EPA 2010]. Ces considérations ne sont pas transposables aux réfrigérateurs.

Usage des appareils. Dans le cas de nanoparticules d'argent appliquées aux revêtements des réfrigérateurs, le risque provient essentiellement de l'ingestion des particules et du contact avec la peau [Wijnhoven et al. 2009]. Des études, sur les rats notamment, ont démontré que les nanoparticules d'argent peuvent engendrer des effets sur le système nerveux, le foie, le rein et le système urinaire, le système cardiovasculaire, les plaquettes sanguines, ainsi que sur l'épiderme (pour plus de détails, voir [US EPA 2010, Appendix C]). Notons néanmoins que les quantités de nanoparticules administrées lors de ce type d'études sont relativement élevées.

santé des utilisateurs

Les effets sur l'homme n'ont été abordés jusqu'ici que dans certains cas bien spécifiques, tel que l'application de pansements avec nano-argent sur un individu souffrant de brûlures sur 30% de son corps suite à un accident. Au bout de six jours de traitement, le patient souffrait d'une décoloration de la peau de type argyrie, d'un manque d'énergie, d'une perte d'appétit, un taux élevé d'enzymes du foie, un léger grossissement du foie et de la rate, et un impact sur les fonctions rénales. Ces symptômes ont été rapidement traités et, 10 mois plus tard, la

concentration d'argent dans le sang et l'urine du patient était revenue à la normale [Trop et al. 2006]. Cette étude de cas n'est pas transposable aux réfrigérateurs.

[Christensen et al. 2010] se sont penchés sur la faisabilité d'une évaluation du risque sur la santé humaine associé au nano-argent, et ont conclu que l'on peut s'attendre à ce que le foie soit l'organe cible majeur de la toxicité systémique du nano-argent. Une estimation de cet impact en termes d'augmentation du risque de cirrhose est proposée en §4.2.

Destruction et recyclage. Le risque en fin de cycle de vie dépend du traitement réservé pour les déchets ménagers tels que les réfrigérateurs. L'incinération peut libérer des ions Ag^+ dans l'air, l'élimination en décharge permet au nano-argent de pénétrer dans les sols, et le recyclage renvoie le produit vers le début du cycle, ce qui induit à nouveau des risques de contact du nano-argent avec les travailleurs et les consommateurs.

Une prévision des concentrations du nano-argent dans l'air, l'eau et le sol a été réalisée pour le territoire suisse [Mueller et Nowack 2008], basée sur des hypothèses simples et une analyse des émissions et transferts de substances. Les flux de relargage de nano-argent ont été identifiés pour chacune des catégories de produits présentées dans le tableau 2.2. Les flux de relargage correspondent à l'ensemble du cycle de vie des produits.

Catégorie de produit	Proportion (%)	Origine du rejet	%	Rejet
Textiles	10	abrasion pendant l'usage	5	air
		abrasion pendant nettoyage	5	stations d'épuration
Cosmétiques	25	application	95	stations d'épuration
		destruction	5	incinérateurs
Sprays et nettoyage	15	application	95	air (10%), stations d'épuration (85%), sols (5%)
Produits métalliques	5	abrasion	5	incinérateurs
		recyclage	47,5	quittant le système
		destruction	2,5	incinérateurs
Plastiques	10	abrasion	5	stations d'épuration
		destruction	50	incinérateurs
		dissolution	45	quittant le système
Peintures	35	eaux usées	5	sols (50%), stations d'épuration (50%)
		dissolution	45	quittant le système
		destruction	50	site de gestion des déchets

TAB. 2.2 – Analyse du relargage de nano-argent, par type de produit. Source : [Mueller et Nowack 2008]⁷

Les revêtements intérieurs et les clayettes des réfrigérateurs sont généralement en plastique, ce qui suggère que les réfrigérateurs appartiennent à la catégorie de produits « plastiques »⁷. Selon les chiffres du tableau 2.2, celle-ci concentre 10% de la production de nano-argent. Le relargage de nanoparticules et/ou d'ions Ag^+ de cette catégorie se fait :

1. par abrasion (5%), lors des lavages par exemple, les nanoparticules sont relarguées en direction des stations d'épuration ;
2. par destruction du produit (50%), par incinération des déchets dans le cas de la Suisse, selon [Mueller et Nowack 2008];
3. par dissolution (45%), où le nano-argent quitte le système initial, au contact du milieu biologique d'un réfrigérateur par exemple (aliments, humidité).

Ce descriptif des origines de rejet de nanoparticules d'argent dans les différentes phases du cycle de vie d'un réfrigérateur domestique permet une description exhaustive des sources de rejet. Toutefois, compte-tenu de l'absence de données détaillées sur les rejets correspondant à

⁷Élément confirmé par la description du produit SARPU®-MB sur www.ec21.com

chaque phase du cycle, nous avons préféré estimer les impacts de ces rejets en les regroupant en trois classes d'impact :

1. les **effets toxiques sur la santé des usagers** sont estimés dans la §4.2, au travers l'impact éventuel des nano-particules d'argent sur le foie ;
2. les **effets toxiques sur la santé des travailleurs** impliqués dans l'extraction d'argent, la production de revêtements antibactériens et leur intégration aux réfrigérateurs est supposée intégrée au coût d'achat de la technologie (selon les hypothèses formulées ci-dessus). Ce surcoût d'achat est estimé dans le chapitre 5.
3. les effets **écotoxicologies globaux** du relargage de nanoargent (dans l'air et les cours d'eau) sont supposés négligeables, compte-tenu de la très faible masse de nanoargent présent dans chaque réfrigérateur [Mueller et Nowack 2008].

2.4 Identification des conséquences de chaque scénario

En résumé, on centre l'analyse dans le scénario de référence sur le risque de morbidité et mortalité dues aux infections bactériennes (figure 2.3, ligne du haut). Dans le scénario alternatif, les mêmes aliments conservés dans les réfrigérateurs « nano » produisent moins de bactéries grâce au nano-argent, le risque d'infection alimentaire est plus faible et ses conséquences moins probables. Cet impact bénéfique a deux contreparties : le nano-argent se disperse via l'air, l'eau et les surfaces de contact pour se déposer sur la peau, entrer dans les voies respiratoires et éventuellement le système digestif des individus via les aliments consommés ; son incorporation dans l'appareil est coûteux.

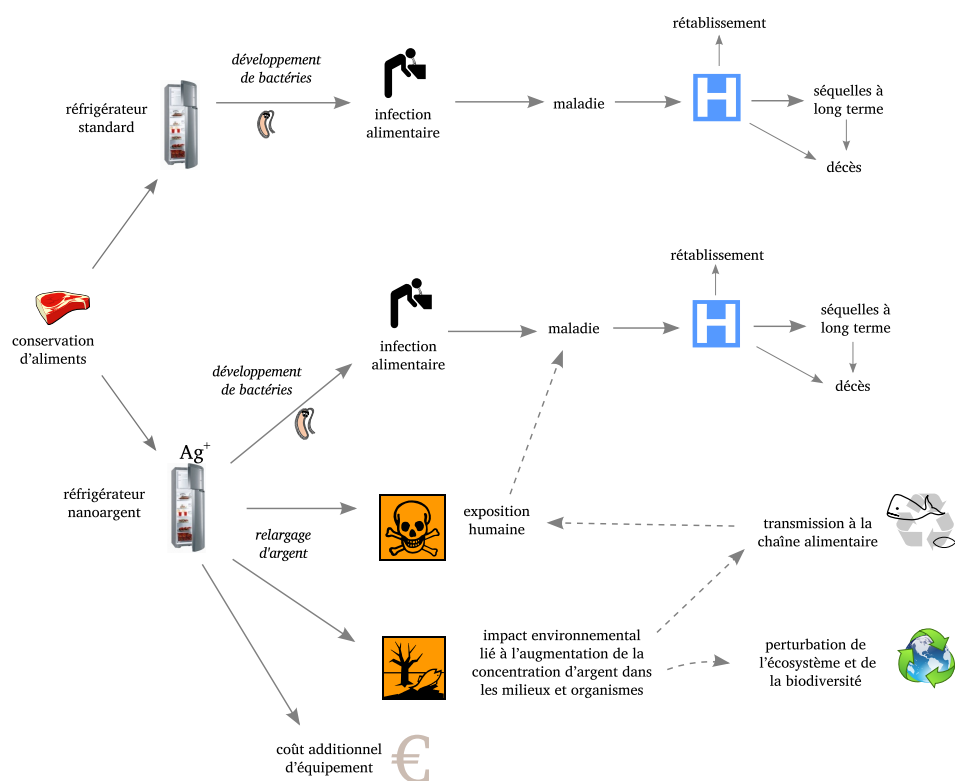


FIG. 2.3 – Identification des conséquences potentielles dans chaque scénario. Les flèches en pointillés sont des effets non avérés avec certitude dans la littérature actuelle.

Bénéfice sanitaire des nanoparticules d'argent

Dans ce chapitre, on évalue les risques de morbidité et de mortalité associés aux trois bactéries retenues (*E. coli*, *S. aureus*, *Listeria monocytogenes*) dans la situation où un ménage français dispose d'un réfrigérateur dit « standard » (scénario de référence). On convertit ensuite le risque et ses conséquences potentielles moyennes en unité monétaire. Enfin, on caractérise l'impact des nanoparticules d'argent sur le risque lorsque le ménage français s'équipe d'un réfrigérateur « nano » (scénario alternatif). Dans une optique de transparence et de clarté, les hypothèses sont posées au fur et à mesure. Le détail des calculs est présenté dans l'Annexe A.

3.1 Délimitation du risque et définition du ménage « moyen »

Comme l'indiquent le périmètre de l'étude (§ 1.2) et la figure 2.3 présentant les conséquences étudiées dans chaque scénario, on s'intéresse au titre de l'ACB au risque relatif aux aliments réfrigérés à domicile. Il est donc essentiel de définir en premier lieu quelle part du risque d'infection bactérienne peut être attribuée à la réfrigération chez le particulier, et non en restauration dite « professionnelle » ou collective. On s'intéresse ensuite à la part des ménages qui, équipés d'un réfrigérateur, seraient concernés par la réduction de risque.

3.1.1 Risque imputable aux réfrigérateurs des particuliers

Nous employons les données de l'InVS (tableau 2.1) en supposant, par simplification, que tous les cas d'infections bactériennes d'origine alimentaire sont causés par des aliments stockés dans un réfrigérateur. Deux raisons à cela : les réfrigérateurs sont le lieu de stockage privilégié pour la nourriture facilement périssable à température ambiante ; la quasi-totalité des ménages français en sont équipés.

On a établi plus haut que le risque associé à la conservation d'aliments au réfrigérateur est prédominant chez les particuliers, puisque les professionnels respectent généralement des normes d'hygiène strictes, ce qui réduit fortement le risque. Sur la base de données de l'InVS concernant le suivi des déclarations de toxi-infections alimentaires collectives¹, on pose une hypothèse basse et une hypothèse haute de risque imputable aux réfrigérateurs des particuliers :

- ▷ Hypothèse basse : 30% des infections bactériennes sont véhiculées par des aliments conservés dans les réfrigérateurs des particuliers.
- ▷ Hypothèse haute : 70% des infections bactériennes sont véhiculées par des aliments conservés dans les réfrigérateurs des particuliers.

Ces hypothèses de travail sont intégrées dans les estimations d'incidence pour le scénario de référence (§3.2).

¹Les toxi-infections alimentaires collectives se définissent par l'apparition d'au moins 2 cas similaires d'une symptomatologie en général gastro-intestinale, dont on peut rapporter la cause à une même origine alimentaire. Ces maladies sont surveillées grâce aux déclarations obligatoires auprès des Ddass ou DDSV (cf. http://www.invs.sante.fr/surveillance/tiac/am_tiac.htm).

3.1.2 Définition du ménage français « moyen » équipé d'un réfrigérateur

En vue des quantifications réalisées dans les sections suivantes, on pose l'hypothèse que le risque sanitaire encouru par le ménage « moyen » équivaut au risque individuel moyen, calculé à partir des statistiques nationales d'infections bactériennes de l'InVS (tableau 2.1), multiplié par le nombre de personnes dans le ménage. L'objectif de cette section est de définir le nombre de personnes constituant le ménage type français équipé d'un réfrigérateur.

Sur la base des tendances d'équipement observées entre 2004 et 2007 (tableau 3.1), on suppose que 99% des ménages français disposaient d'un réfrigérateur en 1999. Pour une meilleure cohésion avec les données employées pour quantifier l'impact sanitaire des bactéries, on suppose que ce chiffre correspond à la situation de 2009.

Année	Personnes vivant seules	Familles monoparentales	Couples sans enfants	Couples avec au moins un enfant	Autres types de ménage	Ensemble
2007	99,4	99,4	100,0	100,0	100,0	99,8
2006	99,1	99,3	99,9	99,9	99,1	99,6
2005	99,0	100,0	100,0	99,9	99,2	99,7
2004	98,4	99,9	99,9	100,0	100,0	99,4

TAB. 3.1 – Proportion de la population équipée d'un réfrigérateur (population française entre 2004 et 2007).
Source : INED & INSEE (2007)

Sur 57,2 millions d'habitants et 23,8 millions de ménages en France en 1999, 56,6 millions d'individus disposaient d'un réfrigérateur. Étant donnés les chiffres du tableau 3.1, on suppose par simplification que tous les ménages non équipés d'un réfrigérateur sont composés d'une seule personne. En supposant que 600 000 personnes vivant seules n'étaient pas équipées, on obtient le ratio suivant pour l'année 1999 :

$$\frac{\text{Habitants équipés d'un réfrigérateur}}{\text{Ménages équipés d'un réfrigérateur}} = \frac{56,62}{(23,8 - 0,6)} = 2,436 \text{ personnes par ménage équipé}$$

On suppose que ce ratio était similaire en 2009, de même que la répartition des ménages. On tient cependant compte de l'accroissement global de la population.

3.2 Impact des infections alimentaires sur la santé

L'impact des maladies bactériennes sur la santé est quantifié en DALYs (*Disability-Adjusted Life Years*, ou années de vie ajustées sur le handicap) dans [Havelaar et al. 2004] pour *E. coli* et [Haagsma et al. 2006] pour *S. aureus* et *Listeria monocytogenes*.

