

RAPPORT D'ÉTUDE
DRA-13-125500-04148A

10/04/2013

Programme DRA 95

Opération III : Procédés : Nanomatériaux

Benchmark européen des guides de bonnes pratiques et référentiels sur la sécurité liée à la mise en œuvre des nanomatériaux

INERIS

maîtriser le risque |
pour un développement durable |

**Benchmark européen des guides de bonnes pratiques et référentiels sur la
sécurité liée à la mise en œuvre des nanomatériaux**

Direction des Risques Accidentels

Client : Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie

**Liste des personnes ayant participé à l'étude : Guillaume Fayet, Dominique Fleury,
Alexis Vignes**

PREAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

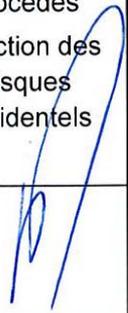
	Rédaction	Vérification			Approbation
NOM	G. FAYET A. VIGNES	P. ROTUREAU	B. DEBRAY	G. CHANTELAUVE	M. DEMISSY
Qualité	Ingénieurs Unité Procédés et Energies Propres et Sûrs Direction des Risques Accidentels	Déléguée Scientifique Direction des Risques Accidentels	Responsable de l'Unité Procédés et Energies Propres et Sûrs Direction des Risques Accidentels	Délégué Appui à l'Administration Direction des Risques Accidentels	Responsable du Pôle Substances et Procédés Direction des Risques Accidentels
Visa					

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	5
2. PROBLEMATIQUE	7
2.1 Risques associés aux nanomatériaux	7
2.2 Rappel réglementaire	7
3. PRESENTATION DES GUIDES	9
3.1 Sélection et panorama des guides étudiés.....	9
3.2 Guides professionnels	10
3.2.1 Guide UIC « Guide de bonnes pratiques - Nanomatériaux et HSE » (France, 2009).....	10
3.2.1.1 Objet du guide	10
3.2.1.2 Structure du guide	10
3.2.1.3 Présentation de quelques points clés du guide	10
3.2.1.4 Bilan	12
3.2.2 Guide VCI « Guidance for Handling and Use of Nanomaterials at the Workplace» (Allemagne, 2007)	13
3.2.2.1 Objet du guide	13
3.2.2.2 Structure du guide	13
3.2.2.3 Présentation de quelques points clés du guide	13
3.2.2.4 Bilan	14
3.3 Normes et guides réglementaires.....	15
3.3.1 Guide BSi « Nanotechnologies - Part 2: Guide to safe handling and disposal of manufactured nanomaterials » (Royaume-Uni, 2007)	15
3.3.1.1 Objet du guide	15
3.3.1.2 Structure du guide	15
3.3.1.3 Présentation de quelques points clés du guide	15
3.3.1.4 Bilan	19
3.3.2 Guide OCDE « Important issues on risk assessment of manufactured nanomaterials » (Europe, 2012)	19
3.3.2.1 Objet du guide	19
3.3.2.2 Structure du guide	20
3.3.2.3 Présentation de quelques points clés du guide	20
3.3.2.4 Bilan	22
3.4 Guides de bonnes pratiques issus d'instituts publics	22
3.4.1 Guide AFSSET « Les nanomatériaux–Sécurité au travail » (France, 2008)	22
3.4.1.1 Objet du guide	22
3.4.1.2 Structure du guide	23
3.4.1.3 Présentation de quelques points clés du guide	23
3.4.1.4 Bilan	27
3.4.2 Guide INRS « Nanomatériaux–Prévention des risques dans les laboratoires » (France, 2012)	28

3.4.2.1	Objet du guide	28
3.4.2.2	Structure du guide	28
3.4.2.3	Présentation de quelques points clés du guide	28
3.4.2.4	Bilan	30
3.5	Guide spécifique à une institution	30
3.5.1	Guide de l'Université de Delft « Nanosafety Guidelines - Preventing exposure to Nanomaterials at the Faculty of Applied Sciences » (Pays-Bas, 2010)	30
3.5.1.1	Objet du guide	30
3.5.1.2	Structure du guide	31
3.5.1.3	Présentation de quelques points clés du guide	31
3.5.1.4	Bilan	32
3.6	Autres documents recensés.....	33
3.6.1	Rapport « Specific Advice on Exposure Assessment and Hazard/Risk Characterisation for Nanomaterials under REACH » (Europe, 2011)	33
3.6.1.1	Description et points clefs.....	33
3.6.1.2	Bilan	33
3.6.2	Rapport EU-OSHA « Workplace exposure to nanoparticles » (Europe, 2009) ...	34
3.6.2.1	Description et points clefs.....	34
3.6.2.2	Bilan	35
3.6.3	FD ISO/TR 13121 « Nanotechnologies - Évaluation des risques associés aux nanomatériaux » (Europe, 2011).....	35
3.6.3.1	Description et points clefs.....	35
3.6.3.2	Bilan	36
3.6.4	Guide HSL «Fire and explosion properties of nanopowders » (Royaume-Uni, 2010)	36
3.6.4.1	Description et points clefs.....	36
3.6.4.2	Bilan	37
3.6.5	Guide FOEN « Fire and explosion properties of synthetic nanomaterials » (Suisse, 2010)	38
3.6.5.1	Description et points clefs.....	38
3.6.5.2	Bilan	39
4.	ANALYSE COMPARATIVE.....	40
4.1	Caractérisation / Métrologie relative aux nanomatériaux	40
4.2	Evaluation / Analyse des Risques.....	41
4.3	Recommandations en termes de maîtrise des expositions (Risque Toxicologique).....	44
4.4	Recommandations en termes de maîtrise des risques physico-chimiques.....	46
4.5	Autres recommandations relatives à la sécurité, la santé et l'environnement.....	47
5.	CONCLUSION	50
6.	REFERENCES.....	52
7.	LISTE DES ANNEXES	53

1. INTRODUCTION

L'évaluation et la maîtrise des risques associés aux nanomatériaux posent de nombreux défis, parmi lesquels :

- le grand nombre de matériaux et d'applications couverts par le terme générique « nanotechnologie » ;
- les connaissances limitées relatives à leurs propriétés physico-chimiques, toxicologiques et éco-toxicologiques ;
- les problématiques de propriétés intellectuelles qui rendent difficile l'accès à l'information ;
- les questions relatives à la catégorisation des nanomatériaux (par exemple l'adoption d'une définition unique pour les nanomatériaux).

Actuellement, les nanomatériaux ne sont pas réglementés de manière spécifique mais ces derniers, comme toute substance chimique, doivent respecter les dispositions réglementaires actuelles (REACH, TMD, Seveso II...). Toutefois, compte tenu des caractéristiques uniques des nanomatériaux, des doutes subsistent quant à la pertinence d'une telle approche.

Afin de donner aux acteurs de la profession des éléments de maîtrise des risques, de renforcer la confiance en ces nouvelles technologies et tenter de résoudre les incertitudes liées au manque de connaissance, des guides et mesures volontaires et des codes de bonne conduite ont été adoptés par les acteurs impliqués.

L'évolution des connaissances sur les dangers des nanomatériaux et sur leurs technologies de mise en œuvre est permanente et très rapide. Il est par conséquent important de suivre régulièrement le développement des nouveaux guides de bonnes pratiques et référentiels sur la sécurité liée à la mise en œuvre des nanomatériaux qui sont le reflet de l'évolution des connaissances.

Ce rapport se propose donc de faire un état des lieux des guides de bonnes pratiques pour la maîtrise des risques liés à la production et la mise en œuvre des nanomatériaux au niveau européen. Cela permettra de dresser un bilan des approches et recommandations actuellement disponibles dans les guides accessibles aux industriels pour la mise en œuvre des diverses étapes d'une démarche intégrée de maîtrise des risques :

- caractérisation des dangers ;
- évaluation des risques ;
- maîtrise des expositions ;
- maîtrise des risques accidentels ;
- mesure de l'efficacité de cette maîtrise.

Une attention particulière sera portée sur la mise en avant des informations et recommandations disponibles dans ces guides pour la maîtrise des risques accidentels. Il sera en particulier regardé s'ils apportent des éléments de réponse aux questions suivantes :

- permettent-ils d'identifier des scénarios accidentels ?
- apportent-ils des informations sur la caractérisation des dangers impliqués dans des scénarios accidentels (en particulier sur les dangers d'incendie et d'explosion, la toxicité aigue ou les propriétés relatives au comportement en dispersion).
- proposent-ils une approche d'analyse des risques prenant en compte des situations accidentelles ?

2. PROBLEMATIQUE

2.1 RISQUES ASSOCIES AUX NANOMATERIAUX

Les particules de tailles nanométriques présentent des propriétés améliorées voire non-observées sur le même matériau à l'état massif ou pour des tailles micrométriques. De ce fait, ils représentent un moyen d'accéder à des fonctionnalités nouvelles ou augmentées.

Mais, ces matériaux aux propriétés spécifiques posent également des problèmes en termes de risque pour l'homme et l'environnement. En effet, du fait notamment de leurs surfaces spécifiques élevées, ils sont susceptibles de présenter des réactivités plus importantes avec un environnement biologique et de présenter des dangers accrues en termes d'explosivité ou d'inflammabilité.

Les préoccupations principales en termes de dangers se sont jusque-là concentrées sur les propriétés toxiques des nanoparticules, notamment du fait de l'analogie avec l'amiante dans le cas des nanoparticules fibreuses telles que les nanotubes de carbone. Néanmoins, leur caractère pulvérulent implique également des problèmes de sécurité (inflammabilité, explosivité). Se pose alors la question de la caractérisation des nanomatériaux et de leurs propriétés dangereuses (toxicologiques, éco-toxicologiques et physico-chimiques) et de la maîtrise des risques qui leur sont associés.

2.2 RAPPEL REGLEMENTAIRE

En 2011, un bilan du contexte réglementaire associé aux nanomatériaux a été réalisé dans le cadre du programme DRA 95 (Ref. DRA-11-116552-13416A). En 2012, la demande de réglementation demeure toujours importante compte tenu des incertitudes liées à l'utilisation et à la production des nanomatériaux.

Au niveau européen, de nouvelles dispositions concernant la nécessité d'identifier et de déclarer les nanomatériaux vont entrer prochainement en vigueur (directive cosmétiques, directive sur l'information des consommateurs sur les denrées alimentaires et directive biocide sous peu). En ce qui concerne SEVESO II, hormis une réflexion d'ordre général par C.Pistner du Öko-Institut (Darmstadt, Allemagne) au workshop ÖEKOPOL en 2009 (Hambourg), la seule recommandation actée de l'UE à l'heure actuelle est extraite de la communication de la commission au parlement européen sur les aspects réglementaires des nanomatériaux (COM(2008) 366 SEC(2008) 2036) : « S'il apparaît que certains nanomatériaux présentent un risque d'accident majeur, il est possible, dans le cadre de la directive, de les classer par catégorie et de leur adjoindre des seuils appropriés. »

En dehors de la France et de son décret n° 2012-232 du 17 février 2012 relatif à la déclaration annuelle des substances à l'état nanoparticulaire, la position la plus répandue au sein des différentes autorités européennes est que la législation existante est adaptée aux nano-objets, bien que de nombreux travaux demeurent nécessaires en ce qui concerne le développement d'outils et de protocoles expérimentaux adaptés pour la caractérisation des nanoproducts. Les ONGs considèrent toutefois cette approche comme insuffisante compte tenu des incertitudes existantes.

Au niveau français, de nombreuses réflexions ont lieu, notamment dans le cadre du Club de Nanométrie animé par le LNE et rassemblant industriels, chercheurs et institutionnels, afin d'essayer de répondre à la question « comment caractériser les nanomatériaux afin de répondre aux exigences posées par le décret ? ».

Afin de progresser dans les réponses à apporter, le CEN/TC 352 a également lancé un appel à experts pour mener la conception de guides techniques pour caractériser les nanoparticules, appel auquel l'INERIS a participé.

Enfin, on notera qu'au niveau international, si la France met en œuvre un régime de déclaration obligatoire des nanomatériaux sur le marché, des actions similaires sont en cours d'examen au Canada et en Australie et des discussions sont en cours également entre la France, l'Italie et la Belgique. D'autres pays continuent à utiliser des systèmes de déclaration volontaire, comme en témoignent les initiatives en cours en Irlande, au Japon et en Corée.

Il n'y a pas actuellement de position commune et l'avenir devra laisser une place importante à une harmonisation internationale des différentes approches, du moins dans leur principe, afin de pouvoir apporter une réponse efficace aux attentes dans le domaine de la sécurité pour les travailleurs, les populations et l'environnement.

En attendant le développement d'une réglementation adaptée, la meilleure approche semble passer par le développement de normes et guides de bonnes pratiques. Dans cette optique de nombreux travaux sont en cours, tant à l'INERIS qu'à l'étranger.

Afin de pouvoir faire bénéficier l'industrie des meilleures pratiques actuelles en matière de sécurisation des travailleurs et de l'outil industriel de manière plus générale, il nous est apparu important de réaliser un benchmark des différentes approches actuelles afin de mettre en avant les recommandations actuelles qui permettront de soutenir le développement durable de ce secteur et son passage du stade recherche/pré-industriel au stade industriel.

3. PRESENTATION DES GUIDES

3.1 SELECTION ET PANORAMA DES GUIDES ETUDIÉS

De nombreux guides de bonnes pratiques et autres documents fournissant des bonnes pratiques de manipulation pour la mise en œuvre de nanomatériaux existent sur le plan international. L'Annexe 1 dresse une liste non exhaustive de ces documents. Compte tenu de leur nombre et de leur pertinence relative, il n'est pas utile de les examiner tous. Nous avons sélectionné les guides pertinents en se basant respectivement sur :

- notre retour d'expérience en la matière, notamment acquis grâce aux travaux menés en 2010 et 2011^{1,2} ;
- notre retour d'expérience au niveau des projets européens (NANOSAFE 2, SAPHIR, MARINA notamment)
- une revue plus large réalisée au travers d'une recherche bibliographique

Nous avons enfin sélectionné les guides qui couvraient au mieux nos critères d'intérêts (dangers physico-chimiques, transport, déchets, accidents, métrologie...). Dans le cadre du présent rapport, les guides européens ont été examinés.

Ainsi, une sélection de 7 guides a été réalisée avec pour objectif de présenter un panorama représentatif en termes de types d'activités concernées (industriels/laboratoires), de la nature des personnels visés et des aspects traités, Cette sélection a été complétée par 5 documents d'intérêts, qui ne sont pas à proprement parler des guides, mais qui apportent des informations originales sur les risques accidentels notamment.

Cette sélection comprend deux guides issus d'organisations professionnelles (UIC, VCI), deux guides reliés à un contexte normatif ou réglementaire (BSi, OCDE), deux guides mis en place par des organismes de santé publique (AFSSET et INRS) et un guide spécifique aux pratiques d'une institution particulière (Université de Delft). A ces guides, s'ajoutent les rapports du HSL et du FOEN portant sur la caractérisation des dangers physico-chimiques des nanomatériaux, le rapport technique FD ISO/TR 13121 qui fournit une approche pour l'évaluation des nanomatériaux en lien avec leur degré de maturité industrielle, ainsi que deux revues de bonnes pratiques (rapport RIP-oN3 et rapport EU-OSHA).

Cette sélection permettra d'identifier les informations que peuvent retirer les industriels et ainsi mettre en évidence les bonnes pratiques communément retenues dans ces guides.

¹ Annexe 3 « Panorama des actions européennes et internationales » du rapport DRA 95 IIIA 2010 (Ref. : Vignes A., Etude de l'impact des propriétés physico-chimiques des nanoparticules sur la réglementation, DRA-10-111994-12146A, 2010)

² Vignes A., Bilan du contexte réglementaire associé aux nanomatériaux en 2011, DRA-11-116552-13416A, 2012

3.2 GUIDES PROFESSIONNELS

3.2.1 GUIDE UIC « GUIDE DE BONNES PRATIQUES - NANOMATERIAUX ET HSE » (FRANCE, 2009)

3.2.1.1 OBJET DU GUIDE

Ce guide, intitulé « Guide de bonnes pratiques - Nanomatériaux et HSE », a été réalisé sous l'égide de l'Union des Industries Chimiques (UIC) et de la Fédération Française pour les sciences de la Chimie (FFC) par un groupe de travail incluant des industriels (Arkema, BASF, Rhodia, Solvay).

Son objectif est de diffuser au sein de l'industrie chimique française des bonnes pratiques pour l'évaluation et la maîtrise des risques aux postes de travail mettant en œuvre des nanomatériaux en focalisant sur les dangers toxicologiques des nanomatériaux.

3.2.1.2 STRUCTURE DU GUIDE

Ce guide recueille les informations nécessaires à la prévention des risques associés aux postes de travaux mettant en œuvre des nanomatériaux. En particulier, il traite des points suivants :

- définitions des termes relatifs aux nano-objets,
- règles générales relatives à la sécurité et la santé au travail,
- collecte des informations utiles à l'évaluation des dangers des nanomatériaux,
- caractérisation des expositions,
- caractérisation des risques et mesures de protection,
- documentation et traçabilité.

3.2.1.3 PRESENTATION DE QUELQUES POINTS CLES DU GUIDE

Risques pris en considération :

Le guide considère principalement les dangers toxicologiques associés aux nanomatériaux et recommande de prendre en compte des expositions potentielles par inhalation, par ingestion et par voie cutanée (même si l'exposition par inhalation est la plus probable). Il est également mentionné que les risques d'incendie et d'explosion sont à considérer pour les poussières ultrafines et les matières combustibles mais aucun détail n'est proposé sur leur prise en compte.

Recueil d'informations :

Le guide recommande la collecte des profils toxicologiques disponibles et des données physico-chimiques accessibles en lien avec la toxicologie (composition élémentaire, taille et morphologie, propriétés physiques générales et propriétés de surface) pour le nanomatériau et/ou son parent, sachant que les nanomatériaux présentent potentiellement des dangers supérieures au matériau parent.

Les moyens expérimentaux disponibles pour acquérir ces données ne sont pas mentionnés mais il est indiqué que des informations peuvent être fournies par les fiches de données de sécurité, des guides, des données bibliographiques ou d'autres documents techniques.

Au niveau de l'exposition, il est important de prendre en compte le procédé mis en jeu au poste de travail ainsi que les tâches annexes (stockage, transport, transfert et élimination des déchets). Il faut prendre en compte les spécificités des procédés comme la quantité de matériau mise en œuvre, la possibilité d'émission de nanopoudre au cours du procédé ainsi que les équipements en place réduisant la probabilité d'exposition (systèmes de confinement, équipements de protection collective et individuelle, modes opératoires). La durée et la fréquence des opérations est également à prendre en compte.

Le recours à la mesure sur site est recommandé même si elle comporte des difficultés techniques pour l'obtention de données fiables et précises.