Les DALY

Définition

Le DALY est une mesure de l'impact d'une maladie en fonction de **degrés de sévérité** (ou de handicap) et de la durée des effets, intégrant également les effets de mortalité. Un DALY est le nombre d'années « perdues » à cause d'un mauvais état de santé, un handicap ou une mortalité précoce ; il s'agit donc d'un indicateur permettant d'intégrer des effets de morbidité et de mortalité en une mesure unique.

$$\text{DALY} = \text{YLD} + \text{YLL}$$

“Years Lost to Disability”, ou années ajustées sur le handicap
“Years of Life Lost”, ou années de vie perdues

Cette unité composite de mesure est préconisée par l'Organisation Mondiale de la Santé dans la mise en œuvre d'évaluations socio-économiques, notamment sous forme d'analyses coût-efficacité. Ces dernières visent à classer diverses options, réglementaires ou autres, en fonction

du rapport entre leur coût et leur résultat estimé en termes d'unités de l'indicateur d'efficacité choisi, les DALYs par exemple. Une évaluation de ce type a été réalisée par l'Institut national hollandais pour la santé publique et l'environnement (RIVM) sur le contrôle de *Campylobacter* aux Pays-Bas [Havelaar et al. 2005].

Ici, les niveaux de handicap choisis pour chaque bactérie et niveau de sévérité correspondent aux valeurs moyennes employées dans les travaux du RIVM [Havelaar et al. 2004; Haagsma et al. 2006] (tableau 3.2). Les degrés de sévérité des insuffisances rénales chroniques (IRC) et autres séquelles à long terme sont supérieurs à 1 YLD par cas dans la mesure où le handicap dure plusieurs années.

Bactérie considérée, et niveau de sévérité	Degrés de handicap (YLD/cas)
<i>Escherichia Coli</i>	
Diarrhées (sanglantes ou non)	0,003
Syndrome hémolytique et urémique (SHU)	0,046
Insuffisances rénales chroniques (IRC)	8,346
<i>Staphylococcus Aureus</i>	
Diarrhées	0,015
Hospitalisation	0,041
<i>Listeria monocytogenes</i>	
Méningite, septicémie, pneumonie	0,081
Séquelles à long terme : cas non périnataux	2,500
Séquelles à long terme : cas périnataux	16,67

TAB. 3.2 – Degrés de handicap (YLD/cas) en fonction de la gravité des symptômes². Sources : [Haagsma et al. 2006] pour *S. aureus* et *L. monocytogenes*; [Havelaar et al. 2004] pour *E. coli*.

Les effets de mortalité calculés en YLL sont dépendants de l'âge des individus. Cela diffère d'une approche privilégiée en ACB qui consiste à utiliser une *valeur statistique de la vie humaine* (*Value for Statistical Life*, VSL)—calculée sur la base des consentements à payer des individus pour une réduction marginale du risque de mortalité—fixe pour l'ensemble de la population. Seuls les effets de morbidité seront donc quantifiés en DALYs (mesurés en YLD).

Le tableau 3.3 présente pour le scénario de référence l'impact moyen en YLD par individu en termes de réduction de bien-être pour chaque niveau de sévérité de maladie bactérienne, et ce en comparaison à un scénario implicite hypothétique où il n'y a aucune infection bactérienne. Les bornes basses et hautes des estimations tiennent compte des fourchettes fournies par l'InVS [InVS 2004] et de l'hypothèse de risque imputable aux réfrigérateurs des particuliers. L'impact de cette dernière équivaut à une réduction des incidences de la borne basse de 30%. Par ailleurs, plusieurs ajustements ont été nécessaires pour compiler ces résultats :

Les études de [Havelaar et al. 2004] et [Haagsma et al. 2006] portent sur le cas néerlandais. On suppose que les impacts d'*E. coli*, *S. aureus* et *Listeria monocytogenes* sur la santé sont identiques en France et aux Pays-Bas à niveau de sévérité équivalent.

La surveillance d'*E. coli* en France n'intègre que les populations de moins de 16 ans. L'incidence présentée dans le tableau §2.1 est ajustée dans le tableau 3.3 ci-dessous pour tenir compte de l'ensemble de la population. Cette estimation est réalisée sur la base des chiffres néerlandais et selon l'hypothèse que, en proportion aux individus de moins de 16 ans, les effets d'*E. coli* sur le reste de la population sont les mêmes en France et aux Pays-Bas.

Deux hypothèses supplémentaires permettent de croiser les chiffres pour la France [InVS 2004] et la Hollande [Haagsma et al. 2006; Havelaar et al. 2004]:

- ▷ on suppose identique en France et aux Pays-Bas la distribution des maladies (méningite, septicémie, pneumonie) associées aux cas de listériose.

²[Havelaar et al. 2004] n'intègrent pas de taux d'escompte dans le calcul des YLD associés à *E. Coli*, tandis que [Haagsma et al. 2006] proposent 2 scénarios pour *S. aureus* et *L. monocytogenes*, un scénario sans taux d'escompte et un scénario avec un taux d'escompte de 4%. Pour maintenir une cohérence entre les données, on choisit de ne pas intégrer de taux d'escompte, pour aucune bactérie.

- ▷ on suppose identique en France et aux Pays-Bas la proportion de séquelles à long terme statistiquement développées suite à un syndrome hémolytique et urémique (SHU) associé à *E. coli* d'une part, et suite à une hospitalisation associée à une listériose d'autre part.

Les séquelles à long terme associées aux SHU prennent la forme d'insuffisances rénales chroniques (IRC). Quant aux séquelles subies suite à une infection à *Listeria monocytogenes*, elles sont généralement dues aux cas de méningites associées à la listériose, et peuvent se traduire par des troubles d'ordre neurologique. La durée et donc l'incidence sur la santé des effets de long terme est différente selon l'âge de l'individu. [Haagsma et al. 2006] dissocient les listérioses périnatales et les listérioses acquises, et quantifient les effets en DALYs séparément. Les chiffres de l'InVS [InVS 2004] permettent d'opérer cette distinction. Les cas materno-néonataux comptent pour 24% des cas d'hospitalisation en moyenne selon les données des années 1997, 1999 et 2000.

Bactérie considérée, et niveau de sévérité	Impact négatif sur la santé (YLD moyen par individu)	
	-	+
<i>Esherichia Coli</i>		
Diarrhées (sanglantes ou non)	3,58E-8	1,02E-7
Syndrome hémolytique et urémique (SHU)	2,99E-8	4,27E-8
Insuffisances rénales chroniques (IRC)	6,78E-7	8,75E-7
Total	6,78E-7	1,02E-6
<i>Staphylococcus Aureus</i>		
Diarrhées	5,98E-7	2,73E-6
Hospitalisation	2,99E-7	1,37E-6
Total	8,97E-7	4,10E-6
<i>Listeria monocytogenes</i>		
Méningite, septicémie, pneumonie	2,24E-7	3,2E-7
Séquelles à long terme : cas non périnataux	3,84E-7	5,48E-7
Séquelles à long terme : cas périnataux	7,99E-7	1,14E-6
Total	1,41E-6	2,01E-6
Total	2,98E-6	7,13E-6

TAB. 3.3 – Impact annuel sur la santé, exprimé en DALY moyen par individu, des effets non mortels associés aux bactéries *E. coli*, *S. aureus* et *L. monocytogenes* (scénario de référence)

Les cas de mortalité n'apparaissent pas dans ce tableau dans la mesure où on a choisi de ne pas mesurer son impact en termes de DALY. Se référer à l'annexe A pour le détail des calculs réalisés.

3.3 Monétisation

Afin de monétiser les **effets non mortels** sur la santé, on choisit une valeur de 100 000€ par QALY³. Il s'agit d'une valeur moyenne basée sur la littérature et en cohérence avec la *valeur statistique de la vie humaine* (VSL) choisie plus bas pour monétiser les effets de mortalité. Elle est environ à mi-chemin entre les valeurs utilisées par l'Institut NICE en Angleterre qui recommande d'utiliser pour les services médicaux une valeur critique autour de 30 000€ par QALY ; et celles reportées dans [Hirth et al. 2000], estimées autour de \$250 000 par QALY, et dans [Haninger et Hammitt 2006] qui observent des consentements à payer moyens pour réduire la probabilité d'infection alimentaire entre \$500 000 et \$1 million par QALY.

Il est à noter que l'approche consistant à attribuer une valeur monétaire unique par QALY est discutable, d'un point de vue théorique notamment : l'approche utilitariste de l'ACB mesure en unité monétaire le bien-être associé à la santé selon les préférences individuelles pour des

³QALYs (*Quality-adjusted life years*, ou années de vie ajustées pour la qualité) est une unité de mesure relativement proche aux DALYs. Nous faisons l'hypothèse qu'une réduction de 1 DALY équivaut à une hausse de 1 QALY.

« produits » de santé comparativement à d'autres biens, tandis que l'analyse coût-efficacité (ACE), dont la mesure en QALY fait partie intégrante, est centrée sur la **maximisation de la santé** et non du bien-être, et ne tient pas compte d'autres facteurs tels que les variations d'utilité marginale du revenu [Gyrd-Hansen 2005]. Nous choisissons néanmoins cette méthode parce que nous ne disposons pas d'informations directes sur le consentement à payer pour éviter ou réduire les risques relatifs à une infection alimentaire de type *E. coli*, *S. aureus* ou *Listeria monocytogenes*.

Nous monétisons les effets en termes de mortalité à l'aide de la *valeur statistique de la vie humaine* (VSL). La Commission européenne recommandait en 2001 de choisir une valeur haute de 2,5 millions d'euros par vie statistiquement épargnée (CE, 2001).

Les résultats de la monétisation sont indiqués par ménage, ce qui implique de multiplier les chiffres par individu par le ratio moyen de 2,436 (nombre d'individus par ménage équipé d'un réfrigérateur).

Bactérie considérée, et niveau de sévérité	Monétisation de l'impact sur la santé (€/ménage)	
	-	+
<i>Esherichia Coli</i>		
Diarrhées (sanglantes ou non)	-0,01	-0,02
Syndrome hémolytique et urémique (SHU)	-0,01	-0,01
Insuffisances rénales chroniques (IRC)	-0,15	-0,21
Mortalité	-0,17	-0,36
Total	-0,17	-0,36
<i>Staphylococcus Aureus</i>		
Diarrhées	-0,15	-0,67
Hospitalisation	-0,07	-0,33
Total	-0,22	-1,00
<i>Listeria monocytogenes</i>		
Méningite, septicémie, pneumonie	-0,05	-0,08
Séquelles à long terme : cas non périnataux	-0,09	-0,13
Séquelles à long terme : cas périnataux	-0,19	-0,28
Mortalité	-5,81	-8,31
Total	-6,16	-8,80
Total	-6,54	-10,15

TAB. 3.4 – Impact annuel sur la santé, en euros par ménage moyen, des effets associés aux bactéries *E. coli*, *S. aureus* et *L. monocytogenes* (scénario de référence)

Sur la base des hypothèses réalisées, le coût social lié aux conséquences d'infections à *E. Coli*, *S. Aureus* et *L. monocytogenes* relatives aux aliments réfrigérés à domicile (scénario de référence) peut être estimé entre 6,54 € et 10,15 € par ménage chaque année. On remarque notamment le poids de la mortalité due à *L. monocytogenes* dans le coût social estimé.

L'enjeu de la section suivante sera de déterminer quelle part de ce coût peut-être réduite du fait des propriétés antibactériennes du nano-argent.

3.4 Réduction du risque associée aux nanoparticules d'argent

Le nano-argent réduit la probabilité d'être infecté en inhibant le développement des bactéries. Cet effet est estimable sur la base de deux paramètres : l'efficacité du nano-argent lorsqu'il est

en contact avec les bactéries, et, de fait, la proportion des bactéries (pouvant potentiellement être ingérées) qui sont en contact avec le nano-argent.

[Kampmann et al. 2008] comparent la croissance de bactéries dans un réfrigérateur traité avec un additif antimicrobien (AlphaSan®) avec un réfrigérateur de référence sans revêtement. Des tests sur des aliments disposés sur des clayettes inoculées de *L. monocytogenes* et stockés durant 11 jours à 4°C ont mis en évidence une concentration bactérienne de l'ordre de 100 fois inférieure dans le réfrigérateur traité. L'ObservatoryNANO (2010) communique des chiffres du même ordre, estimant une efficacité à hauteur de 99%.

L'estimation du second paramètre, relatif au **contact entre nano-argent et aliments**, est plus délicate, dans la mesure où aucune étude n'évalue les comportements d'hygiène des individus avec une précision telle qui permette d'extrapoler ce que nous pourrions appeler un « indice d'hygiène ». De plus, l'efficacité de 99% est estimée sur les parties des aliments en contact avec les revêtements. Certains réfrigérateurs « nano » incorporent cependant des nanoparticules d'argent dans les filtres à air, ce qui permet également une réduction du risque associé aux aliments non couverts. Faute de données, on établit une hypothèse de travail déterminant la proportion des bactéries pouvant potentiellement être ingérées qui sont en contact avec le nano-argent, et ce en fonction du comportement d'hygiène moyen des ménages :

- ▷ Hypothèse basse : les ménages ont un comportement hygiénique relativement bon. Les aliments entreposés dans les réfrigérateurs sans précautions contribuent à 5% du risque d'infection bactérienne.
- ▷ Hypothèse haute : les ménages ont un comportement hygiénique relativement mauvais. Les aliments entreposés dans les réfrigérateurs sans précaution contribuent à 50% du risque d'infection bactérienne.

Selon cette hypothèse, l'efficacité du nano-argent dépend fortement des comportements des consommateurs. Si on suppose un comportement laxiste en matière d'hygiène de la part de l'ensemble de la population, l'effet du nano-argent s'en trouve accru (hypothèse haute).

D'après nos hypothèses, le nano-argent agit de manière homogène sur la probabilité d'occurrence de chaque type de conséquence associé à chacune des bactéries. Cela permet d'estimer directement la réduction de risque en unité monétaire, sur la base de l'impact calculé et monétisé dans les sections précédentes pour le scénario de référence. L'estimation de la hausse de bien-être due à l'effet antibactérien du nano-argent (tableau 3.5) est donc basée sur les résultats obtenus en §3.3, auxquels on a appliqué les ratios d'efficacité décrits ci-dessus. Les hypothèses basse et haute sont affectées respectivement sur les bornes inférieure et supérieure. On notera cependant que le fait de multiplier les bornes basses entre elles, et de faire de même pour les bornes hautes, est pénalisant sur les plages d'incertitudes. Un traitement plus sophistiqué de l'incertitude est fourni en §6.2.

Les résultats pour le scénario alternatif dépendent fortement de l'hypothèse relative aux comportements hygiéniques des ménages. L'impact antibactérien bénéfique du nano-argent a été évalué étant donnée une efficacité globale comprise entre 5 à 50% environ, ce qui correspond à un bénéfice social entre 32 cents et 5 euros par ménage chaque année.

Outre l'incidence d'une forte incertitude quant à l'indice d'efficacité du nano-argent (5 à 50% environ), le fait « d'additionner » les bornes basses entre elles et les bornes hautes entre elles également est pénalisant sur les plages d'incertitude, d'où l'écart que l'on peut constater entre la valeur basse et la valeur haute. Dans une perspective de comparaison des effets bénéfiques aux autres types d'effets associés au nano-argent, il apparaît intéressant d'établir une valeur centrale sur la base de modes de calculs identiques à ceux employés jusqu'ici.

L'emploi de valeurs moyennes pour chaque hypothèse réalisée—risque d'infection bactérienne imputable à 50% aux réfrigérateurs domestiques, au lieu de 30 à 70% ; taux de 27,5% de bactéries néfastes étant en contact avec du nano-argent, au lieu de 5 à 50%—et pour chaque donnée employée—nombre de cas d'infection, d'hospitalisation, *etc.* associés à chaque bactérie—conduit au résultat suivant :

Valeur centrale du bénéfice social annuel = 1,27 € par ménage

Bactérie considérée et niveau de sévérité	Impact Ag^+ sur la santé (€/ménage)	
	-	+
<i>Escherichia Coli</i>		
Diarrhées (sanglantes ou non)	0,0002	0,0086
Syndrome hémolytique et urémique (SHU)	0,0002	0,0036
Insuffisances rénales chroniques (IRC)	0,0032	0,0739
Mortalité	0,0000	0,0369
Total	0,0035	0,1231
<i>Staphylococcus Aureus</i>		
Diarrhées	0,0031	0,2307
Hospitalisation	0,0015	0,1154
Total	0,0046	0,3461
<i>Listeria monocytogenes</i>		
Méningite, septicémie, pneumonie	0,0012	0,0270
Séquelles à long terme : cas non périnataux	0,0020	0,0463
Séquelles à long terme : cas périnataux	0,0041	0,0964
Mortalité	0,1233	2,8781
Total	0,1306	3,0478
Total	0,14	3,52

TAB. 3.5 – Bénéfice social annuel, par ménage, dû aux propriétés antibactériennes du nano-argent sur *E. coli*, *S. aureus* et *L. monocytogenes* (scénario alternatif)

Coûts toxicologiques des nanoparticules d'argent

Il n'existe aucune étude de référence permettant de quantifier avec précision les risques toxicologiques associés au nano-argent. L'évaluation de ces risques fait partie des préoccupations actuelles des instances américaines et européennes à vocations de protection de l'environnement et de santé publique. L'autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA) et l'Agence française de sécurité sanitaire, de l'environnement et du travail (AFSSET) considèrent que les **données sont actuellement insuffisantes pour permettre d'estimer les risques**, et qu'elles ne permettent pas non plus de l'écarter [AFSSET 2010]. Le RIVM¹ a estimé par ailleurs que les données actuelles ne permettent pas un enregistrement du nano-argent sous le règlement-cadre REACH (enregistrement, évaluation et autorisation des substances chimiques) [Pronk et al. 2009]. L'Agence de protection de l'environnement des États-Unis (US EPA) a récemment diffusé une version préliminaire d'une étude de cas sur le nano-argent appliqué aux sprays désinfectants, présentant l'état actuel des données—et des lacunes—en vue d'en caractériser le risque toxicologique.

Les connaissances scientifiques sont aujourd'hui insuffisantes pour quantifier les risques de l'usage de nanoparticules d'argent dans les réfrigérateurs

Certaines études permettent néanmoins de se positionner, dans la limite des données disponibles, sur l'impact du nano-argent intégré aux réfrigérateurs en matière d'**écotoxicité** (§4.1). Quant à l'**impact sur la santé humaine**, on propose une quantification limitée à un type d'effets sur la base d'hypothèses de travail (§4.2).

4.1 Ecotoxicité

L'écotoxicité est évaluée à l'aide du ratio *PNEC/PEC* (*concentration prédite / seuil écotoxique*), soit la concentration dans le milieu par rapport au seuil de non dangerosité pour plusieurs espèces distinctes. Le fait que l'écosystème puisse être perturbé ou que la biodiversité se réduise n'est pas toujours pris en considération en analyse socioéconomique [Nanoforum 2009]. Le lien entre ces aspects peut s'illustrer par exemple avec l'effet de « terre brûlée », pouvant résulter de nano-argent bactéricide. La disparition supposée des bactéries entraînerait celle des sols vivants et des pousses de végétaux [Nanoforum 2009].

[Mueller et Nowack 2008] ont abordé l'écotoxicologie sur la base de données sur la toxicité bactérienne, et concluent que le nano-argent présente peu ou pas de risque pour les organismes du sol et les organismes aquatiques. Notons cependant que ces estimations sont réalisées avec l'hypothèse d'incinération totale des boues, puisqu'il n'y a vraisemblablement pas d'épandage des boues en Suisse. Ces résultats sont corroborés par une autre étude, qui estime que les concentrations en ions argent libres ne sont pas suffisantes dans la majorité des systèmes naturels pour affecter négativement l'environnement [Luoma 2008].

Les évaluations ont été réalisées pour l'argent ionique (ions Ag^+). [Mueller et Nowack 2008] précisent que les concentrations environnementales en nanoparticules d'argent sont bien plus élevées, de l'ordre de 20–40 mg/L en milieu aquatique [Yoona et al. 2007; Hussain et al. 2005], que celles des ions Ag^+ , estimées entre 0,0007–0,002 mg/L [Blasera et al. 2008]. L'effet toxique (en milieu aquatique) de l'argent sous forme ionique étant environ 10 000 fois supérieur à celui

¹RIVM : Institut néerlandais pour la santé et l'environnement

des nanoparticules, le relargage de ces dernières est de moindre importance [Mueller et Nowack 2008].

Malgré les nombreuses incertitudes présentes dans cette étude, on considère dans la présente étude que le risque d'écotoxicité est nul.

Cela est contestable, et on développera ici deux raisons. D'une part, les données de concentration employées sont limitées à un milieu. D'autre part, elles sont estimées pour la production actuelle de nano-argent. Or les produits récents ayant de longues durées de vie, tels les réfrigérateurs en l'occurrence, ont à peine commencé à relarguer du nano-argent. Bien que de moindre importance pour notre étude, un autre critère d'ordre temporel peut entrer en jeu. Les estimations de concentration ont été réalisées pour la production actuelle et/ou passée, or la fabrication de nano-argent sera sans doute amenée à augmenter significativement. Ce dernier aspect importe peu ici étant donné la définition statique des scénarios, établis pour l'année 2009. La prise en compte de ces aspects tendrait à augmenter les concentrations prédites de nanoparticules et d'ions argent.

L'incertitude ne fonctionne pas à sens unique. Peut-être existe-t-il des plantes ayant la propriété de dépolluer les ions et nanoparticules d'argent, mais les connaissances actuelles ne permettent pas de les déterminer.

4.2 Toxicité pour l'homme

Comme indiqué plus haut, les données existantes ne permettent la quantification d'effets sur la santé humaine qu'à condition de poser des hypothèses de travail. Une première option consisterait à étudier la pathologie la plus connue résultant de l'exposition de travailleurs à l'argent conventionnel : l'*argyrie*, ou encore l'*argyrose*. Comme expliqué en §2.3, ces effets seraient imputables au nano-argent selon certaines études. Ils résultent cependant de fortes expositions et les études présentant les symptômes d'un nombre significatif de travailleurs datent pour certaines de plus de 20 ans, or les conditions de travail ont sensiblement évolué depuis.

Une autre possibilité consiste à estimer les effets potentiels sur l'organe considéré comme étant le plus sensible à la toxicité systémique du nano-argent : le foie [Christensen et al. 2010]. Ne disposant pas de données précises sur les effets potentiels des nanoparticules d'argent sur le foie, on teste ci-dessous des scénarios d'accroissement du risque sur la base de l'hypothèse qu'un usage prolongé de réfrigérateurs équipés de nano-argent peut conduire, via l'ingestion régulière de très faibles quantités de nano-argent, au développement de maladies du foie se manifestant par une cirrhose.

La cirrhose

Définition

La cirrhose est une manifestation courante des maladies affectant le foie. La cause est attribuable à l'alcool pour les trois quarts des cas, mais elle peut être secondaire à l'évolution d'une infection par le virus de l'hépatite C (VHC), ou encore associée la stéato-hépatite non alcoolique² dans de moindres proportions. Elle se traduit par une diminution des fonctions du foie (synthèse, épuration, sécrétion biliaire) et peut engendrer une tumeur particulièrement mortelle : le CHC (carcinome hépatocellulaire). La cirrhose passe d'un état dit compensé à décompensé lorsque celle-ci commence à présenter des manifestations fonctionnelles et un accroissement de signes d'hypertension portale.

La prévalence des cirrhoses en France était estimée en 2005 de 2 000 à 3 300 cas par million d'habitants [Naveau et al. 2005]. On teste deux scénarios de risques lors de l'usage prolongé de réfrigérateurs nano-argent :

1. Le nano-argent ingéré au long de l'usage du réfrigérateur induit un très faible risque de maladie du foie se manifestant par une cirrhose de 1 pour 1 million.
2. Le nano-argent ingéré au long de l'usage du réfrigérateur induit un risque de maladie du foie se manifestant par une cirrhose de 1 pour 10 000.

²Surcharge en graisse du foie, pouvant être la conséquence d'un surpoids et des conditions pathologiques qui s'y associent.

La quantification et la monétisation des impacts sont réalisées de manière similaire à la section §3.2 sur les impacts sanitaires associés aux bactéries.

Les effets non mortels associés à la cirrhose ont été estimés aux États-Unis d'Amérique à 61 000 DALY³ (ou YLD pour être précis) pour l'ensemble de la population masculine américaine en 1996 [McKenna et al. 2005]. Recoupée avec les chiffres des Centres américains de prévention et de contrôle des maladies (CDC) sur l'incidence de cirrhoses—soit 52 000 cas masculins en 1996—on peut estimer l'impact des effets non mortels à 1,17 DALY/cas moyen de cirrhose affectant un homme aux États-Unis.

Ces chiffres peuvent être transposés à la population française sur la base des deux hypothèses suivantes : l'impact du nano-argent est identique quel que soit le sexe et l'âge des individus ; et l'impact moyen d'une cirrhose aux États-Unis est identique à l'impact moyen d'une cirrhose en France. Ces hypothèses, bien que particulièrement discutables, pallient un manque de données, notamment sur l'estimation de l'impact des maladies du foie en termes de bien-être sur la population française. Les approximations qui en découlent ne posent cependant pas de réel problème étant donné le niveau général d'incertitude dans cette section.

Quant aux **effets mortels**, [Andersson et al. 2008] estiment que 40% des individus ayant une cirrhose compensée décèdent dans les 10 ans qui suivent le diagnostic de la maladie. On choisit d'extrapoler ce chiffre à l'ensemble des cirrhoses, dans la mesure où on considère les cas de cirrhose décompensée comme une complication de cirrhoses compensées. On suppose par simplification que ce chiffre correspond à la létalité au cours de la vie du malade, quitte à sous-estimer la probabilité de mortalité des individus. On peut également tester des taux de mortalité de 20 et 64%, correspondant aux bornes testées dans l'étude citée.

On a supposé plus haut que le risque est dû à un usage prolongé des réfrigérateurs. Un rapport publié à l'occasion du Grenelle de l'environnement [GrenelleEnv 2008] établit la **durée de vie moyenne des réfrigérateurs** et congélateurs domestiques à 14 ans. Dans l'optique d'une évaluation de l'impact annuel, on rectifie la formule ci-dessous afin de tenir compte de la durée de vie des appareils, en supposant une relation dose-effet linéaire.

$$\text{coût toxicologie (par ménage)} = n \times \frac{[(1 - m) \times YLD \times \tau \times r] + [m \times VSL \times r]}{d}$$

Avec

- ◇ m : taux de mortalité par cas de cirrhose (valeur centrale de 40%) ;
- ◇ YLD : impact non mortel en DALY (établi à 1,17) ;
- ◇ τ : taux de conversion DALY-dollars (100 000) ;
- ◇ VSL : valeur statistique d'une vie humaine (2,5 M€) ;
- ◇ r : risque de maladie du foie se manifestant par une cirrhose (respectivement 10^{-6} et 10^{-4} dans les scénarios testés) ;
- ◇ d : durée de vie d'un réfrigérateur (14 ans) ;
- ◇ n : nombre d'individus par ménage équipé d'un réfrigérateur (estimé à 2,436 dans §3.1.2).

4.3 Quantification de la toxicité humaine

Sur la base des données et hypothèses établies, on évalue le coût toxicologique annuel associé au risque de maladie du foie à 0,19€ par ménage (0,10 à 0,29€ pour des taux de mortalité respectifs de 20 et 64%) dans le scénario 1 (risque très faible) et à 19€ environ par ménage (10 à 29€ environ) dans le scénario 2 (risque modéré).

Les niveaux de risque testés sont certes hypothétiques et arbitraires, les résultats obtenus montrent néanmoins que des niveaux d'incidence modérés d'un risque toxicologique spécifique à une phase du cycle de vie du produit (son usage), à un vecteur de transmission (l'ingestion) et à un organe (le foie) peuvent peser lourd dans les coûts d'une technologie. Un coût toxicologique sur la santé humaine de 10 à 29 € en l'occurrence suffirait à contrebalancer amplement les bénéfices antibactériens de la technologie nano-argent estimés dans la section précédente. Notons que l'emploi du conditionnel est essentiel étant donné le niveau d'incertitude dans la présente section.

Compte-tenu de l'absence de démonstration de causalité entre exposition aux nanoparticules d'argent aux faibles concentrations présentes dans un réfrigérateur et augmentation du risque

³Effets en DALY escomptés au taux de 3% par an.

de cirrhose, nous proposons dans le chapitre 6 deux estimations du bénéfice social net de la technologie nanoargent, l'une intégrant ce possible « coût toxicologique » et l'autre le supposant nul. La discussion en §6.4 souligne l'importance d'améliorer les connaissances scientifiques sur ce sujet.