Evaluation des risques :

L'évaluation des risques peut suivre les mêmes étapes qu'une évaluation des risques classiques mise à part la prise en compte du danger propre aux nanoparticules qui doit être réalisée au cas par cas, en fonction des connaissances actuelles puis actualisée selon l'acquisition de nouvelles données.

Pour cette évaluation, le guide recommande l'intervention d'un groupe pluridisciplinaire d'experts (hygiénistes, toxicologues, médecins, etc.).

Les nanomatériaux présentent potentiellement des dangers supérieures au matériau parent. Le guide recommande donc d'affecter un niveau de danger plus élevé pour les nanomatériaux que pour leurs matériaux parents.

De plus, étant donné la difficulté d'obtention de mesures de l'exposition, le guide recommande l'application des mesures de prévention les plus conservatives possibles en s'appuyant sur des méthodes telles que le control banding appliquées sur la base du jugement d'expert en présence de données scientifiques.

Recommandations en termes de maîtrise des expositions :

Concernant la maîtrise des expositions, le guide fournit des recommandations générales en termes d'équipements :

- systèmes de confinement des installations ;
- équipements de protection collective pour capter, limiter et éliminer les émissions, si possible à la source, filtration de l'air extrait avant rejet dans l'atmosphère extérieur ;
- modes opératoires, procédures et techniques de manipulation afin d'éviter la formation de poussières ou d'aérosols, maintenance des dispositifs d'extraction ;
- équipements de protection individuelle (recommandés en dernier recours après avoir exploré l'ensemble des moyens techniques, collectifs et organisationnels) :
 - équipement de protection respiratoire (EPR), en particulier des équipements à pression positive (appareil filtrant à ventilation assistée équipé de filtres TH3P ou TM3P) ;
 - appareils de protection respiratoire à pression négative (type Pièce Faciale Filtrante FFP3 ou masque équipé d'un filtre P3), pour tâches courtes à faible exposition ;
 - port de gants, lunettes avec protection latérales, vêtements de protection.

- autres préconisations en vue de la réduction des risques :

Parmi les recommandations fournies par le guide pour réduire les risques, l'option de la substitution est proposée via le remplacement de la substance ou du procédé, la modification du procédé (ex : mise en œuvre en phase liquide) ou la modification de la forme physico-chimique : dispersion dans des résines ou polymères

En termes de mesures organisationnelles, le guide recommande les mesures suivantes :

- information des travailleurs sur les propriétés dangereuses des substances manipulées et sur les démarches mises en place pour sa protection vis-à-vis des risques associés à ces produits ;
- réduction du nombre d'opérateurs intervenant à ces postes de travail et en restreindre l'accès ;
- nettoyage régulier à l'aide de matériel adapté (aspirateurs HEPA, pour « *High Efficiency Particulate Air Filter* »), maintenance des équipements de ventilation et de captage ;
- utilisation d'équipements et vêtements de travail distincts ;
- suivi médical adapté ;
- documentation, traçabilité et mise à jour des informations.

3.2.1.4 BILAN

Ce guide a été rédigé par des industriels pour des industriels. Il a une bonne visibilité du fait de son lien avec l'UIC.

Le guide fournit des indications concernant les équipements de protection pouvant être employés pour limiter les expositions, même s'il est recommandé de les attribuer sur la base d'un jugement d'expert.

Il ne fournit pas de méthode d'analyse des risques et recommande le recours à des experts pour l'évaluation des risques. Seules des indications générales sur l'évaluation des risques et sur la difficulté de l'évaluation du danger des nanomatériaux sont fournies.

Risques accidentels :

Le guide s'intéresse principalement aux risques chroniques et ne s'intéresse donc pas directement aux risques accidentels. Il ne fournit donc pas d'information relative à l'identification de scénarios accidentels.

Les risques d'incendie et d'explosion sont mentionnés, mais ils ne sont pas détaillés. De même, il ne fait que citer les dangers pour l'environnement dans son introduction. Au niveau de la toxicité des poudres, seule l'exposition chronique est considérée. La toxicité aiguë n'est pas considérée. Enfin, aucune information n'est fournie concernant les propriétés relatives au comportement en dispersion des poudres nanométriques.

L'approche d'analyse des risques proposée par le guide est focalisée sur l'exposition chronique des travailleurs au poste de travail (par Control Banding) et ne tient pas compte des scénarios accidentels.

3.2.2 GUIDE VCI « GUIDANCE FOR HANDLING AND USE OF NANOMATERIALS AT THE WORKPLACE» (ALLEMAGNE, 2007)

3.2.2.1 OBJET DU GUIDE

Le guide « Guidance for Handling and Use of Nanomaterials at the Workplace » a été publié en août 2007 à partir des conclusions issues d'une revue des pratiques au sein de l'industrie chimique allemande. Rédigé sous l'égide de l'association allemande des industries chimiques (VCI, pour Verband der Chemischen Industrie) et de l'institut fédéral allemand de santé et sécurité au poste de travail (BAuA pour Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin), il a pour vocation d'établir les bonnes pratiques à suivre aux postes de travail mettant en œuvre des nanomatériaux.

3.2.2.2 STRUCTURE DU GUIDE

Le guide est structuré comme suit :

- introduction du contexte, définitions et présentation des procédés de production de nanomatériaux ;
- principes généraux concernant la santé et la sécurité au poste de travail ;
- recommandations relatives à la protection des travailleurs pour la mise en œuvre des nanomatériaux ;
- état des lieux des techniques disponibles et développements en termes de méthodes de mesure des nanomatériaux ;
- annexe relative à l'évaluation des risques mis en jeu par les nanomatériaux (par inhalation) au poste de travail.

3.2.2.3 PRESENTATION DE QUELQUES POINTS CLES DU GUIDE

Risques pris en considération :

Dans ce guide, les risques toxicologiques sont considérés de manière approfondie alors que ceux pour l'environnement ne sont pas cités. Les risques physico-chimiques sont eux mentionnés comme à prendre en compte pour les matériaux oxydables, mais aucun détail n'est fourni quant à la marche à suivre. Notons néanmoins que ces derniers sont considérés comme à regarder de manière prioritaire dans l'évaluation des risques.

Métrologie :

Un des intérêts majeurs de ce guide réside dans la place réservée à la métrologie. En effet, des recommandations détaillées sont fournies concernant les dispositifs expérimentaux pouvant être utilisés pour caractériser les propriétés des nanomatériaux. Ainsi, les équipements cités sont :

- le compteur de particules par condensation (CPC pour *Condensation Particle Counter*) utilisé pour la mesure de la concentration en nombre de particules à l'échelle nanométrique. Il est donc souvent couplé à un instrument permettant d'accéder aux distributions en taille des particules comme un spectromètre de mobilité électrique (SMPS pour *Scanning Mobility Particle Sizer*) ;

- la spectrométrie de masse aérosol (AMS³) peut être utilisée pour l'analyse des particules et agrégats de taille supérieure à 100 nm. Un microscope électronique à transmission (TEM) permettra alors de caractériser la taille, la morphologie et la structure des particules. Un couplage avec une analyse dispersive en énergie donnera également accès à des informations semi-quantitatives concernant leur distribution spatiale ;
- l'échantillonneur d'aérosols à gamme nanométrique (NAS pour *Nano-Aerosol Sampler*) permettant de séparer les particules dans un domaine de taille compris entre 2 et 100 nm qui peut être combiné également à de l'analyse dispersive en énergie.

Les méthodes de caractérisation proposées sont relativement complexes et emploient des équipements stationnaires. Elles ne sont donc pas utilisables en routine. De plus, elles ne sont pas encore validées et standardisées.

Il est également à noter que le guide insiste sur les limites des mesures de concentrations en masse qui n'ont qu'une valeur limitée car la masse totale des nanoparticules est très faible par rapport à celle des particules de tailles supérieures. De même, il indique également l'insuffisance de la caractérisation via la fraction respirable pourtant employée de manière assez généralisée.

Enfin, lors de la réalisation de mesures d'émission engendrées par les activités au poste de travail, il est important de prendre en compte le bruit de fonds, c'est-à-dire les particules provenant d'autres sources.

3.2.2.4 BILAN

Ce guide a été rédigé à partir du retour d'expérience des industriels de la chimie en Allemagne. Il prend donc particulièrement en compte les problématiques auxquelles ces derniers sont confrontés. Il s'agit d'un document de référence qui est cité par de nombreux autres guides et documents à l'échelle internationale.

Une particularité de ce document réside dans les recommandations formulées quant à la métrologie qui sont plus détaillées que dans la plupart des autres guides de bonnes pratiques.

Il ne fournit que quelques recommandations quant aux équipements de protection collective. Plus de détails sont fournis concernant les équipements de protection individuels.

Risques accidentels :

Ce guide s'intéresse uniquement au poste de travail et à son fonctionnement normal. Les scénarios accidentels ne sont donc pas considérés. Il s'intéresse principalement aux risques toxicologiques liés à des expositions chroniques. Il ne traite pas du risque pour l'environnement et ne fait que mentionner les risques physico-chimiques liés aux nanomatériaux ou à la caractérisation de leur dispersion. Les recommandations relatives à l'évaluation des risques sont générales sur la marche à suivre, mais ne fournissent pas une description complète de l'analyse à mener. Les situations accidentelles ne sont pas intégrées dans la démarche.

³ Hartonen, K., Laitinen, T. & Riekkola, M.-L. Current instrumentation for aerosol mass spectrometry. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 30, 1486–1496 (2011).

3.3 NORMES ET GUIDES REGLEMENTAIRES

3.3.1 GUIDE BSI « NANOTECHNOLOGIES - PART 2: GUIDE TO SAFE HANDLING AND DISPOSAL OF MANUFACTURED NANOMATERIALS » (ROYAUME-UNI, 2007)

3.3.1.1 OBJET DU GUIDE

En 2007, le British Standards a mis en place deux guides relatifs aux nanomatériaux. Le premier concerne la spécification des nanomatériaux manufacturés et s'intéresse aux caractéristiques ayant une influence sur leurs performances et leur mise en œuvre dans les procédés.

Le second est un guide relatif à la manipulation sûre des nanomatériaux. Il propose des recommandations concernant l'évaluation des risques, la maîtrise des expositions, la métrologie, la protection contre l'incendie et l'explosion, la gestion des déchets et la prise en compte des risques de chute et de fuite accidentelle. Cette deuxième partie a donc été prise en considération dans la présente étude.

3.3.1.2 STRUCTURE DU GUIDE

La deuxième partie du guide est structurée comme suit :

- généralités sur les nanomatériaux et leurs caractéristiques, sur les risques relatifs à l'exposition à ces nanomatériaux et sur la gestion de ces risques,
- identification et compétence des personnels conduisant l'évaluation des risques ; collecte d'information ; évaluation des risques,
- mesures de maîtrise des expositions,
- suivi de santé,
- méthodes de mesure des expositions,
- chutes et fuites accidentelles,
- procédures relatives à la gestion des déchets,
- prévention contre les risques d'incendie et d'explosion.

3.3.1.3 PRESENTATION DE QUELQUES POINTS CLES DU GUIDE

Mécanismes associés aux dangers des nanoparticules

Quatre types de dangers associés aux nanoparticules sont mis en évidence dans le guide BSi :

- toxicité par inhalation ;
- toxicité par voie cutanée ;
- toxicité par ingestion ;
- incendie et explosion.

Du fait du peu d'informations disponibles sur les propriétés explosives et la toxicité des nanomatériaux, il convient de considérer tous les nanomatériaux comme dangereux tant que l'information suffisante n'est pas disponible pour prouver le contraire.

Evaluation du danger :

Selon le guide, le principal risque à prendre en compte est le risque d'exposition par inhalation même si les risques d'exposition cutanée, par ingestion et les risques d'incendie et d'explosion sont à considérer.

Le guide suggère des valeurs limites d'exposition en fonction des quatre catégories de matériaux. Néanmoins, ces propositions n'ont vocation à être utilisées qu'à titre indicatif et non comme élément de validation quantitative pour la sécurité des postes de travail.

Quatre catégories de nanomatériaux sont mises en évidence :

- fibreux : nanomatériaux insolubles avec un rapport de forme élevé ;
 - 0,01 fibres/ml dans l'air⁴ ;
- CMR : nanomatériaux dont le matériau parent est déjà classé comme cancérigène, mutagène, sensibilisant et reprotoxique ;
 - 0,1 x VLE du matériau parent ;
- insolubles : nanomatériaux insolubles ou faiblement solubles non fibreux ou CMR ;
 - TiO₂ fin (diamètre > 1 µm) : 1,5 mg/m³, TiO₂ ultrafine : 0,1 mg/m³.⁵
- sans information supplémentaire : 0,066 x VLE parent ;
- solubles : autres nanomatériaux.
 - 0,5 x VLE du matériau parent.

Il est, quoi qu'il arrive, à considérer que les matériaux sont potentiellement plus dangereux à l'échelle nanométrique qu'à des tailles supérieures.

Evaluation de l'exposition :

La caractérisation de l'exposition inclut les informations relatives :

- aux tâches mises en œuvre (production, maintenance, nettoyage, transport, stockage) ;
- aux personnels exposés ;
- aux voies d'exposition (inhalation, ingestion, exposition cutanée) ;
- à la probabilité d'exposition en situation normale, accidentelle ou en phase de maintenance ;
- fréquence de l'exposition potentielle ;
- durée et niveau de l'exposition ;
- aux emplacements soumis à exposition potentielle (air ambiant, surfaces de travail, autres) ;
- aux dispositifs pouvant être appliqués pour séparer les personnels de la source.

De plus, l'évaluation des expositions s'appuiera sur les données de mesures disponibles, par exemple au poste de travail.

⁴ par analogie aux recommandations relatives à l'amiante

⁵ Current Intelligence Bulletin: Evaluation of Health Hazard and Recommendations for Occupational Exposure to Titanium Dioxide, NIOSH, 2005

Maîtrise des expositions :

Le guide propose une hiérarchie des mesures disponibles pour limiter l'exposition des travailleurs, en prenant en compte les informations issues de l'évaluation des risques au poste de travail :

- élimination de la substance dangereuse ou du procédé à l'origine de l'exposition ;
- substitution de la substance dangereuse ou du procédé à l'origine de l'exposition ;
- confinement des opérations dans lesquelles le nanomatériau est délibérément libéré dans l'air ;
- mesures techniques de maîtrise des expositions (ex : dispositifs d'extraction) avec maintenance régulière et non recyclage de l'air extrait sans purification complète ;
- mesures organisationnelles par la mise en place de modes opératoires, la réduction du nombre de personnels exposés et les durées passées sur les procédés à l'origine d'expositions, l'information du personnel et le nettoyage des installations.
- équipements de protection individuels qui constituent la dernière option à considérer :
 - protection contre l'exposition par inhalation à l'aide d'équipements de protection respiratoire : masques à dispositifs filtrants (équipés de filtres haute performance P3 ou FFP3) et autres vêtements de protection ;
 - protection contre l'exposition cutanée à l'aide de gants et de lunettes de protection.

Métrologie

L'échantillonnage et la mesure sont des informations particulièrement utiles qui permettent de mieux appréhender l'exposition et les scénarios à risques aux postes de travail. En effet, elles permettent d'identifier les sources d'émission, d'évaluer l'efficacité des barrières, de s'assurer de la conformité vis-à-vis des valeurs limites d'exposition et l'identification des faiblesses et détériorations des mesures de contrôle.

Le guide fournit une liste d'équipements de mesures directes et indirectes de concentrations en nombre, masse et surface (en accord avec la norme ISO TR 27628 :2007 relative à la caractérisation de l'exposition par inhalation aux poudres ultrafines, nanoparticules et aérosols nanostructurés et les recommandations du NIOSH⁶). Les équipements proposés sont :

- pour les mesures en nombre :
 - directes : Condensation particle counter (CPC), Differential mobility particle sizer (DMPS), Electron Microscopy (SEM, TEM) ;
 - indirectes : Electrostatic low pressure impactor (ELPI)
- pour les mesures en masse :
 - directes : Size selective static sampler, Tapered element oscillating microbalance (TEOM) ;
 - indirectes : ELPI, DMPS ;

⁶ Approaches to Safe Nanotechnology : An Information Exchange with NIOSH, NIOSH, 2007

- pour les mesures en surface :
 - directes : Diffusion chargeur, ELPI, SEM, TEM ;
 - indirectes : DMPS, DMPS/ELPI en parallèle.

Ces mesures présentent certaines limites concernant les plages de mesures dans lesquelles elles sont applicables ou concernant la concentration ambiante qui peut être élevée.

Chutes et dispersions accidentelles :

Le guide propose des recommandations générales concernant les procédures à suivre en cas de renversement ou de dispersions accidentelles de nanomatériaux :

- délimitation des zones touchées et leur nettoyage
- phases de nettoyages réalisées par des personnels entraînés pour ces opérations et munis d'équipements de protection individuels, en faisant en sorte de limiter au mieux l'exposition des personnels.

Stockage et destruction :

Des recommandations sont fournies pour le stockage et la destruction des nanomatériaux purs, des objets contaminés (contenants, EPIs), des suspensions liquides contenant des nanomatériaux et des matrices solides chargées en nanomatériaux friables ou susceptibles d'émettre ces derniers.

Ces matériaux et substances doivent être collectés et stockés dans des containers à déchets dédiés ou dans des sacs plastiques scellables. Leur destruction est réalisée selon les protocoles exigés pour les substances dangereuses.

Prévention contre les risques d'incendie et d'explosion :

L'efficacité des moyens employés pour la protection des risques d'incendie, d'explosion et de réactivité est encore à valider pour le cas des nanoparticules. De plus, le passage à l'échelle nano est susceptible d'induire un danger accru.

Le guide recommande l'utilisation de moyens de protection contre l'explosion identiques au cas des poussières de taille supérieures. L'emploi de chaussures antistatiques est suggéré afin de limiter le risque d'inflammation du matériau.

Concernant la réactivité, une attention particulière doit être portée aux substances incompatibles. Ceci peut avoir également une implication sur le choix de l'agent d'extinction à employer en cas d'intervention.

Les mesures de protections relatives à l'incendie doivent être mises en œuvre dans le cas de particules combustibles. De même, le risque d'auto-inflammation des nanoparticules doit être à considérer.

3.3.1.4 BILAN

Ce guide est issu du British Standards qui est un comité normatif. Son impact sur l'industrie britannique est donc important et présente une forte légitimité en tant que référence qui est citée par de nombreux autres guides et documents à l'échelle internationale, même s'il ne s'agit pas à proprement parler d'une norme.

Une particularité de ce document réside dans les recommandations formulées quant à la métrologie qui sont plus détaillées que dans la plupart des autres guides recensés. De plus, il fournit des bonnes pratiques quant au stockage et la destruction de ces matériaux

Les recommandations quant aux équipements de protection collective sont générales. Par contre, des équipements de protection individuels sont proposés avec des spécifications plus détaillées.