Coût additionnel d'acquisition lié au nano-argent

Dans cette partie, nous cherchons à évaluer le coût relatif à l'utilisation de nano-argent dans les réfrigérateurs. En général, il est difficile, pour ne pas dire impossible, d'obtenir directement auprès des producteurs des informations précises sur les coûts additionnels associés à une nouvelle technologie. Cependant, les prix de vente observés sur les marchés reflètent l'équilibre entre la demande et l'offre d'un produit contenant cette technologie, et donnent donc des informations sur le coût de cette technologie pour les producteurs. L'objectif de cette section est de récupérer les informations pertinentes sur le coût de cette technologie à partir de l'observation du prix de vente des réfrigérateurs.

Notons qu'il n'est pas possible de déterminer directement le surcoût lié à la présence de nanoparticules d'argent dans les réfrigérateurs, puisqu'il n'existe pas sur le marché de modèles identiques en tous points sauf la présence ou non de cette technologie. La technologie nano-argent est aujourd'hui réservée aux modèles de haut de gamme, qui diffèrent des réfrigérateurs de volume équivalent par la présence de plusieurs options (modèles dits « américains », distributeur de glace, efficacité énergétique élevée, *etc.*). Il est donc nécessaire de déterminer quelle partie du coût plus élevé de ces réfrigérateurs de haut de gamme est imputable à la technologie nano-argent, et quelle partie aux autres fonctions. Dans la suite, nous utilisons la méthode des prix hédoniques [Rosen 1974] qui permet d'identifier économétriquement la part du coût attribuable à cette technologie. Les détails de la procédure d'estimation, et des données supplémentaires, sont présentées dans l'Annexe A.

5.1 Prix hédoniques

La méthode des prix hédoniques

Définition

Selon la démarche hédonique, un bien ou un service peut souvent être considéré comme un produit composite, formé d'un ensemble d'autres biens et services. Bien que les attributs (ou caractéristiques qualitatives) d'un bien ne soient pas vendus séparément, la méthode hédonique permet de définir un *prix implicite* pour chaque attribut qui forme le produit composite. L'usage de la méthode énoncée nécessite de supposer que les caractéristiques qualitatives sont homogènes. En résumé, [Triplet 2004] définit une fonction hédonique comme une relation statistique entre le prix de différentes variantes d'un produit et les caractéristiques de ce produit.

prix implicite

Les régressions hédoniques présentées plus bas sont effectuées sur le logiciel R (R Development Core Team, 2010).

 Applications de la méthode des prix hédoniques

La méthode est couramment appliquée au marché de l'immobilier, où elle permet par exemple d'estimer la valeur de la proximité d'une école primaire, ou encore au marché du travail où une prime de risque peut être évaluée (le consentement à recevoir des salariés pour accepter un travail où une prime de risque est supérieure à la moyenne des emplois de même type). L'ajustement des indices de prix à la consommation (IPC) à l'évolution de la qualité des produits (informatique, électroménager, etc.) représente également un thème de prédilection pour les modèles de régression hédonique. En la matière, les statistiques nationales américaines [Triplet et McDonald 1977; Shepler 2001], finlandaises [Kinnunen 1998] et néo-zélandaises [Nair 2004] se sont penchées sur la question pour le marché des réfrigérateurs et congélateurs.

Un cas d'application plus semblable au notre est celui de [Greening et al. 1997] où la méthode a été employée afin d'évaluer les effets des normes de performance énergétique sur le prix et les caractéristiques des réfrigérateurs américains.

5.2 Données

5.2.1 Délimitation du marché

En cohérence avec le périmètre de l'ACB, on choisit logiquement de se pencher sur le marché français, où plusieurs fabricants proposent un éventail de modèles comportant des spécifications nano-argent. Une seconde option consisterait à choisir un marché plus avancé dans l'application du nano-argent à l'électroménager, l'avantage étant de disposer d'une gamme plus large de produits équipés. Le marché américain répond à ce critère ; néanmoins, un manque de visibilité sur la mention « nano » compromet l'analyse. Deux causes peuvent être évoquées pour expliquer l'absence de mention explicite : L'EPA (U.S. Environmental Protection Agency) a considéré en 2007 que la laveuse à linge Samsung, recouverte de nanoparticules d'argent et relarguant une certaine quantité d'ions argent à chaque brassée devait être enregistrée comme un pesticide [IRSST 2010]. Malgré le caractère controversé de la décision, une prise de conscience dans l'opinion américaine du risque potentiel associé au nano-argent explique éventuellement la discrétion des fabricants. Une seconde raison de l'absence de la mention « nano » est peut-être imputable au non respect de certains seuils, notamment celui de la taille (100 nm) au dessus de laquelle une particule n'est pas considérée comme nano, ou encore l'éventuelle existence d'un seuil réglementaire de quantité de nanoparticules incorporées aux produits, sous lequel la mention ne peut être affichée.

Étant limité par une contrainte de temps, on ne peut pas recueillir de données pour l'ensemble du marché français des réfrigérateurs. On limite donc le périmètre de l'étude hédonique aux marques qui emploient la technologie nano-argent. Le choix des fabricants à intégrer à l'étude est donc basé sur l'inventaire disponible sur nanotechproject.org pour la catégorie du gros électroménager de cuisine. Cet inventaire liste 6 producteurs de réfrigérateurs. Nous retenons les producteurs dont au moins une partie des produits commercialisés en France intègrent des revêtements en nanoparticules d'argent, ce qui restreint l'échantillon à 3 fabricants : Daewoo, LG, Samsung.

On ne s'intéresse qu'aux revêtements antibactériens en nano-argent. Les technologies alternatives, notamment sous forme de filtres tel que le système *Honeycomb* chez Sharp, sont exclues du périmètre de l'étude car relativement rares sur le marché des réfrigérateurs. À l'inverse de Sharp, Haier YuHang™ communique très peu sur la nature de son système antibactérien et ne spécifie aucune marque déposée. Quant au sixième producteur inventorié par nanotechproject.org (Hitachi, Ltd), ses réfrigérateurs ne sont pas destinés au marché français.

Le panier de produits composé pour l'étude hédonique comprend la quasi-totalité des réfrigérateurs à deux portes (modèles *américains*, *2 portes* et *combinés*) Daewoo, LG et Samsung référencés dans les catalogues en ligne des sites français des fabricants. Le nombre de modèles de types *1*, *3* et *4 portes* et *mini bar / table top* est trop faible pour que ceux-ci soient pris en compte dans les régressions. Sont exclues également les références pour lesquelles le prix de marché n'a pu être observé, pour cause d'une trop forte rareté de l'offre, soit lorsque l'indice de rareté (inverse du nombre d'e-commerçant proposant le produit et dont l'offre est relayée par les sites comparateur de prix de référence) est supérieur à 0,5. Les références similaires, dont les caractéristiques générales et d'équipement détaillées en fin de §5.2.2 sont identiques, sont réunies en une seule entrée afin d'éviter les doublons. Leur différence tient généralement au design de l'appareil.

5.2.2 Sélection des caractéristiques

La variable endogène, expliquée par les caractéristiques qualitatives via la régression hédonique, est le prix. Afin d'établir un prix moyen observé pour chaque référence (ou groupe de références), on se réfère aux sites dotés du *label des sites comparateurs* et qui sont adaptés au marché des réfrigérateurs (c'est-à-dire hors comparateurs de voyages). Soutenu par le secrétariat d'État à la prospective et au développement de l'économie numérique, le label en question permet d'attester de la conformité des sites aux principes de transparence et de respect des consommateurs prévus dans la Charte des sites comparateurs adoptée en juin 2008 sous l'égide des pouvoirs publics et de la Fédération du e-commerce et de la vente à distance [Fevad 2010]. Les sites concernés sont Achetezfacile.com, Kelkoo.fr, LeGuide.com et Shopping.com. Les prix moyens observés incluent le prix de livraison, celui-ci faisant partie intégrante de la stratégie commerciale des enseignes.

Quant au choix des caractéristiques qualitatives, il dépend avant tout de l'objectif de l'étude et des données disponibles. On note dans la littérature des écarts importants dans le niveau de détail choisi (tableau 5.1).

	[Greening et al. 1997]	[Kinnunen 1998]	[Nair 2004]	[Shepler 2001]
Volume total	✓	✓	✓	✓
Volumes réf/cong	✓	✓	✓	✗
Fabricant	✗	✓	✓	✓
Type (x portes)	✗	✗	✓	✗ ¹
Conso d'énergie	✓	✓	✓	✗
Couleur	✗	✗	✗	✓
Fonctions et équipements divers	✗	<ul style="list-style-type: none"> ◇ capacité de congélation ◇ système de congélation ◇ thermomètre extérieur 	<ul style="list-style-type: none"> ◇ range œuf ◇ bacs à humidité contrôlée ◇ pieds et roulettes ◇ contrôle électronique ◇ contrôleurs de température ◇ systèmes de dégivrage 	<ul style="list-style-type: none"> ◇ congélateur en bas ◇ isolation du bruit ◇ filtration de l'eau ◇ contrôles de l'humidité ◇ fonction d'économie d'énergie ◇ distributeur de glaçons
Type de magasin	✗	✗	✓	✓
Prix en solde	✗	✗	✗	✓
Caractéristiques géographiques	✗	✗	région & quartier	région & taille de ville

TAB. 5.1 – Caractéristiques retenues dans 4 études hédoniques réalisées sur les réfrigérateurs

Dans notre étude, le choix des caractéristiques qualitatives est basé sur l'information disponible sur les sites des fabricants, sur leur comparabilité entre marques et sur leur qualité de variable dans le contexte de la régression linéaire. Sur la base de ce dernier point, sont exclues d'office :

- ▷ les caractéristiques peu différenciées sur le panier de produits : les systèmes de froid ventilé et de dégivrage automatique « no-frost » par exemple sont présents dans tous les modèles récents référencés sur les sites des fabricants ;
- ▷ les caractéristiques présentant de fortes corrélations avec un autre attribut, sans pour autant apporter un service sensiblement différent : les fonctions « vacances », « sécurité enfant » et « alarme porte ouverte » sont par exemple fortement corrélées avec l'attribut « contrôle électronique » ;
- ▷ Les caractéristiques *a priori* secondaires sur la détermination des prix : roulettes, ranges œuf, balconnets contre porte des congélateurs, etc.

¹Le type de réfrigérateur (nombre et position relative des portes) a été recensé, puis la variable a été abandonnée pour cause de forte colinéarité avec le volume total.

Trois caractéristiques méritent une attention particulière : le fabricant, le type et la couleur des réfrigérateurs.

Il est possible d'intégrer la marque des produits (LG, Daewoo ou Samsung) dans la régression afin d'observer le coût additionnel que l'on paie pour avoir une marque plutôt qu'une autre. Le tableau 5.2 montre que, pour un type de réfrigérateur donné, il existe un lien positif entre le prix moyen par litre et le nombre moyen de caractéristiques qualitatives. Les différences de prix entre les marques semblent ainsi être davantage dues à des écarts d'équipements. Tenir compte de la marque risque donc d'accroître la multi-colinéarité dans les régressions, puisque cela équivaut en quelques sortes à un double comptage.

Fabricant	Volume utile total (VUT) moyen (L)	Prix moyen observé (€)	Prix moyen par litre utile (€/L)	Nombre d'attributs en moyenne ^a
Modèles « américains »				
Daewoo	533	1059	1,99	4,5
LG	534	1171	2,19	5,7
Samsung	529	1026	1,94	5,0
Modèles « combinés »				
Daewoo	296	438	1,48	0,9
LG	295	561	1,9	3,4
Samsung	347	649	1,87	3,0
Modèles « 2 portes »				
Daewoo	374	543	1,45	2,3
LG	424	658	1,55	3,4
Samsung	361	506	1,4	1,8

TAB. 5.2 – Description des données, par type de réfrigérateur et par fabricant

^aSomme des 8 variables binaires présentées dans le tableau 5.1 (indice d'efficacité énergétique égal à A+ ; distributeur en façade ; mini bar intégré ; contrôle et affichage en façade ; poignées de luxe ; éclairage intérieur haut de gamme ; compartiment fraîcheur ; nano-argent), plus la rareté.

Quant aux types de réfrigérateurs, leur différence tient principalement à la position du compartiment congélation par rapport à la partie réfrigération : côte à côte dans les modèles *américains* (également nommés *side-by-side* à juste titre), le congélateur au dessus dans les *2 portes*, en dessous dans les *combinés*. Sur le panier de produits composé pour l'étude hédonique, les modèles *2 portes* offrent en moyenne 20% d'espace utile de plus que les modèles *combinés*. Les modèles de type *américains* sont généralement sensiblement plus imposants. Ces données corroborent le constat de [Shepler 2001] quant à l'évidente corrélation entre les types de réfrigérateurs et leur taille. Des tests sur l'échantillon de produits considérés montrent également des corrélations entre le type *américain* et d'autres attributs (distributeurs de glaçons, mini bars intégrés, nano-argent). Le type d'un appareil ne se limite cependant pas à une gamme de taille et à des équipements plus ou moins haut de gamme. Il traduit également des critères esthétiques et fonctionnels, que l'on peut qualifier intuitivement comme étant peu différenciés entre les modèles *2 portes* et *combinés* et sensiblement différenciés entre les modèles *américains* et le reste. On distingue donc deux types de modèles dans les régressions : les «*américains*» et les «*2 portes et combinés*».

Les différences de prix entre les finitions ou les couleurs s'expliquent en fonction de la tendance. Il y a près de dix ans, [Shepler 2001] montre que les finitions de type bois, inox et, dans une moindre mesure, de couleur noire, faisaient grimper les prix, tandis que les couleurs blanche et beige étaient les plus courantes. Globalement sur les produits à système de froid ventilé récemment arrivés sur le marché français, l'aspect inox s'est banalisé et la tendance est actuellement au noir laqué. Il est cependant difficile de conclure qu'il existe deux—ou plusieurs—gammes de finitions affectant le prix du produit final. Le marché, même restreint aux fabricants retenus, présente des exemples contradictoires d'écarts de prix entre finition présumée « haut de gamme » et finition alternative pour un même produit et chez le même distributeur. De fait, malgré l'incidence évidente du coloris des appareils sur leur prix, il apparaît difficile d'établir une tendance. Sur les données collectées, l'écart de prix moyen observé

entre deux designs d'un modèle identique ne dépasse cependant que très rarement 5% du prix total. Nous excluons la caractéristique « couleur » des régressions ; elle contribue donc à expliquer une part de l'erreur ϵ du modèle.