Les recommandations relatives à l'évaluation des risques sont générales sur la marche à suivre, mais ne fournissent pas une description complète de l'analyse à mener.

Risques accidentels :

Le guide propose des recommandations concernant les situations accidentelles de chutes et de dispersions accidentelles, sans pour autant faire de recommandation quant à la prise en compte de tels évaluation dans l'évaluation des risques associés à la mis en œuvre des nanomatériaux.

Les dangers d'incendie et d'explosion sont présentés comme des risques à prendre en compte de manière approfondie, même si le guide fournit peu de recommandations spécifiques (comparé au traitement de poudres de tailles supérieures), mise à part la remarque faite sur la difficulté posée par l'invisibilité d'un nuage de nanoparticules dispersées.

3.3.2 GUIDE OCDE « IMPORTANT ISSUES ON RISK ASSESSMENT OF MANUFACTURED NANOMATERIALS » (EUROPE, 2012)

3.3.2.1 OBJET DU GUIDE

L'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) a publié en 2012, le 33^{ème} rapport de la série sur la sécurité des nanomatériaux manufacturés. Ce rapport, intitulé « Important Issues on Risk Assessment of Manufactured Nanomaterials » a été élaboré par le groupe de pilotage SG6 du groupe de travail de l'OCDE sur les nanomatériaux. Les bases de ce document ont été initialement présentées lors de la 4^{ème} réunion du WPMN en 2008 (voir le rapport OCDE « Risk Assessment of the manufactured Nanomaterials : critical issues »). En septembre 2009, un nouveau workshop a eu lieu à Washington, aux Etats-Unis, afin de fournir des avis d'experts aux questions essentielles spécifiques à l'évaluation des risques des nanomatériaux dans un contexte réglementaire et de fournir des informations utiles pour la révision du projet de rapport présenté en 2008. Les commentaires et suggestions collectés à l'issue de cette réunion ont été débattus lors de la 9^{ème} réunion du WPMN en décembre 2011. Le titre du document a d'ailleurs été modifié à cette occasion (« critical issues » est devenu « important issues »). Le présent rapport, publié en 2012, n'est donc pas en soi un nouveau document mais plutôt un document synthétisant

les derniers échanges ayant eu lieu au sein de l'OCDE sur la question de l'évaluation des risques des nanomatériaux. Compte tenu de l'évolution rapide des connaissances, ce document « vivant »⁷ doit être considéré comme une compilation systématique des opinions et recommandations pour l'évaluation des risques liés aux nanomatériaux. Centré sur les risques d'exposition pour l'homme et l'environnement, ce rapport propose également des pistes de recherche complémentaires afin de réduire les incertitudes actuelles.

3.3.2.2 STRUCTURE DU GUIDE

Ce rapport est structuré comme suit :

- introduction
- connaissances préexistantes
- évaluation des risques des nanomatériaux : aspects importants
- évaluation des risques : approches et stratégies actuelles
- besoins actuels en recherche pour pouvoir évaluer les risques associés

3.3.2.3 PRESENTATION DE QUELQUES POINTS CLES DU GUIDE

Ce document est essentiellement à destination d'un public de spécialistes, avec de multiples recommandations, reflétant les réflexions issues du collège de spécialistes à son origine. On retiendra en particulier que ce rapport synthétise principalement les pratiques actuelles et les défis que soulève l'évaluation des risques liés aux nanomatériaux et résume également les stratégies actuelles d'évaluation des risques lorsque les données manquent. Il fait enfin des propositions concrètes afin de développer des pistes de recherche dans le domaine.

Dans le cadre des évaluations de risques des produits chimiques, la plupart des pays considèrent que pour pouvoir identifier correctement les principaux dangers, il faut déterminer respectivement :

- les propriétés physico-chimiques (ex : point de fusion / point d'ébullition, densité relative, pression de vapeur, solubilité dans l'eau, inflammabilité, coefficient de partage (n-octanol/eau), état physique)
- les propriétés toxicologiques (ex : irritation cutanée, irritation des yeux, sensibilisation cutanée, mutagénicité, études de toxicité aiguë, court ou long terme répété étude de toxicité dose, reprotoxicité...)
- les propriétés écotoxicologiques (ex : biodégradabilité, bioconcentration, essais de toxicité aquatique, effets sur les organismes terrestres...)

En absence de données, des jugements qualitatifs pourraient potentiellement être faits sur la base de la connaissance du matériau parent non nanométrique.

⁷ Il est notamment rappelé par le groupe de travail que ce document ne vise pas à privilégier des méthodes ou stratégies spécifiques au détriment d'autres approches, mais est un document non figé, amené à évoluer avec le temps, à mesure du développement de nouvelles connaissances.

NB : Certains nanomatériaux sont sur le marché depuis plus de 50 ans (ex. : forme nanoparticulaire de l'argent). On ne peut cependant pas utiliser le retour d'expérience dans le domaine de sécurité de manière simple car :

- les formulations ne sont pas forcément les mêmes ;
- les procédés ont pu être modifiés ;
- les techniques d'analyse ont évolué ainsi que leur précision.

Le résultat d'aujourd'hui n'est pas forcément comparable au résultat d'hier.

Les principaux points à retenir sont respectivement :

- les approches classiques d'évaluation des risques pour les produits chimiques peuvent continuer à être appliquées pour les nanomatériaux, il n'y a pas de changements fondamentaux envisagés à l'heure actuelle ;
- comme dans toute évaluation des risques, l'extrapolation de l'évaluation des risques du matériau parent aux nanomatériaux devrait être fondée sur des données scientifiques a minima ;
- bien qu'une approche classique d'évaluation des risques puisse être adaptée au cas de nanomatériaux, il est nécessaire de poursuivre des actions de recherche afin de déterminer les caractéristiques spécifiques des nanomatériaux pouvant présenter des risques ;
- il est admis qu'il reste de nombreuses incertitudes concernant les unités de mesure (c'est-à-dire les métriques) utilisées pour générer les résultats des tests utilisés dans l'évaluation des risques.

Dans le domaine de l'exposition des travailleurs, des populations et de l'environnement, il est nécessaire de porter les efforts sur :

- la génération de données de base pour les travailleurs, les consommateurs et l'environnement à différentes étapes du cycle de vie des nanomatériaux ;
- la détermination des mécanismes de transfert des nanomatériaux dans les différents milieux de l'environnement en fonction des propriétés des nanomatériaux ;
- l'amélioration et/ou le développement des moyens de mesure des nanomatériaux aux postes de travail et dans l'environnement ;
- le développement des moyens de modélisation ;
- l'identification des scénarios d'exposition des populations ainsi que leur probabilité.

En ce qui concerne l'évaluation des effets sur la santé humaine, les efforts doivent porter sur :

- la génération de bases de données structurées afin de faciliter la modélisation QSAR /QSPR ;
- la compréhension de l'influence des propriétés des nanomatériaux sur leur cinétique de transfert dans les organismes ;
- la détermination des propriétés toxicologiques des nanoparticules ;
- la validation des méthodes de tests in vitro ;
- le développement des approches épidémiologiques et des techniques de suivi médical ;

Enfin, afin d'appréhender les effets sur l'environnement, il apparaît nécessaire de :

- évaluer si les études classiques menées en éco-toxicologie permettent de fournir des résultats pertinents quant à la toxicité des nanomatériaux pour l'environnement ;
- identifier les mécanismes d'accumulation des nanomatériaux dans les différents milieux ;
- étudier les
- possibilités d'extrapoler des résultats de toxicité aiguës à des valeurs de toxicité chronique ainsi que les incertitudes associées, ce afin de déterminer si des tests moins coûteux ou au contraire des évaluations de risques plus complexes devront être réalisées ;
- travailler à obtenir des données de très bonne qualité.

3.3.2.4 BILAN

C'est un document d'orientation qui fait un bilan des connaissances et manques en 2012 dans l'évaluation des risques liés aux nanomatériaux ; Ce rapport met en exergue la nécessité d'orienter la recherche vers des questions spécifiques d'évaluation des risques, en synergie avec les efforts en cours afin de mettre au point des bases de données, favorisant ainsi le travail en cours dans d'autres groupes de pilotage sur l'OCDE GTNM, ce afin de favoriser à terme le développement de méthodes, de modèles, de données et des outils à l'usage des décideurs pour développer une approche systématique et intégrée d'évaluation des impacts sur l'environnement, la santé et la sécurité de la production et de l'utilisation des nanomatériaux. Ce document est plutôt réservé à un public de spécialistes de l'évaluation des risques chimiques, très en amont par rapport aux préoccupations quotidiennes des industriels ;

Risques accidentels :

Ce document ne permet pas d'aider à identifier des scénarios accidentels. En revanche, il fait un bilan sur les aspects importants à prendre en compte dans la caractérisation des nanomatériaux, ce qui constitue en soi une base afin de pouvoir évaluer à terme les risques accidentels de manière adéquate. Un autre aspect intéressant de ce document est qu'il met en avant les besoins de connaissances qui seront nécessaires dans l'évaluation des risques pour l'homme et l'environnement.

3.4 GUIDES DE BONNES PRATIQUES ISSUS D'INSTITUTS PUBLICS

3.4.1 GUIDE AFSSET « LES NANOMATERIAUX–SECURITE AU TRAVAIL » (FRANCE, 2008)

3.4.1.1 OBJET DU GUIDE

En 2008, l'AFSSET a publié ce guide intitulé « Les nanomatériaux – Sécurité au travail ». Ce document fait suite à une étude bibliographique relative aux caractéristiques, aux applications et à la toxicité des nanomatériaux.