Le tableau 5.3 dresse la liste des caractéristiques retenues préalablement à la spécification du modèle et définit celles qui sont retenues en tant que variables explicatives dans les modèles tels qu'ils sont définis en §5.3.

Caractéristiques testées	Variables retenues		Définition des variables
	Modèle n° 1	Modèle n°2	
Caractéristiques générales			
Volume utile total	VUT ^a	VUT	Volume utile total (réfrigérateur et congélateur), en litres
Ratio VUR ^b /VUT	VUR/VUT	VUR/VUT	$0 < ratio < 1$
Type de réfrigérateur	américain	-	1 si américain, 0 si autre type d'appareil à 2 portes
Indice d'efficacité énergétique	IEE ^c	IEE	1 si A+, 0 si A
Équipement de l'appareil			
Distributeur en façade	distributeur	distributeur	1 si oui, 0 autrement
Minibar intégré	-	-	1 si oui, 0 autrement
Contrôle électronique et affichage digital en façade	contrôle	contrôle	1 si oui, 0 autrement
Poignées de luxe	-	-	1 si poignées en aluminium ou à dépression, 0 autrement
Éclairage intérieur haut de gamme	-	-	1 si colonne de lumière LED ou effets de lumière bleuté, 0 autrement
Équipement du compartiment « réfrigérateur »			
Compartiment fraîcheur *	-	-	1 si compartiment 0-1°C ou 0-3°C, 0 autrement
Revêtement antibactérien **	nanoargent	nanoargent	1 si oui, 0 autrement
Prix			
Indice de rareté ***	-	-	$0 < indice \leq 0,5$

TAB. 5.3 – Sélection et définition des variables explicatives

^aVUT : Volume Utile Total
^bVUR : Volume Utile Réfrigérateur
^cIEE : Indice d'Efficacité Énergétique

5.3 Spécification du modèle

La fonction hédonique est définie par une forme fonctionnelle semi-logarithmique :

$$\ln(\text{prix}) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \epsilon$$

avec α_0 étant le terme constant, β_i le coefficient de régression ou prix hédonique implicite pour chaque caractéristique, x_i la valeur de la caractéristique i , ϵ le terme de l'erreur. Les caractéristiques des appareils qui ne sont pas prises en compte dans la régression sont implicitement intégrées dans les termes α_0 et ϵ . Le terme de l'erreur est notamment affecté par les écarts de garantie fournie par les distributeurs, les écarts de design entre modèles, etc. La forme fonctionnelle semi-logarithmique est privilégiée à d'autres, telles qu'une formulation linéaire simple par exemple, sur la base du critère d'information d'Akaike (AIC²) [Akaike 1974].

² $AIC = -2\log(L) + 2k$, où L est la vraisemblance maximisée et k le nombre de paramètres dans le modèle. L'AIC représente donc un compromis entre le biais (qui diminue avec le nombre de paramètres) et la parcimonie (nécessité de décrire les données avec le plus petit nombre de paramètres possible) [Lancelot et Lesnoff 2005].

Sur l'échantillon d'appareils issu des données recueillies, deux variantes du modèle théorique sont testées :

- ▷ la version initiale, intégrant l'ensemble des caractéristiques retenues *a priori* (tableau 5.3, colonne 1) en tant que variables exogènes ;
- ▷ une version réduite à k variables (tableau 5.3, 2^e colonne), excluant les variables n'étant ni significatives dans le premier modèle à l'exception de la variable *nanoargent*, ni corrélées avec cette dernière (l'éviction des variables corrélées pouvant biaiser les résultats).

On choisit la variante fournissant dans les régressions le critère d'information d'Akaike corrigé (AICc)³ le meilleur, soit la version réduite du modèle. Cependant, la significativité de la variable *nanoargent* est très faible quelle que soit la variante considérée.

Une modification de l'échantillon initial permet la sélection d'un second modèle, présentant une bonne significativité pour le coefficient de la variable *nanoargent*. Cela conduit à exclure les données collectées sur les réfrigérateurs de type *2 portes*, pour ne conserver que les modèles *américains* et *combinés*, au prix d'une réduction de la taille de l'échantillon de 50 à 38⁴. À l'image de la méthode employée pour le premier modèle, deux variantes sont testées ; celle réduisant le nombre total de variable est privilégiée.

tests de corrélation

Les tests de corrélation indiquent plusieurs corrélations pour un seuil alpha (risque d'erreur de première espèce) de 5%. La petite taille de l'échantillon et la nature binaire de la majorité des variables expliquent en partie ces corrélations. La multi-colinéarité du modèle peut causer un accroissement des variances des coefficients β_i . Cet effet, mesuré par le facteur d'inflation de la variance (VIF), est acceptable dans le premier modèle étant donné un VIF de 1,39 pour la variable la moins corrélée (*nanoargent*) et 4,56 pour la plus corrélée (*américain*). Concrètement, cela suggère que les écarts-type des coefficients de ces variables sont respectivement multipliés par 1,18 et 1,69.

Dans le second modèle, on observe logiquement de plus fortes corrélations entre les variables *VUT* (volume utile total) et *américain* (VIF⁵ proches de 10). Le fait d'exclure les appareils *2 portes* de l'échantillon accroît l'écart de taille entre les appareils *américains* et le reste de l'échantillon, composés uniquement d'appareils *combinés*. La variable *américain* a donc peu de sens sur cet échantillon étant donnée sa corrélation presque parfaite avec la variable *VUT* (coefficient de corrélation de 0,92), et on choisit de l'exclure des régressions. Cela équivaut à poser l'hypothèse selon laquelle les différences de prix entre un modèle américain et un combiné s'expliquent par leur différence de volume et par leur différence d'équipements ; les modèles américains étant généralement plus grands et mieux équipés (tableau 5.2). L'éviction de cette variable pourtant corrélée avec la variable *nanoargent* a des effets minimes sur la valeur de l'estimateur de cette dernière, et réduit fortement les multi-colinéarités (VIF_{nanoargent} = 1,53 ; VIF_{VUT} = 4,28).

Les hypothèses stochastiques du modèle sont vérifiées à l'aide des tests d'homoscédasticité de Breusch-Pagan, de normalité de l'erreur de Shapiro-Wilk et d'un test de nullité de la moyenne de l'erreur selon une loi de Student. Le lecteur intéressé trouvera les détails des tests effectués dans les feuilles Microsoft Excel du supplément électronique de ce cahier (*cf.* l'annexe A).

5.4 Résultats des régressions et calcul du prix implicite du nano-argent

La significativité des deux modèles est bonne, avec un R² ajusté de 0,95 environ. Cela signifie que chaque modèle explique à 95% la variable endogène, le prix.

Quant à la variable *nanoargent*, son coefficient n'est pas significativement différent de 0 dans le modèle n°1 (tableau 5.4, dernière colonne). En d'autres termes, les régressions hédoniques indiquent que le nano-argent n'a pas d'impact significatif sur le prix des réfrigérateurs.

Ce résultat va à l'encontre de l'intuition, puisqu'on s'attend à ce que la technologie nano-argent introduise un coût supplémentaire pour les producteurs. Notons néanmoins qu'il existe

³AICc est un critère d'information d'Akaike avec une correction de second ordre pour les petits échantillons.

⁴Notons qu'il n'y a pas de sens à modifier l'échantillon avec pour objectif d'obtenir une bonne significativité d'un coefficient. L'objectif du modèle 2 est de proposer un modèle alternatif qui aboutit à un effet strictement positif de la technologie nano-argent sur le coût, conformément à l'intuition de base que cette technologie introduit un coût supplémentaire pour les producteurs. Un intérêt (principalement pédagogique) à procéder ainsi est que ce modèle sera utilisé par la suite à la fois pour la discussion des résultats, et l'analyse d'incertitude.

⁵Facteur d'inflation de la variance

⁶Coefficient significativement différent de 0 aux niveaux de signification de 0,1% (***) , 1% (**) et 5% (*). Nombre d'observation : 50.

	Estimation des coefficients	Écarts types	p-value	Significativité des coefficients ⁶
constante	5,9662	0,4977	3,84E-15	***
VUT	0,0017	0,0002	1,39E-9	***
VUR/VUT	-0,5707	0,6783	0,4049	
américain	0,1571	0,0545	0,0062	**
IEE	0,1706	0,0311	2,13E-06	***
distributeur	0,1302	0,0450	0,0061	**
contrôle	0,1023	0,0403	0,0149	*
nanoargent	0,0378	0,0340	0,2727	

TAB. 5.4 – Estimation du modèle 1 (échantillon initial : 3 types de réfrigérateurs)

	Estimation des coefficients	Écarts types	p-value	Significativité des coefficients
constante	5,6843	0,6235	2,77E-10	***
VUT	0,0021	0,0003	3,26E-9	***
VUR/VUT	-0,3776	0,8105	0,6445	
IEE	0,1467	0,0343	0,0002	***
distributeur	0,1667	0,0536	0,0040	**
contrôle	0,1024	0,0511	0,0518	.
nanoargent	0,1094	0,0402	0,0105	*

TAB. 5.5 – Estimation du modèle 2 (échantillon réduit : réfrigérateurs de types américain et combiné)

une littérature en économie de l'innovation (voir par exemple les débats sur l'hypothèse de Porter) qui suggère que l'introduction d'une nouvelle technologie coûteuse peut dans certains cas avoir des effets bénéfiques pour une entreprise, et réduire ses coûts globaux, par exemple en permettant de rendre plus efficace le processus entier de production. Cependant, il n'est pas clair *a priori* que ce type d'observation s'applique à l'utilisation de la technologie nano-argent. Dans le second modèle, la significativité élevée de la variable *nanoargent* permet de déduire un prix implicite non nul.

Sur le panier d'appareils considéré dans le modèle n°2, le prix moyen observé est estimé à 870,38€. Le produit du prix moyen et des coefficients estimés par le modèle fournit un prix implicite pour chaque variable (euros par litre, pour *VUT*). Comme indiqué plus haut, la durée de vie moyenne des réfrigérateurs et congélateurs domestiques est estimée à 14 ans [GrenelleEnv 2008]. Nous lisons le prix implicite du nano-argent à l'achat sur la durée de vie moyenne des appareils pour obtenir un coût annuel. Les bornes inférieure et supérieure exprimées dans le tableau 5.6 correspondent à la valeur centrale plus ou moins l'écart-type.

	Borne inférieure	Valeur centrale	Borne supérieure
Modèle n°1			
Prix implicite à l'achat	0,00	0,00	0,00
Modèle n°2			
Prix implicite à l'achat	60,26	95,25	130,23
Prix implicite annuel	4,30	6,80	9,30

TAB. 5.6 – Prix implicite du nano-argent (€)⁷

⁷Dans une optique de cohérence entre les diverses méthodes mises en œuvre, on n'applique pas de taux d'escompte

Dans la suite du rapport, nous avons utilisé une moyenne entre ces deux modèles. Plus précisément, dans l'analyse Monte-Carlo présentée au chapitre suivant, un tirage aléatoire de type pile ou face détermine si l'on choisit une valeur provenant du modèle n° 1 (faible surcoût de la technologie) ou une valeur provenant du modèle n° 2 (surcoût annuel aux alentours de 6€80).

malgré la durée de vie de 14 ans de l'appareil ; de même que dans le calcul des effets bénéfiques en DALYs associés aux propriétés antibactériennes du nano-argent (section 3.4).

Résultats

Les bénéfices et les coûts pouvant potentiellement être associés à l'usage du nano-argent dans les réfrigérateurs ont été identifiés dans le chapitre 2, puis quantifiés et monétisés dans les chapitres 3 à 5. La différence entre les bénéfices et les coûts permet l'expression d'un bénéfice net (différence entre bénéfices et coûts). Ce résultat, bien qu'exprimé en des termes relativement précis, doit être perçu comme une estimation fournissant un **ordre de grandeur**, dont les hypothèses et les modes de calcul en influent grandement les valeurs.

Une simulation Monte-Carlo permet d'intégrer l'incertitude dans l'expression des résultats et d'identifier les paramètres (ou hypothèses) qui s'avèrent être les principales sources d'incertitude. Enfin, les résultats obtenus donnent lieu à plusieurs éléments de réflexion et d'interprétation des résultats.

quantification de
l'incertitude

6.1 Bénéfice net

On retient pour le calcul du bénéfice net l'impact positif associé aux propriétés antibactériennes des nanoparticules d'argent, les éventuels effets toxicologiques de la technologie, et le coût d'équipement associé à l'usage de la technologie nano-argent dans les réfrigérateurs. Le bénéfice annuel moyen est estimé à 1,27 € par ménage (§3.4). Les effets toxicologiques éventuels sont retenus sous la forme d'une estimation (très incertaine) de l'impact des nanoparticules d'argent sur le foie. Les autres effets toxicologiques éventuels (relargage de nanoparticules d'argent dans l'environnement, en particulier) sont supposés négligeables. La composante du risque sur la santé des travailleurs impliqués dans la fabrication des réfrigérateurs est supposée intégrée dans le coût du nano-argent, via les mécanismes de fixation des salaires, qui incluent une prime de risque. Quant au surcoût d'équipement annualisé, on prend la moyenne des valeurs calculées selon les deux modèles hédoniques décrits au §5.3.

Critère	Monétisation (valeur centrale)
Bénéfice sanitaire de la technologie nano-argent (réduction impact maladies bactériennes)	1,27 €
Coût toxicologique éventuel pour les usagers des réfrigérateurs	-7,64 €
Coût additionnel d'acquisition lié à la présence de la technologie nano-argent	-3,40 €
Bénéfice social net par an et par foyer	-9,77 €

Le bénéfice net est exprimé ci-dessus sous forme d'une valeur moyenne. La section suivante fournit une information plus précise sur l'incertitude affectant cette estimation.

6.2 Analyse d'incertitude via une simulation Monte-Carlo

On a exprimé en §3.4 les résultats sous forme de bornes basses et hautes afin de tenir compte de l'incertitude. Cette méthode pose néanmoins des problèmes quant aux plages d'incertitude lors de l'addition des bornes basses et/ou hautes entre elles.