Il a pour but de fournir des informations concernant :

- les procédures d'évaluation des dangers des substances produites en milieu industriel,
- les évaluations des risques et moyens de préventions existants pour limiter l'exposition des travailleurs,
- des mesures appropriées de protection des travailleurs et populations susceptibles d'être exposées aux nanomatériaux.

Il concerne les activités industrielles dans lesquelles sont mis en œuvre des nanomatériaux manufacturés et les expositions potentielles des travailleurs et des riverains à ces nanomatériaux.

L'étude a été menée par un groupe de travail regroupant des experts issus de différents organismes (CEA, INRS, AFSSA, Institut universitaire romand de la santé au travail) avec la contribution d'autres experts de l'INSERM, de l'INERIS ou d'acteurs industriels (Michelin, Rhodia, L'Oréal, Fédération des industries de la peinture).

3.4.1.2 STRUCTURE DU GUIDE

Ce rapport est structuré de la manière suivante :

- contexte de l'étude ;
- panorama des industries produisant ou mettant en œuvre des nanomatériaux manufacturés ;
- évaluation des risques liés aux nanomatériaux ;
- enquête menée sur les pratiques des établissements industriels et des laboratoires ;
- protection des travailleurs exposés ;
- aspects réglementaires et recommandations de bonnes pratiques.

3.4.1.3 PRESENTATION DE QUELQUES POINTS CLES DU GUIDE

Dangers induits par les nanomatériaux :

→ **Toxicologie**

Parmi les points clés du guide, nous noterons qu'il propose un résumé des informations recueillies dans un précédent rapport concernant sur les effets toxiques engendrés par l'exposition aux nanomatériaux. Il distingue les nanotubes de carbones des autres nanoparticules et s'intéresse aux effets pulmonaires, vasculaires, cutanés et digestifs ainsi qu'à la génotoxicité.

→ **Eco-toxicologie**

Un paragraphe est dédié à l'effet potentiel des nanoparticules manufacturées sur l'environnement. Peu d'études sont disponibles sur le sujet. On ne rapporte pas à l'heure actuelle d'effet global des nanoparticules sur la faune ou la flore. Néanmoins, elles peuvent représenter un risque pour l'environnement même si les connaissances actuelles sont faibles que ce soit sur la toxicité des nanomatériaux pour les écosystèmes ou leur comportement dans les milieux (air, eau, sol).

→ Explosion

Le risque d'explosion de poussières est considéré comme l'un des risques majeurs à prendre en compte concernant les nanomatériaux. Le guide renvoie alors aux mécanismes et aux effets tels que présentés pour une explosion de poussière classique.

Il est malgré tout précisé que, dans le cas des poudre de taille nanométrique, leur petite taille est susceptible de causer une augmentation de la sensibilité du nuage à l'inflammation en indiquant des seuils d'inflammation potentiels similaires aux pré-mélanges gazeux explosifs (de l'ordre de 1 mJ, voire moins). La manipulation de telles poudres sont susceptibles de générer de l'électricité statique, ce qui peut accroître le risque d'inflammation. Les explosions de nuages de nanoparticules peuvent s'avérer violentes⁸.

Métriologie de l'exposition

Le guide recommande de considérer des mesures de concentration en masse pour les poussières et les gaz mais des concentrations en nombre sont à prendre en compte pour les fibres.

Les prélèvements sont menés en fonction des tailles de particules susceptibles de se retrouver dans différents organes de l'appareil respiratoire (selon les normes correspondantes : ISO 7708, EN 481, X43-276, etc.):

- la fraction inhalable renvoie aux particules susceptible de pénétrer l'appareil respiratoire ;
- la fraction thoracique renvoie à celles capables de pénétrer le larynx (typiquement < 10µm) ;
- la fraction alvéolaire renvoie à celles capable d'atteindre le plus profond du poumon où ont lieu les échanges gazeux (typiquement < 4µm).
- Compte tenu des difficultés posées par la mesure de ces diverses fractions, le guide estime qu'il faut se contenter « de caractériser (au mieux) l'atmosphère d'exposition des lieux de travail en termes de concentration en nanoparticules ».

Ainsi les concentrations en masse ne doivent pas être exclues. Leur mesure est, en effet, plus facile et elles peuvent aisément être mises en relation avec les mesures employées pour les matériaux classiques.

Les prélèvements sont à réaliser au niveau de la zone respiratoire de l'opérateur et doivent prendre en compte le bruit de fond composé des particules existantes dans l'ambiance de travail hors activité liés aux nanomatériaux. Typiquement un seuil de 10 000 particules (de taille supérieure à 10 nm) par cm³ peut être observé en milieu urbain.

⁸ Les réflexions émises par le guide reposent très largement sur les travaux menés par l'INERIS sur les propriétés explosives des nanopoudres et plus particulièrement sur le rapport réalisé par l'INERIS pour l'AFSSET en 2008 : Bouillard J., Evaluation des moyens de caractérisation expérimentale des dangers d'inflammation et d'explosion pour nanoparticules, N°DRA-07-83497-13521A, 2008, Volet 1, AO AFSSET

Le guide fournit une liste de dispositifs utilisables pour la caractérisation de l'atmosphère d'exposition. Ils sont à choisir en fonction du type d'information recherchée (cf. Annexe 2). Des dispositifs portatifs individuels permettent de caractériser l'exposition subie par un travailleur. Des sélecteurs granulométriques sont utilisés pour estimer la fraction alvéolaire ; la fraction inhalable peut être évaluée par prélèvements sur filtres et analyse des prélèvements par microscopie électronique (caractérisation structurale) ou spectrométrie (caractérisation chimique).

De plus, des mesures ponctuelles peuvent être réalisées à l'aide d'une série de dispositifs permettant de caractériser les différents paramètres de l'exposition (en nombre, en masse, en surface totale, en taille). Cette stratégie, assez lourde, peut être simplifiée par la connaissance des propriétés des nanomatériaux que l'on souhaite spécifiquement caractériser.

Enfin, des dispositifs sont proposés pour la surveillance continue de la concentration au poste de travail. L'objectif est d'identifier les fuites accidentelles de nanoparticules au poste de travail et vers l'extérieur. Pour de telles opérations, les équipements recommandés seront moins complexes et spécifiques mais devront permettre de nombreuses mesures dans le temps en des positions fixes. Malheureusement, les dispositifs existants ne sont pas toujours adaptés du fait de leur complexité ou parce qu'ils nécessitent une maintenance trop fréquente.

Evaluation des risques :

L'évaluation des risques proposée est principalement centrée sur l'exposition par inhalation. Etant donné le faible niveau de connaissance sur leurs propriétés, il faut considérer les nanoparticules comme des substances inconnues et suivre les recommandations applicables aux substances dangereuses.

Le guide note que peu de fiches de données de sécurité fournissent des informations spécifiques au caractère « nano » des produits. Il met en évidence le caractère inadapté des méthodes classiques pour deux raisons :

- les valeurs limites d'expositions professionnelles déterminées selon les méthodes traditionnelles (basées sur la seule fraction inhalable) ne sont pas adaptées. De plus, les données toxicologiques existantes sont insuffisantes ;
- les approches classiques de mesures des expositions (concentrations en masse) sont inadaptées.

Pour l'évaluation des risques au sein des installations, les démarches recommandées par le guide sont basées sur :

- les mesures d'exposition au poste de travail ;
- l'analyse par méthode « control banding » adaptée aux nanomatériaux ;
- l'analyse complète du cycle de vie sur le site (depuis l'approvisionnement jusqu'aux déchets) ;
- des pratiques de prévention a priori issues d'un principe de précaution vis-à-vis du risque nano non déterminé.

Concernant l'analyse par Control Banding, le guide indique qu'elle n'est pas encore utilisée en France et renvoie à la méthode générale de l'INRS⁹. Il indique aussi que le cabinet « Lux Research » propose une adaptation de cette méthode mais aucun détail n'est disponible quant au contenu exact de cette méthode, qui fait l'objet d'une exploitation commerciale par l'entreprise qui l'a développée.

L'approche globale tout au long du cycle de vie, dite « du berceau à la tombe », qui est proposée par le guide repose sur une démarche en 6 étapes :

- description du nanomatériau et de ses applications ;
- analyse des étapes du cycle de vie du produit dans les installations en prenant en compte les modifications potentielles du matériau au cours d'une tâche ou d'un procédé ;
- évaluation des risques à chaque étape du cycle de vie ;
- définition des moyens de maîtrise des risques ;
- documentation et prises de décisions éventuelles (sur la nécessité d'études complémentaires par exemple) ;
- révision et adaptation en fonction de l'évolution des connaissances, des procédés et des procédures.

Le guide AFSSET mentionne la nécessité d'évaluer le risque pour les populations environnantes mais ne fournit pas de recommandations sur la manière de mener une telle démarche dans le cas spécifique des nanomatériaux.

Mesures de maîtrise des risques :

Les recommandations du guide en termes de maîtrise des risques reposent sur un principe intitulé STOP pour Substitution, Technologie, Organisation et Protection individuelle.

Substitution. Cette solution regroupe les options de remplacement ou élimination de la substance dangereuse, la modification de sa forme physique ou la substitution du procédé ou d'une partie du procédé.

Technologie. Le guide recommande d'utiliser des systèmes fermés (confinement) et des récipients incassables (pour le transport et stockage) et d'éviter autant que possible la formation de poussières ou d'aérosols. Il propose également l'emploi de moyens permettant de limiter l'exposition par l'aspiration des poussières et aérosols à la source avec filtration à haute efficacité de l'air extrait. En termes de ventilation, elle doit être adaptée dans des locaux de travail séparés. Enfin, pour limiter la contamination des installations, le nettoyage des machines doit être assuré et des contenants et sacs spéciaux doivent être dédiés aux objets contaminés.