Les résultats peuvent également être présentés via une simulation Monte-Carlo.

Simulation selon la méthode Monte-Carlo

La méthode Monte-Carlo est une technique de simulation stochastique consistant à attribuer à chaque variable entrante (*input*) une valeur régie par une distribution de probabilité, puis à répéter les calculs pour des valeurs différentes de ces inputs incertains. Elle permet, suite à un grand nombre d'itérations, d'exprimer les résultats sous forme de densités de probabilité, et d'établir l'influence de l'incertitude relative à chacun des paramètres sur le résultat final.

La simulation intègre les 10 inputs indiqués dans le tableau 6.2 et une seule variable de sortie (*output*) : le bénéfice net. Les inputs correspondent aux données et hypothèses pour lesquelles on dispose de valeurs basses et hautes différentes. On teste des distributions triangulaires dont le mode correspond, à l'exception du coût d'équipement, à la valeur centrale retenue pour le calcul du bénéfice net en section 3.4. Pour le calcul du coût, le choix du modèle hédonique est régi par une variable binaire (*dummy*), ayant une probabilité identique de désigner une distribution représentative des résultats du premier ou du second modèle.

Variables	Définition des variables	Distribution (paramètres)
Variables relatives au calcul des bénéfices (propriétés anti-bactériennes)		
E.coli_infections	Nombre annuel de cas d'infection à E. coli d'origine alimentaire	Triangulaire (min : 923, max : 1848, mode : 1385,5)
E.coli_mortalité	Nombre annuel de décès lié à une infection à E. coli d'origine alimentaire	Triangulaire (min : 0, max : 1, mode : 0,5)
S.aureus_infections	Nombre annuel de cas d'infection à S. Aureus d'origine alimentaire	Triangulaire (min : 3257, max : 10422, mode : 6839)
S.aureus_hospitalisations	Nombre annuel d'hospitalisations lié à une infection à S. Aureus d'origine alimentaire	Triangulaire (min : 596, max : 1907, mode : 1251)
RIRF	Proportion du risque imputable aux réfrigérateurs domestiques	Triangulaire (min : 30%, max : 70%, mode : 50%)
efficacité	Paramètre principal d'efficacité du nano-argent : contact nano-argent-bactéries	Triangulaire (min : 5%, max : 50%, mode : 27,5%)
Variables relatives au calcul des coûts (surcoût d'équipement annualisé et coût toxicologique éventuel)		
dummy_cout	Choix du modèle hédonique : ▷ à 0, on choisit le modèle n°1 ▷ à 1, on choisit le modèle n°2	Bernouilli (p : variable continue aléatoire comprise entre 0 et 1)
cout_chi2	Coût d'équipement du nano-argent dans les réfrigérateurs (€ par ménage par an), selon le modèle 1	Chi2 à 2 degrés de liberté
cout_triangu	Coût d'équipement du nano-argent dans les réfrigérateurs (€ par ménage par an), selon le modèle 2	Triangulaire (min : 4,3 ; max : 9,3 ; mode : 6,8)
risque_cirrhose	Excès de risque que les usagers du réfrigérateur contractent une cirrhose (par an)	Uniforme variant entre 10^{-6} et 10^{-4}
DALY	Taux de conversion entre DALY et euros	Normale centrée en 100 000, $\sigma = 10\ 000$
VSL	Valeur statistique de la vie humaine	Normale centrée en 2,5 M€, $\sigma = 200\ \text{k€}$

TAB. 6.1 – Variables entrantes (inputs) pour la simulation Monte-Carlo

La figure 6.2 indique la densité de probabilité du bénéfice net, pour une simulation de 10 000 itérations avec les variables entrantes spécifiées dans le tableau 6.2. La distribution du résultat fait bien apparaître les deux distributions retenues pour le coût d'équipement.

Enfin, nous avons conduit une **analyse de sensibilité** pour obtenir les indices de sensibilité de premier ordre (figure 6.3) pour les paramètres incertains. L'indice de sensibilité de premier ordre d'un paramètre, un nombre entre 0 et 1, indique la proportion de la variance de la sortie (le bénéfice net annuel) qui est provoquée par la variation (selon la distribution définie dans le

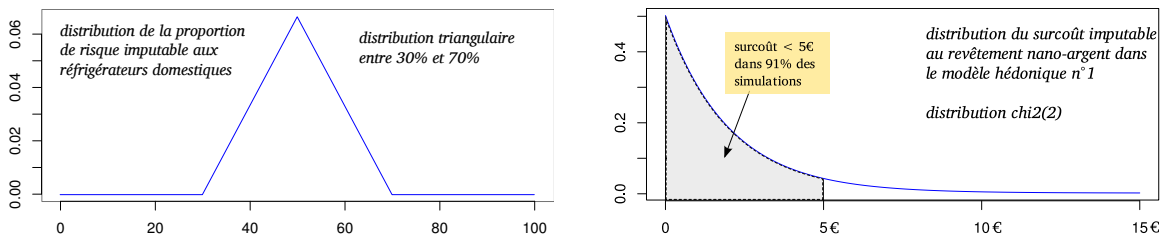


FIG. 6.1 – Illustration de deux distributions de probabilité utilisées dans la simulation stochastique

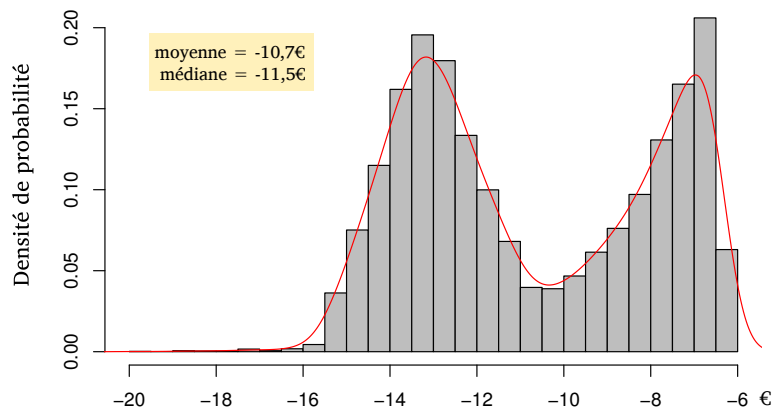


FIG. 6.2 – Estimation de la densité de probabilité du bénéfice net (avec prise en compte des effets éventuels de toxicité du nano-argent pour les usagers)

tableau 6.2) du paramètre d'entrée, qui varie seul¹. Cette analyse indique que la variabilité du résultat final de l'étude est principalement tributaire des incertitudes relatives au coût d'équipement (variables *cout_chi2* et *cout_triang*). Il serait donc nécessaire de travailler davantage sur ces paramètres afin de réduire l'incertitude du résultat final exprimé plus haut.

L'analyse de sensibilité

Définition

L'analyse de sensibilité consiste à déterminer, quantifier et analyser comment la variabilité de la sortie d'un modèle peut être attribuée à la variabilité des différentes entrées du modèle. Il s'agit d'analyser comment les incertitudes sur les paramètres d'entrée se propagent vers l'incertitude des variables de sortie du modèle, et d'identifier les plus importants contributeurs à cette incertitude de sortie [Saltelli et al. 2000, 2004].

Dans un contexte d'aide à la décision, l'analyse de sensibilité fournit une information sur le **degré de robustesse des conclusions** d'une analyse socio-économique. Sa mise en œuvre est conseillée pour les analyses d'impact réglementaires conduits pour la Commission Européenne [EC 2009], comme les analyses conduites pour la US EPA [Office of the Science Advisor 2009].

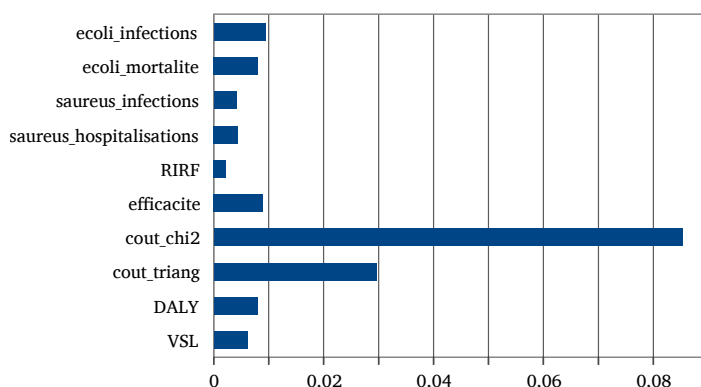


FIG. 6.3 – Indices de sensibilité de premier ordre, indiquant la proportion de la variance du bénéfice net imputable à la variation de chaque input²

6.3 Interprétation des résultats et limites de l'étude

Les bénéfices de cette utilisation de la technologie nano-argent ne semblent pas compenser ses coûts

On a basé le calcul du bénéfice net sur deux éléments : un bénéfice sanitaire (propriétés antibactériennes du nano-argent) et un coût d'équipement supporté par le consommateur. La simulation Monte-Carlo montre une distribution du résultat plutôt en faveur d'un **bénéfice net négatif**.

Ce résultat indique que le bénéfice induit par l'achat d'un réfrigérateur contenant la technologie nano-argent est inférieur à son coût. Ainsi, il suggère qu'un consommateur rationnel et bien informé n'aurait pas intérêt à faire cet achat, et que la technologie devrait donc disparaître du marché à terme.

Ce résultat peut être potentiellement expliqué par une perception subjective du risque des consommateurs qui n'est pas compatible avec l'évaluation du risque proposée dans l'étude. Par exemple, il est possible que certains consommateurs surévaluent le risque sanitaire, ou l'efficacité de la technologie nano-argent. Aussi, face aux incertitudes scientifiques importantes relatives au risque sanitaire, certains consommateurs peuvent être « averses à l'ambiguïté », et augmenter leur consentement à payer pour bénéficier d'une réduction de risque [Treich 2010]. Des informations supplémentaires sur les perceptions des risques et de la technologie par les consommateurs pourraient aider à valider ou pas ces hypothèses.

Ce bénéfice net négatif pourrait être lié à un **comportement irrationnel du consommateur**, puisque ce résultat indique que le prix implicite de la technologie est supérieur au consentement à payer du consommateur (ou bénéfice escompté en termes de bien-être). Dans la mesure

aversion à l'ambiguïté

¹Il existe également des indices de sensibilité d'ordres supérieurs à 1, représentant l'effet de l'interaction entre plusieurs paramètres sur la sortie, qui n'ont pas d'importance pour notre discussion.

²Indices de sensibilité estimés à l'aide du logiciel *Simlab* version 3.0 sur une simulation de type Monte-Carlo, utilisant la méthode basée sur l'analyse de la variance *Fourier amplitude sensitivity testing*, avec un échantillon de taille 10 000.

où les réfrigérateurs équipés de cette technologie sont dans le haut de gamme, les consommateurs concernés sont plus riches que la moyenne, ce qui peut augmenter le consentement à payer moyen. Cela pourrait révéler aussi une **perception subjective du risque** qui n'est pas compatible avec l'évaluation du risque proposée dans l'étude. Il pourrait révéler également une forme d'**aversion à l'ambiguïté** du consommateur conduisant à augmenter le consentement à payer pour bénéficier de la réduction du risque [Treich 2010].

Il faut rappeler aussi que nous avons interprété le supplément de prix comme le coût additionnel de cette technologie pour le producteur. Or, ce supplément reflète aussi bien les caractéristiques de l'offre que de la demande pour cette technologie. Ainsi, il existe une autre interprétation du résultat. Celle-ci reconnaît que nous avons utilisé deux méthodes différentes d'estimation du *bénéfice* de cette technologie. La première méthode est celle présentée dans les sections précédentes (2, 3 et 4), et estime un « bénéfice hypothétique » pour les consommateurs à partir des études dont nous disposons sur le changement de risque sanitaire généré, et sur la valeur monétaire usuelle associée à ce changement de risque dans d'autres domaines. La deuxième méthode est celle des prix hédoniques, et calcule en quelque sorte un « bénéfice réel », puisqu'il se base sur la demande réelle des consommateurs pour cette technologie observée sur les marchés des réfrigérateurs. Néanmoins, puisque cette demande dépend principalement des perceptions subjectives des consommateurs, de leur valorisation du risque en question, ainsi que des caractéristiques de l'offre sur ce marché, elle peut différer de nos estimations basées sur des données passées et des études d'experts ; et il n'est donc pas surprenant d'obtenir des estimations du bénéfice différentes entre les deux méthodes.

Par ailleurs, une étude plus approfondie de l'offre et des comportements d'achats pourrait sans doute apporter des enseignements intéressants. On s'est basé pour l'étude hédonique sur le prix des produits distribués chez les e-commerçants, sans pour autant attribuer une valeur à chacun de ces sites. Or l'acte d'achat dépend non seulement des qualités intrinsèques du produit mais aussi de la qualité (ou de l'image) du site proposant les produits. Par exemple, un individu qui restreint son champ à trois distributeurs réduit considérablement la diversité de l'offre et se prive potentiellement d'une diversité de choix entre modèles avec et sans nano-argent.

Un autre biais relatif au coût du nano-argent concerne la délimitation du périmètre de l'étude hédonique qui, faute d'information et de temps pour recueillir les données, a été réduite aux appareils produits par les marques présentes sur le marché du nano-argent. Le prix implicite du nano-argent calculé dans le modèle n°2 intègre potentiellement un consentement à payer pour une marque relativement haut-de-gamme—une des trois marques considérées, se distinguant notamment par l'incorporation de nano-argent dans les produits—plutôt qu'une marque considérée en milieu de gamme.

Il est important de souligner la nature très limitée de notre traitement d'un aspect fondamental et prédominant dans le débat actuel sur les nanotechnologies, la dimension toxicologique. L'absence de données scientifiques ne nous a pas permis d'analyser cette question en profondeur.

Enfin, il est utile de préciser que les résultats que nous avons obtenus sont spécifiques à une utilisation précise des nanoparticules d'argent, dans les réfrigérateurs domestiques. Ces résultats ne sont pas transposables à d'autres utilisations de nanoparticules d'argent, pour lesquels il serait nécessaire de conduire une nouvelle étude des bénéfices et des coûts ; ils ne sont *a fortiori* pas transposables à l'utilisation d'autres types de nanoparticules dans des produits de consommation.

6.4 Identification des données manquantes

Comme nous l'avons dit, le manque de données nous a conduit à poser des hypothèses fortes, et engendre nécessairement de fortes incertitudes sur les résultats de cette étude. Ainsi, pour conclure et dans l'optique d'évaluations socio-économiques futures, nous identifions les données manquantes principales dans cette étude.

À commencer par les effets antibactériens du nano-argent, il serait primordial d'affiner l'hypothèse d'**efficacité du nano-argent**, établissant la proportion des bactéries pathogènes présentes dans un réfrigérateur (et pouvant potentiellement être ingérées) qui sont en contact avec le nano-argent. Pour cela, deux types d'informations prévalent :

On sait identifier les variables dont l'incertitude influe le plus sur l'incertitude finale

- ▷ Des données sur le développement des bactéries dans un réfrigérateur, à savoir : quelle part des bactéries pathogènes se développe à la surface des aliments ?
- ▷ Des données sur les habitudes des individus en termes d'hygiène lorsqu'il s'agit de conserver des aliments au réfrigérateur, par exemple : quelle est la part des aliments potentiellement porteurs de pathogènes qui sont posés à même les clayettes ?

Enfin, il serait éventuellement souhaitable de disposer de données sur l'efficacité des filtres à air incorporant du nano-argent sur l'élimination des bactéries sur les aliments non couverts.

Le **volet toxicologique** est celui qui souffre du plus gros manque d'information. Les travaux de l'EPA sur le nano-argent dans les sprays désinfectants listent les données manquantes nécessaires à une évaluation quantitative du risque [US EPA 2010]. La majeure partie des éléments listés dans ce document sont transposables à l'application du nano-argent dans les réfrigérateurs. Dans le cas des impacts sur la santé humaine, il faudrait par exemple davantage de données sur les effets attendus, leur gravité et leur probabilité d'occurrence.

Quant au **coût de la technologie**, on a mentionné plus haut que l'étude hédonique gagnerait à inclure l'ensemble des marques de réfrigérateurs distribuées sur le marché français. Des données sur le coût de revient de l'incorporation de nanoparticules d'argent pour les fabricants de réfrigérateurs pourraient, à l'aide d'une information ou d'une hypothèse sur la marge opérée, permettre de définir une valeur fidèle à la réalité industrielle sans devoir supporter un travail conséquent de récupération de données.

Conclusions

Nous avons conduit une analyse des coûts et des bénéfices de l'utilisation de nanoparticules d'argent dans les réfrigérateurs domestiques, en examinant le choix d'un foyer moyen français de s'équiper d'un réfrigérateur équipé ou non de cette technologie. Les bénéfices associés à la technologie proviennent de ses qualités antibactériennes, permettant de réduire la probabilité que les membres du foyer soient atteints d'une maladie bactérienne. Les coûts considérés sont le surcoût à l'achat lié à la présence de cette technologie, les effets d'écotoxicité sur le cycle de vie complet du réfrigérateur (de l'extraction de l'argent à la phase de recyclage), et les possibles impacts des nanoparticules d'argent sur la santé des usagers du réfrigérateur.

À notre connaissance, il s'agit de la première étude socio-économique des coûts et des bénéfices associés à la présence de nanoparticules dans un produit grand public.

Monétisation des bénéfices. L'analyse coût-bénéfices nécessite de pouvoir exprimer les bénéfices sociaux du choix étudié sous une forme monétaire, afin de permettre leur comparaison avec les coûts. Nous nous sommes appuyés sur des recherches en économie de la santé pour estimer le consentement à payer pour éviter les différents impacts sanitaires des maladies bactériennes (hospitalisation, séquelles graves et décès). S'agissant des effets de morbidité, nous avons utilisé la notion de *Disability Adjusted Life Year* (DALY), ou années de vie ajustées sur le handicap, pour exprimer l'impact de la maladie sur le bien-être. Les effets mortels sont monétisés à l'aide de la *Valeur d'une Vie Statistique*, qui exprime le consentement à payer d'un individu moyen pour bénéficier d'une réduction marginale du risque de mortalité. Des données de l'InVS sur la fréquence d'occurrence de maladies bactériennes provoquées par trois bactéries pour lesquels un effet antibactérien des nanoparticules d'argent a été démontré (*E. coli*, *L. monocytogenes* et le staphylocoque doré) sont utilisées pour pondérer la gravité des maladies par leur probabilité d'occurrence, afin d'obtenir un bénéfice annuel pour notre foyer de référence.

Monétisation des coûts. Le surcoût à l'achat d'un réfrigérateur équipé d'un revêtement en nanoparticules d'argent a été estimé grâce à une analyse économétrique d'un échantillon d'une cinquantaine de réfrigérateurs disponibles sur le marché français. En comparant des modèles disposant de la technologie à des modèles semblables non-équipés, il s'agit d'isoler la contribution de la technologie au prix d'achat (ce qu'on appelle le « prix implicite » de la technologie). Ce surcoût varie entre 60 et 130€ sur l'échantillon analysé. Le deuxième coût que nous avons quantifié concerne l'impact sanitaire possible de l'exposition des utilisateurs du réfrigérateur aux nanoparticules d'argent. Cet impact est très incertain, n'ayant pas été démontré dans la littérature. Les études toxicologiques concernant le nanoargent ayant montré que le foie est l'organe le plus sensible aux effets, nous avons supposé que cet impact sanitaire se manifeste par un excès de risque de contracter une cirrhose.

Résultats. Notre étude exploratoire suggère, selon nos hypothèses, que le bénéfice net des nanoparticules d'argent dans les réfrigérateurs domestiques est négatif, c'est-à-dire que les coûts excèdent les bénéfices. Cette conclusion est spécifique au cas d'utilisation particulier que nous avons étudié : il est important de comprendre que ce type d'étude ne fournit pas une

information sur les apports des nanotechnologies en général, mais uniquement sur une mise en œuvre précise.

analyse de sensibilité

Plusieurs éléments intégrés dans cette étude sont **fortement incertains**, ce qui conduit à un niveau élevé d'incertitude dans le bénéfice net estimé. L'analyse de sensibilité que nous avons conduite permet d'identifier les paramètres ayant la plus forte influence sur cette incertitude, donc de distinguer les sujets où de nouvelles recherches permettraient d'améliorer la décision concernant l'utilité sociale de cette technologie.

Au-delà du résultat quantitatif issu de notre étude, nous avons montré que l'analyse coût-bénéfices permet d'**éclairer le décideur**, y compris dans des situations concernées par un niveau d'incertitude élevé. Dans le cas présent, l'analyse d'incertitude permet un classement robuste des différentes options disponibles. Quand bien même l'étude ne permet pas de classer les options (puisque les intervalles de confiance se superposent), l'analyse de sensibilité permet d'identifier les paramètres incertains qui contribuent le plus à l'incertitude du résultat, et donc d'identifier des points où des recherches plus approfondies permettraient d'améliorer la qualité de la décision.

Annexe : supplément électronique

Les données utilisées dans la présente étude et le tableur ayant servi aux calculs du bénéfice net sont téléchargeables depuis le site web de l'ICSI, à l'adresse

www.icsi-eu.org/francais/recherche/supplement-NanoInnov-201101.zip

Cette archive contient les fichiers suivants, au format Microsoft Excel :

- ▷ *Quantification impacts propriétés antibactériennes.xls*: données sur la population française utilisées pour calculer la taille d'un ménage moyen ; données sur la fréquence d'occurrence des différentes infections alimentaires d'origine bactérienne ; données sur les degrés de handicap en fonction de la gravité des symptômes ; données sur la monétisation des DALY.
- ▷ *Étude hédonique coût nano-argent.xls*: retrace et détaille la méthode hédonique ainsi que les données utilisées pour estimer le coût additionnel lié à la présence d'un revêtement nano-argent dans un réfrigérateur domestique, selon une étude du marché français conduit fin 2010. Comprend la construction et l'analyse de l'échantillon initial ; la confrontation d'échantillons et de variantes du modèle, avec les textes de significativité ; l'analyse du modèle statistique, les résultats des régressions hédoniques et le calcul du prix implicite du nano-argent.
- ▷ *Simulation Monte-Carlo.xls*: détaille les données, hypothèses et calculs opérés pour estimer et monétiser le bénéfice social net de la technologie nano-argent dans les réfrigérateurs domestiques. Décrit les données d'entrée de la simulation Monte-Carlo avec leurs distributions, et effectue une simulation pour obtenir la distribution du bénéfice net. S'appuie sur un jeu de macros Excel *Simulación 4.0* téléchargeable à l'adresse www.ucema.edu.ar/jvarela/index_eng.htm.

Annexe : historique des révisions

Le tableau ci-dessous recense les différentes révisions qui ont été apportées à ce document depuis sa première publication fin 2010.

Date	Nature de la modification
2011-02-03	Ajout des résultats de l'analyse de sensibilité, indiquant quels paramètres d'entrée ont l'impact le plus important sur la dispersion du bénéfice social net.
2011-03-18	La proportion du risque d'intoxication alimentaire imputable aux réfrigérateurs domestiques a été modifiée de la plage [70% ; 100%] à la plage [30% ; 70%]. Ce paramètre est nommé <i>RIRF</i> dans l'analyse de sensibilité. Ce changement fait suite à une remarque de Roberte Manigat (Direction Générale de la Santé).
2011-05-10	La conclusion a été modifiée pour faire apparaître davantage d'éléments méthodologiques, à la suggestion d'un lecteur.

Bibliographie

- AFSSET (2010). Évaluation des risques liés aux nanomatériaux pour la population générale et pour l'environnement. Rapport technique, Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail. Saisine n°2008/005. Disponible à l'URL : http://www.afsset.fr/upload/bibliotheque/460552230101468097041324565478/10_03_ED_Les_nanomatériaux_Rapport_comprese.pdf. 19
- Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(6):716–723. DOI: 10.1109/TAC.1974.1100705. 27
- Andersson, K. L., Salomon, J. A., Goldie, S. J., et Chung, R. T. (2008). Cost effectiveness of alternative surveillance strategies for HCC in patients with cirrhosis. *Clinical Gastroenterology and Hepatology*, 6:1418–1424. 21
- Attali, J. (2008). *Rapport de la Commission pour la libération de la croissance française*. Rapport au Premier Ministre français, 254 pages. Disponible à l'URL : <http://lesrapports.ladocumentationfrancaise.fr/BRP/084000041/0000.pdf>. 1
- Birla, S. S., Tiwari, V. V., Gade, A. K., Ingle, A. P., Yadav, A. P., et Rai, M. K. (2009). Fabrication of silver nanoparticles by phoma glomerata and its combined effect against *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* and *Staphylococcus aureus*. *Letters in Applied Microbiology*, 48(2):173–179. DOI: 10.1111/j.1472-765X.2008.02510.x. 2, 3
- Blasera, S. A., Scheringer, M., MacLeod, M., et Hungerbühler, K. (2008). Estimation of cumulative aquatic exposure and risk due to silver : Contribution of nano-functionalized plastics and textiles. *Science of the Total Environment*, 390:396–409. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2007.10.010. 19
- Cheng, Q., Li, C., Pavlinek, V., Saha, P., et Wang, H. (2006). Surface-modified antibacterial TiO₂/Ag+ nanoparticles : Preparation and properties. *Applied Surface Science*, 252(12):4154–4160. DOI: 10.1016/j.apsusc.2005.06.022. 2
- Cho, K. H., Park, J. E., Osaka, T., et Park, S. G. (2005). The study of antimicrobial activity and preservative effects of nanosilver ingredient. *Electrochimica Acta*, 51(5):956–960. DOI: 10.1016/j.electacta.2005.04.071. 2
- Christensen, F. M., Johnston, H. J., Stone, V., Aitken, R. J., Hankin, S., Peters, S., et Aschberger, K. (2010). Nano-silver – feasibility and challenges for human health risk assessment based on open literature. *Nanotoxicology*, 4:284–295. DOI: 10.3109/17435391003690549. 9, 20
- EC (2009). Impact assessment guidelines. Rapport technique 92, Commission Européenne. Disponible à l'URL : http://ec.europa.eu/governance/impact/commission_guidelines/docs/iag_2009_en.pdf. 34
- Feng, Q. L., Wu, J., Chen, G. Q., Cui, F. Z., Kim, T. N., et Kim, J. O. (2000). A mechanistic study of the antibacterial effect of silver ions on *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. *Journal of Biomedical Materials Research*, 52(4):662–668. DOI: 10.1002/1097-4636(20001215)52:4<662::AID-JBM10>3.0.CO;2-3. 2
- Fevad (2010). Nouveaux sites agréés pour le label des sites comparateurs. Communiqué de presse, Fédération du e-commerce et de la vente à distance. 25
- Gaffet, E. (2008). Nanomatériaux : différentes voies de synthèse, propriétés, applications et marchés. *Actualité et dossier en santé publique (revue du Haut Conseil de la Santé Publique)*. Disponible à l'URL : <http://www.hcsp.fr/docspdf/adsp/adsp-64/ad641823.pdf>. 1
- Gaul, L. E. et Staud, A. H. (1935). Seventy cases of generalized argyria following organic and colloidal silver medication, including biospectrometric analysis of ten cases. *Journal of the American Medical Association*, 104:1387–1390. DOI: 10.1001/jama.1935.02760160011004. 8
- Greening, L. A., Sanstad, A. H., et McMahon, J. E. (1997). Effects of appliance standards on product price and attributes : An hedonic pricing model. *Journal of Regulatory Economics*, 11:181–194. 24, 25
- GrenelleEnv (2008). Rapport final au ministre d'état. Annexe 11 : Bonus malus réfrigérateur et congélateur : Descriptif. Rapport technique, Ministère chargé de l'écologie. Comité opérationnel n°23 du Grenelle Environnement : « consommation », présenté par Yves Bur et Christian Babusiaux. 21, 29
- Gyrd-Hansen, D. (2005). Willingness to pay for a QALY: Theoretical and methodological issues. *Pharmacoeconomics*, 23(5):423–432. Disponible à l'URL : <http://pharmacoeconomics.adisonline.com/pt/re/phe/pdfhandler.00019053-200523050-00002.pdf>. 15
- Haagsma, J. A., van der Zanden, B. P., Tariq, L., van Pelt, W., van Duynhoven, Y., et Havelaar, A. H. (2006). Disease burden and costs of selected foodborne pathogens in the Netherlands. Rapport technique 330331001, RIVM. Disponible à l'URL : <http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/330331001.html>. 12, 13, 14
- Haninger, K. et Hammitt, J. K. (2006). Willingness to pay for quality-adjusted life years : empirical inconsistency between cost-effectiveness analysis and economic welfare theory. OECD working paper. Disponible à l'URL : <http://www.oecd.org/dataoecd/1/27/37585720.pdf>. 14
- Havelaar, A. H., van Duynhoven, Y., Nauta, M., Bouwknegt, M., Heuvelink, A. E., Wit, G. A., Nieuwenhuizen, M., et van de Kar, N. (2004). Disease burden in the Netherlands due to infections with shiga toxin-producing *Escherichia coli* O157. *Epidemiology and Infection*, 132(3):467–484. 12, 13
- Havelaar, A. H., Nauta, M. J., Mangen, M.-J., de Koeijer, A. G., Bogaardt, M.-J., Evers, E. G., Jacobs-Reitsma, W. F., van Pelt, W., Wagenaar, J. A., de Wit, G. A., et van der Zee, H. (2005). Costs and benefits of controlling *Campylobacter* in the Netherlands – integrating risk analysis, epidemiology and economics. Rapport technique 250911009/2005, RIVM. 13
- Height, M. J. (2009). Evaluation of hazard and exposure associated with nanosilver and other nanometal oxide pesticide products. Presented on behalf of the Silver Nanotechnology Working Group (SNWG) at Open consultation meeting at FIFRA (Federal Insecticide, Fungicide, and Rodenticide Act) scientific advisory panel. Disponible à l'URL : http://www.silverinstitute.org/images/stories/silver/PDF/EPA_SAP_SNWGPresentation_Nov2009.pdf. 6
- Hirth, R. A., Chernew, M. E., Miller, E., Fendrick, A. M., et Weissert, W. G. (2000). Willingness to pay for a quality-