Organisation. Les mesures à prendre en compte sont :

- la limitation du nombre de personnes accédant aux zones avec des expositions probables et assurer la limitation de l'accès à ces zones aux personnels formés, nécessaires et surveillés ;
- la mise en place de procédures opératoires pour les différentes tâches incluant les stockages, livraisons, nettoyages, le traitement des déchets ;

⁹ Méthode d'évaluation simplifiée du risque chimique, ND2233-200-05, INRS, 2005

- la mise en place de procédures pour la maîtrise des situations accidentelles ;
- les formations, informations et suivi des personnels.

Protection individuelle. Ces équipements ne sont recommandés qu'en dernier recours :

- vêtements de travail : ne pas employer de vêtements en coton au profit de vêtements étanches, non tissés ;
- protection contre l'inhalation : masques adaptés ;
- protection cutanée : gants¹⁰ et autres vêtements de protections adaptés ;
- protection des yeux : lunettes ou masques complets.

Pour ces moyens de protection, le rapport fournit des études relatives à leur efficacité, en particulier pour les moyens de filtration, les vêtements de protection et les gants vis-à-vis des nano aérosols. Il en ressort des adaptations dans la qualification de certains filtres pour utilisation avec les nanomatériaux. Les équipements de type P3 (Norme NF EN 12942) sont ainsi recommandés par ce guide. Enfin, l'étude montre une bonne efficacité des gants qui ne laissent traverser que de faibles quantités de nanoparticules.

3.4.1.4 BILAN

Ce guide est très connu au niveau des acteurs impliqués dans la mise en œuvre de nanomatériaux. Il s'agit d'un document de référence cité par de nombreux autres guides. Il fournit de nombreux détails sur les différents points qu'il traite avec pour cible des personnes ayant des connaissances dans le domaine de l'hygiène, de la sécurité et/ou des nanomatériaux. De nombreuses recommandations sont formulées concernant les mesures d'exposition. Si le document ne fournit pas de méthode d'analyse de risque spécifiques aux nanomatériaux, il propose des démarches générales à mener et met bien en évidence des points pour lesquels des difficultés particulières sont à attendre. Les équipements de protection collectifs et individuels sont bien mentionnés mais ne sont pas détaillés.

Risques accidentels :

Le guide mentionne la nécessité de mise en place de procédure pour la maîtrise des situations accidentelles mais aucune indication n'est fournie sur sa prise en compte dans le cadre de l'évaluation des risques, aucune identification n'est même fournie quant à l'identification de scénarios accidentels.

S'ils sont clairement identifiés, les risques d'explosion et pour l'environnement ne sont pas détaillés de manière suffisamment approfondie pour un traitement complet de ces problèmes.

¹⁰ Le double-port de gants est même conseillé en cas de contact direct avec des substances critiques

3.4.2 GUIDE INRS « NANOMATERIAUX–PREVENTION DES RISQUES DANS LES LABORATOIRES » (FRANCE, 2012)

3.4.2.1 OBJET DU GUIDE

Ce guide, paru en 2012, vise à prévenir les risques liés à la manipulation de nanomatériaux dans les laboratoires. Il donne les informations nécessaires au choix des procédés, des méthodes et des pratiques de travail propres à réduire les risques, en maîtrisant en particulier les émissions ou dégagements de nanomatériaux. Notons que ce guide est facilement accessible par les acteurs industriels et très visible du fait de son élaboration conjointe INRS-CNRS.

Il cherche à définir les mesures de prévention collective et individuelle les mieux adaptées à la protection des opérateurs, mais également des règles de protection des personnes amenées à intervenir dans les laboratoires plus ponctuellement (personnel de nettoyage, agents de maintenance, etc.).

Ce guide est conçu de manière à laisser un certain degré de liberté afin de pouvoir adapter les solutions présentées en fonction de chaque situation.

3.4.2.2 STRUCTURE DU GUIDE

Ce guide est structuré de la manière suivante :

- domaine d'application – Terminologie ;
- danger pour la santé et la sécurité ;
- caractérisation de l'exposition professionnelle ;
- évaluation des risques ;
- contexte réglementaire ;
- mesures de prévention.

3.4.2.3 PRESENTATION DE QUELQUES POINTS CLES DU GUIDE

Danger pour la santé et la sécurité

- les effets sur la santé : un résumé rapide est réalisé concernant les effets toxiques des nanomatériaux sur la santé et rappelle l'importance de l'influence des facteurs liés à l'organisme exposé et ceux liés aux nanomatériaux.
- l'explosion et l'incendie : ce paragraphe est très générique et renvoie aux mécanismes et effets tels que présentés pour une explosion de poussières classiques. Les derniers travaux réalisés dans ce domaine ne sont pas pris en compte.

Caractérisation de l'exposition professionnelle

Il est rappelé qu'il n'existe pas d'approche unifiée à l'heure actuelle afin de caractériser l'exposition professionnelle et il est souligné que la connaissance de la concentration massique dans l'air et de la nature chimique des nanomatériaux est insuffisante pour pouvoir évaluer les risques d'exposition : une mesure de la concentration en nombre ou en surface est nécessaire.

Evaluation des risques

- le risque pour la santé de l'opérateur est fonction de la toxicité du nanomatériau (danger) et de l'exposition de l'opérateur. Compte tenu des incertitudes actuelles en ce qui concerne les données toxicologiques, il ne peut y avoir à l'heure actuelle d'approche quantitative des risques. Seule une approche qualitative est possible, approche détaillée dans le guide.
- les auteurs exposent ensuite une démarche classique d'évaluation des risques aux postes de travail, en précisant certaines spécificités propres à l'évaluation des risques associés à l'utilisation des nanomatériaux en laboratoires :
 - identification des nanomatériaux ;
 - recherche de fiches de données de sécurité. Les données issues des FDS devront être dûment complétées par une recherche bibliographique ;
 - recensement des postes de travail, des voies d'exposition etc ;
 - évaluation qualitative par *control banding* :

Mesures de prévention

Les auteurs décrivent dans cette partie une démarche de prévention des risques aux postes de travail classique, en accord avec les exigences du code du travail, tout en précisant les éléments spécifiques à prendre en compte tenu du retour d'expérience et de la connaissance des propriétés des nanomatériaux : on privilégie d'abord la mise en place de moyens de protection collectifs (captage à la source, boîte à gants, enceinte ventilée etc.), puis individuels (protection respiratoire, cutanée...).

On notera que le guide fait également un point concernant les aspects nettoyage des équipements et locaux, stockage des produits et gestion des déchets. De manière plus classique, il est rappelée l'importance de la formation et information et que la nécessité de la mise en place d'une surveillance médicale adaptée.

D'un point de vue organisationnel, le guide propose la mise en place d'un pictogramme spécifique, sur la base du modèle INRS, afin de signaler les lieux présentant des risques d'exposition aux nanomatériaux.

Le guide recommande l'élimination des déchets vers une installation de stockage de classe 1 (déchets dangereux), vers un incinérateur ou vers un four cimentier sans préciser cependant les limites potentielles de ces filières quant aux problématiques spécifiques posées par les nanomatériaux^{11,12}.

Le guide recommande le nettoyage des surfaces contaminées à l'aide de linges humides. Toutefois, une telle approche devrait être proscrites dans le cas de la décontamination de nanomatériaux métalliques par exemple (formation d'hydrogène)¹³ ;

11 L. Breggin, J. Pendergrass, "Where Does the Nano Go" End-of Life Regulation of Nanotechnologies, PEN 10, Project on Emerging Technologies, Woodrow Wilson International Center, 2007

12 G. Bystrzejewska-Piotrowska, J. Golimowski, Pawel L. Urban, Nanoparticles: Their potential toxicity, waste and environmental management, Waste Management 29 (2009) 2587–2595

13 J.M. Benson, Safety considerations when handling metal powders, The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 7A, 563-575, 2012

Enfin, on notera que le guide recommande la mise en œuvre d'un procédé de stockage ou de synthèse sous atmosphère contrôlée (inerte) afin de réduire les risques incendie ou explosion mais il omet de préciser que certains inertes comme l'azote, sont susceptibles de réagir avec des nanoparticules. Ainsi, certains procédés de production de nanoparticules métalliques sont-ils sous argon et non sous azote¹⁴.

3.4.2.4 BILAN

Ce guide propose une approche intégrée de la gestion des risques liés à l'utilisation des nanomatériaux, quel que soit le domaine d'activité du laboratoire, ce tout en laissant des degrés de liberté. On retiendra les points suivants :

- les recommandations faites en matière de ventilation prennent en compte la propension des nanoparticules à s'agglomérer.
- il est demandé de réaliser un bilan détaillé de l'ensemble des propriétés physico-chimiques des nanomatériaux mais l'accès à certaines données peut rapidement demander un certain niveau d'expertise.
- les risques incendie et explosion sont traités de manière très générique et le résumé ne fait pas un bilan des derniers travaux réalisés dans le domaine ;
- les auteurs ne proposent pas de procédures spécifiques de décontamination des équipements et aires de travail.
- concernant la gestion des risques électrostatiques, on ne trouve pas de recommandations particulières concernant les nanomatériaux (limiter la formation des charges électrostatiques) alors que certaines nanopoudres semblent être caractérisées par des énergies d'inflammation inférieures à 1 mJ.

Risques accidentels :

Ce guide vise à prévenir les risques liés à la manipulation de nanomatériaux dans les laboratoires et ne traite pas des risques accidentels.