- adjusted life year. *Medical Decision Making*, 20(3):332–342. DOI: 10.1177/0272989X0002000310. 14
- Hussain, S. M., Hess, K. L., Gearhart, J. M., Geiss, K. T., et Schlager, J. J. (2005). In vitro toxicity of nanoparticles in BRL 3A rat liver cells. *Toxicology in Vitro*, 19(7):975–983. DOI: 10.1016/j.tiv.2005.06.034. 19
- INRS (2008). Guide EFICATT – salmonella enterica sérotype typhi, base de données pathologie–toxicologie. Rapport technique, INRS. Disponible à l'URL : [http://www.inrs.fr/eficatt/eficatt.nsf/\(allDocParRef\)/FCSALMONELLA](http://www.inrs.fr/eficatt/eficatt.nsf/(allDocParRef)/FCSALMONELLA). 2
- InVS (2000). Bouffée épidémique de listériose liée à la consommation de rillettes. France, octobre–décembre 1999. Synthèse des données disponibles au 12/01/2000. Rapport technique, Institut national de Veille Sanitaire. Bulletin épidémiologique hebdomadaire n°4/2000. Disponible à l'URL : <http://www.invs.sante.fr/beh/2000/0004/>. 5
- InVS (2004). Morbidité et mortalité dues aux maladies infectieuses d'origine alimentaire en France. Rapport technique, Institut national de Veille Sanitaire. étude réalisé dans le cadre d'une collaboration avec l'AFSSA. Disponible à l'URL : http://www.invs.sante.fr/publications/2004/inf_origine_alimentaire/index.html. 2, 3, 5, 13, 14
- InVS (2008). Bilans réguliers de surveillance – maladies infectieuses. Bulletin épidémiologique hebdomadaire, 22 juillet 2008 / n°30-31, Institut national de Veille Sanitaire. 3
- IRSST (2010). Les nanoparticules, connaissances actuelles sur les risques et les mesures de prévention en SST. Rapport technique, IRSST (Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail), Montréal. rapport R-455. Disponible à l'URL : <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-455.pdf>. 24
- Johnson, J., Jirikowic, J., Bertram, M., Beers, D. V., Gordon, R. B., Henderson, K., Klee, R. J., Lanzano, T., Lifset, R., Oetjen, L., et Graedel, T. E. (2005). Contemporary anthropogenic silver cycle : A multilevel analysis. *Environmental Science and Technology*, 39(12):4655–4665. DOI: 10.1021/es048319x. 7
- Kampmann, Y., Clerck, E. D., Kohn, S., Patchala, D., Langerock, R., et Kreyenschmidt, J. (2008). Study on the antimicrobial effect of silver-containing inner liners in refrigerators. *Journal of Applied Microbiology*, 104(6):1808–1814. DOI: 10.1111/j.1365-2672.2008.03727.x. 2, 3, 6, 16
- Kim, J. S., Kuk, E., Yu, K. N., Kim, J.-H., Park, S. J., Lee, H. J., Kim, S. H., Park, Y. K., Park, Y. H., Hwang, C.-Y., Kim, Y.-K., Lee, Y.-S., Jeong, D. H., et Cho, M.-H. (2007). Antimicrobial effects of silver nanoparticles. *Nanomedicine : Nanotechnology, Biology, and Medicine*, 3(1):95–101. DOI: 10.1016/j.nano.2006.12.001. 2
- Kinnunen, A. (1998). Hedonic method is practicable in CPI compilation. Dans *Proceedings of the 4th International Conference of the Ottawa Group*. 24, 25
- Lancelot, R. et Lesnoff, M. (2005). Sélection de modèles avec l'aic et critères d'information dérivés. Fiche technique CIRAD. Disponible à l'URL : ftp://ftp.cirad.fr/pub/group-r/groupe-r/Fiches/AIC_v3.pdf. 27
- Luoma, S. N. (2008). Silver nanotechnologies and the environment : Old problems or new challenges? Rapport technique, Project on Emerging Nanotechnologies – The Pew charitable trusts. Disponible à l'URL : <http://www.nanotechproject.org/publications/archive/silver/>. 7, 19
- McKenna, M. T., Michaud, C. M., Murray, C. J., et Marks, J. S. (2005). Assessing the burden of disease in the united states using disability-adjusted life years. *American Journal of Preventive Medicine*, 28(5):415–423. DOI: 10.1016/j.amepre.2005.02.009. 21
- Meunier, V. et Éric Marsden (2009). Analyse coût-bénéfices : guide méthodologique. Rapport technique, Institut pour une Culture de Sécurité Industrielle. ISSN 2100-3874. Disponible à l'URL : http://www.icsi-eu.org/francais/dev_cs/cahiers/CSI-ACB-guide-methodologique.pdf. 2
- Mueller, N. C. et Nowack, B. (2008). Exposure modeling of engineered nanoparticles in the environment. *Environmental science technology*, 42:4447–4453. DOI: 10.1021/es7029637. 7, 9, 10, 19, 20
- Nair, B. P. (2004). Use of hedonic regression methods for quality adjustment in statistics NZ. Rapport technique, Inflation Measures Division, Statistics New Zealand. 24, 25
- Nanoforum (2009). L'analyse bénéfices/risques appliquée aux nanotechnologies : l'exemple du nano-argent. Dans *Compte-rendu de la séance du 2 avril 2009 du Nanoforum, CNAM*. Disponible à l'URL : <http://www.cnam.fr/servlet/com.univ.utils.LectureFichierJoint?CODE=12415149595398&LANGUE=0>. 7, 19
- Naveau, S., Perlemuter, G., et Balian, A. (2005). Épidémiologie et histoire naturelle de la cirrhose. *La Revue du praticien*, 55:1527–1532. 20
- Park, J., Kwak, B., Bae, E., Lee, J., Kim, Y., Choi, K., et Yi, J. (2009). Characterization of exposure to silver nanoparticles in a manufacturing facility. *Journal of Nanoparticle Research*, 11(7):1705–1712. DOI: 10.1007/s11051-009-9725-8. 8
- Pronk, M. E. J., Wijnhoven, S., Bleeker, E., Heugens, E., Peijnenburg, W., Luttik, R., et Hakkert, B. (2009). Nanomaterials under REACH – nanosilver as a case study. Rapport technique 601780003/2009, RIVM. Disponible à l'URL : <http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/601780003.pdf>. 19
- Rosen, S. (1974). Hedonic prices and implicit markets : Product differentiation in pure competition. *Journal of Political Economy*, 82(1):34–55. Disponible à l'URL : <http://ideas.repec.org/a/ucp/jpollec/v82y1974i1p34-55.html>. 23
- Saltelli, A., Tarantola, S., et Campolongo, F. (2000). Sensitivity analysis as an ingredient of modelling. *Statistical Science*, 15(4):377–395. Disponible à l'URL : http://sensitivity-analysis.jrc.ec.europa.eu/tutorial/text_stat_sci.pdf. 34
- Saltelli, A., Tarantola, S., Campolongo, F., et Ratto, M. (2004). *Sensitivity Analysis in Practice – A Guide to Assessing Scientific Models*. John Wiley & Sons. ISBN 978-0470870938, 232 pages. 34
- Office of the Science Advisor, C. f. R. E. M. (2009). Guidance on the development, evaluation, and application of environmental models. Technical report epa/100/k-09/003, US EPA. Disponible à l'URL : http://www.epa.gov/crem/library/cred_guidance_0309.pdf. 34
- Shepler, N. (2001). Developing a hedonic regression model for refrigerators in the U.S. CPI. Rapport technique, Bureau of Labor Statistics, U.S. Department of Labor. Disponible à l'URL : <http://www.bls.gov/cpi/cpirfr.htm>. 24, 25, 26
- Shrivastava, S., Bera, T., Roy, A., Singh, G., Ramachandrarao, P., et Dash, D. (2007). Characterization of enhanced antibacterial effects of novel silver nanoparticles. *Nanotechnology*, 18(22). DOI: 10.1088/0957-4484/18/22/225103. 2
- Song, H. Y., Ko, K., Oh, I., et Lee, B. (2006). Fabrication of silver nanoparticles and their antimicrobial mechanisms. *European Cells and Materials*, 11:58. Suppl. 1. 2, 3

- Treich, N. (2005). L'analyse coût-bénéfice de la prévention des risques. Disponible à l'URL : <http://www.toulouse.inra.fr/lerna/treich/ACB03.pdf>. 1
- Treich, N. (2008). L'analyse coût-bénéfices en 10 questions. Les Cahiers de la Sécurité Industrielle 2008-03, Institut pour une Culture de Sécurité Industrielle, Toulouse, France. ISSN 2100-3874. Disponible à l'URL : http://www.icsi-eu.org/francais/dev_cs/cahiers/CSI-ACB-10-questions.pdf. 1
- Treich, N. (2010). The value of a statistical life under ambiguity aversion. *Journal of Environmental Economics and Management*, 59:15–26. DOI: [10.1016/j.jeeem.2009.05.001](https://doi.org/10.1016/j.jeeem.2009.05.001). 34, 35
- Triplett, J. (2004). Handbook on hedonic indexes and quality adjustments in price indexes : Special application to information technology products. Rapport technique, OECD. Directorate for Science, Technology and Industry working paper 2004/9. Disponible à l'URL : <http://www.oecd.org/dataoecd/37/31/33789552.pdf>. 23
- Triplett, J. et McDonald, R. J. (1977). Assessing the quality error in output measures : The case of refrigerators. *Review of Income and Wealth*, 23(2):137–156. DOI: [10.1111/j.1475-4991.1977.tb00008.x](https://doi.org/10.1111/j.1475-4991.1977.tb00008.x). 24
- Trop, M., Novak, M., Rodl, S., Hellbom, B., Kroell, W., et Goessler, W. (2006). Silver-coated dressing acticoat caused raised liver enzymes and argyria-like symptoms in burn patient. *Journal of Trauma*, 60(3):648–652. 9
- US EPA (2010). Nanomaterial case study : Nanoscale silver in disinfectant spray. External review draft, EPA/600/R-10/081, US EPA. Disponible à l'URL : <http://cfpub.epa.gov/ncea/cfm/recordisplay.cfm?deid=226723>. 7, 8, 36
- Viscusi, W. K. (1998). *Rational Risk Policy – The 1996 Arne Ryde Memorial Lectures*. Oxford University Press. ISBN 9780198293637, 160 pages. 7
- Wijnhoven, S. W. P., Peijnenburg, W., Herberts, C. A., Hagens, W. I., Oomen, A. G., Heugens, E., Roszek, B., Bisschops, J., Gosens, I., van de Meent, D., Dekkers, S., deJong, W. H., van Zijverden, M., Sips, A., et Geertsma, R. (2009). Nano-silver : A review of available data and knowledge gaps in human and environmental risk assessment. *Nanotoxicology*, 3(2):109–138. DOI: [10.1080/17435390902725914](https://doi.org/10.1080/17435390902725914). 8
- Yoona, K.-Y., Byeona, J. H., Parka, J.-H., et Hwang, J. (2007). Susceptibility constants of Escherichia coli and Bacillus subtilis to silver and copper nanoparticles. *Science of the Total Environment*, 373:572–575. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2006.11.007](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.11.007). 19

Reproduction de ce document

Ce document est diffusé selon les termes de la licence **BY-NC-ND** du **Creative Commons**. Vous êtes libres de reproduire, distribuer et communiquer cette création au public selon les conditions suivantes :

- ◇ **Paternité.** Vous devez citer le nom de l'auteur original de la manière indiquée par l'auteur de l'œuvre ou le titulaire des droits qui vous confère cette autorisation (mais pas d'une manière qui suggérerait qu'ils vous soutiennent ou approuvent votre utilisation de l'œuvre).
- ◇ **Pas d'utilisation commerciale.** Vous n'avez pas le droit d'utiliser cette création à des fins commerciales.
- ◇ **Pas de modification.** Vous n'avez pas le droit de modifier, de transformer ou d'adapter cette création.



Vous pouvez télécharger le document (et d'autres versions des *Cahiers de la Sécurité Industrielle*) au format PDF depuis le site web de l'ICSI.



Institut pour une Culture de Sécurité Industrielle

Association de loi 1901

<http://www.icsi-eu.org/>

6 allée Émile Monso – BP 34038
31029 Toulouse cedex 4
France

Téléphone : +33 (0) 534 32 32 00
Fax : +33 (0) 534 32 32 01
Courriel : contact@icsi-eu.org



6 ALLÉE EMILE MONSO
ZAC DU PALAYS - BP 34038
31029 TOULOUSE CEDEX 4
www.icsi-eu.org