3.5 GUIDE SPECIFIQUE A UNE INSTITUTION

3.5.1 GUIDE DE L'UNIVERSITÉ DE DELFT « NANOSAFETY GUIDELINES - PREVENTING EXPOSURE TO NANOMATERIALS AT THE FACULTY OF APPLIED SCIENCES » (PAYS-BAS, 2010)

3.5.1.1 OBJET DU GUIDE

A l'université de Delft sont menées de nombreux travaux mettant en jeu des nanomatériaux. C'est pourquoi ce guide, intitulé « Nanosafety Guidelines – Preventing exposure to Nanomaterials at the Faculty of Applied Sciences » a été mis en place. Il a été rédigé à destination des personnels mettant en œuvre des nanomatériaux au sein des laboratoires de l'université et a pour but de définir les bonnes pratiques de laboratoire afin de limiter l'exposition de ces personnels (par inhalation principalement).

¹⁴ Vignes, A., Bouillard, J., Dufaud, O., Perrin, L., Laurent, A., Thomas, D., Risk assessment of the ignitability and explosivity of aluminium nanopowders, Process Safety and Environmental Protection 90, (4) (2012) 304-310

3.5.1.2 STRUCTURE DU GUIDE

Le guide est structuré comme suit :

- introduction,
- critères relatifs à la toxicité spécifique des nanomatériaux et évaluation des risques,
- recommandations en termes de prévention contre l'exposition aux nanomatériaux au poste de travail,
- informations basiques concernant la toxicité spécifique des nanomatériaux.

3.5.1.3 PRESENTATION DE QUELQUES POINTS CLES DU GUIDE

Le guide fournit quelques règles de bonnes pratiques pour des situations de manipulations typiques de laboratoires :

- mise en œuvre dans des liquides : éviter les éclaboussures, l'aérosolisation et les renversements, porter des gants, nettoyer les surfaces avant évaporation du liquide ;
- mise en œuvre dans des réacteurs : travailler en réacteur fermé à des pressions proche de la pression atmosphérique de préférence, surveiller les fuites avant mise en œuvre, travailler sous confinement pour les essais en dépression, emploi de filtres HEPA pour les équipements de ventilations ;
- mise en œuvre à l'état de poudres nanométriques : travailler sous hottes fermées ou boîtes à gants, travailler hors confinement avec des équipements respiratoires certifiés P3 ;
- procédures de nettoyage et en cas de renversement : travailler en concentration de nanomatériaux limités, avec des équipements adéquates en termes de gants notamment, considérer les objets souillés comme des déchets chimiques ; des procédures spécifiques de nettoyage usuel et en cas de renversement sont fournis ;
- transport : à réaliser selon les procédures en pratique pour les produits chimiques usuels ;
- destruction : traiter les nanomatériaux comme des déchets chimiques si les quantités excèdent l'ordre du mg et que la solubilité des particules dans l'eau est faible, traiter comme le matériau parent pour des solubilités plus élevées, enfin nettoyer les très petites quantités à l'eau ;
- prendre garde à l'explosibilité et la pyrophoricité des matériaux.

De plus, quelques VLE sont fournies. Ces dernières sont issues d'un document du RIVM¹⁵. Ces valeurs ont été fournies de manière indicative du fait du manque de connaissance sur la toxicité des nanomatériaux.

Notons également que ce guide fournit quelques renseignements sur la toxicité spécifique pouvant être observée pour certains nanomatériaux, du fait de leur potentiel à atteindre et à s'accumuler au contact d'organes cibles en raison de leur taille et de leur faible solubilité.

¹⁵ RIVM, report 601044001/2010 (document en néerlandais)

Catégorie	Description	Limite d'exposition proposée
A	Métaux, oxides métalliques et autres nanomatériaux granulaires biopersistants avec une densité > 6000 kg/m ³ et une taille de particules comprise entre 1 et 100 nm, par ex. : Ag, Fe, Au, Pb, La, TiO ₂ , CeO ₂ , ZnO, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe _x O _y , SnO ₂ , CoO et nanoargiles	20 000 particules/cm ^{3*}
B	Nanomatériaux granulaires bio-persistants avec une densité > 6000 kg/m ³ et une taille de particules comprise entre 1 et 100 nm, par ex. : C ₆₀ , noir de carbone, TiN, Sb ₂ O ₅ , polymères, polystyrène, dendrimères et nanotubes de carbone pour lesquels des effets sur la santé de type asbestose ont été exclus.	40 000 particules/cm ^{3*}
C	Nanotubes de carbone pour lesquels des effets sur la santé de type asbestose n'ont pas été exclus	0,01 fibre/cm ^{3*} (10 000 fibres/m ^{3*}) sur la base de risque d'asbestose

* augmentation moyenne sur 8 heures par rapport au niveau de base.

** mesuré par microscopie PCM ou 20 000 fibres/m³ par microscopie TEM.

Tableau 1 – Valeurs limites l'exposition indicatives traduites du guide de l'Université de Delft (Pays-Bas, 2010)

3.5.1.4 BILAN

Ce guide présente des bonnes pratiques au sein de laboratoires universitaires. On trouve le même type de guides dans des universités américaines. Sur certains points, il présente des procédures simples et détaillées (nettoyages) tout en étant assez synthétique et donc accessible aux personnels mettant en œuvre directement les produits. Il donne des consignes sur le nettoyage et le traitement des déchets. Les recommandations quant aux équipements de protection collectifs sont très peu fournies. L'accent est plus porté sur les équipements de protection individuelle. Le document n'est pas du tout destiné à une mise en œuvre à l'échelle industrielle et ne doit être utilisé qu'à l'échelle des laboratoires de l'université.

Risques accidentels :

Les scénarios accidentels ne sont pas traités à proprement parler puisque seul le cas du renversement est mentionné pour des recommandations concernant des procédures de nettoyage des zones souillées.

Ce guide considère non seulement le danger toxicologique (uniquement en termes d'exposition chronique) mais aussi le risque d'explosion et le caractère pyrophorique des substances.

Il n'indique pas comment mener correctement une évaluation des risques et donc a fortiori ne prend pas en compte les scénarios accidentels.

3.6 AUTRES DOCUMENTS RECENSES

Ces documents recensés ne seront pas analysés de manière détaillée dans la suite de l'étude mais seront intégrés à l'étude comparative, lorsque cela apparaît pertinent.

3.6.1 RAPPORT « SPECIFIC ADVICE ON EXPOSURE ASSESSMENT AND HAZARD/RISK CHARACTERISATION FOR NANOMATERIALS UNDER REACH » (EUROPE, 2011)

3.6.1.1 DESCRIPTION ET POINTS CLEFS

L'Institut pour la santé et la protection des consommateurs (IHCP), qui est l'un des sept instituts du JRC a lancé en 2010 une activité de recherche afin de répondre – entre autres – à la question de savoir si les prescriptions existantes de REACH et les orientations applicables sont adaptées à l'évaluation des nanomatériaux. Ils contiennent plusieurs propositions spécifiques. Le rapport RIP-oN3, réalisé dans le cadre de cette activité vise à produire des recommandations concernant l'évaluation de l'exposition et la caractérisation des risques pour les nanomatériaux sous REACH. Ce rapport n'est donc pas à proprement parler un guide de bonnes pratiques mais pourrait à terme influencer plus ou moins sur les nouvelles pratiques qui seront potentiellement mises en œuvre dans le futur.

Ce rapport a permis respectivement :

- l'identification et l'examen des sources d'informations relatives à des études de cas afin de développer des scénarios d'exposition pour différents nanomatériaux;
- la production d'un rapport sur l'évaluation de l'exposition des nanomatériaux dans le cadre de REACH ;
- L'analyse des bases de données concernant la fixation de valeurs limites d'exposition pour les nanomatériaux;
- l'élaboration de recommandations sur la faisabilité de la catégorisation des nanomatériaux (ex. catégorisation des différents types de nanotubes de carbone) en complément d'une approche «au cas par cas » ;
- la production d'un rapport sur la caractérisation des dangers des nanomatériaux dans le cadre de REACH.
- le développement d'un document de travail résumant les besoins en termes de paramètres (masse, concentration en nombre...).
- concernant l'évaluation des risques, le rapport identifie l'approche Control Banding comme une voie pour laquelle des développements doivent être apportés.

3.6.1.2 BILAN

Ce rapport vise respectivement d'une part à élaborer des recommandations sur la façon d'évaluer l'exposition aux nanomatériaux dans le cadre de REACH et notamment le développement des scénarios d'exposition, l'évaluation des conditions opérationnelles et de gestion des risques et d'autre part à développer des recommandations sur la manière de procéder afin de caractériser et évaluer les risques pour les nanomatériaux.

Ce rapport, qui va permettre d'appuyer le deuxième examen de la réglementation européenne (2012) a conclu que les méthodes connues d'évaluation de

l'exposition étaient applicables d'une manière générale, mais pouvaient encore poser quelques problèmes d'ordre méthodologique.

Il ne s'agit pas à proprement parler d'un guide de bonne pratique destiné à l'industrie. C'est un rapport de recherche qui vise avant tout à mettre en avant les problématiques potentielles d'application de la réglementation européenne.

3.6.2 RAPPORT EU-OSHA « WORKPLACE EXPOSURE TO NANOPARTICLES » (EUROPE, 2009)

3.6.2.1 DESCRIPTION ET POINTS CLEFS

Ce rapport intitulé « Literature Review - Workplace exposure to nanoparticles » et publié en 2009, passe en revue la littérature scientifique consacrée à l'exposition des travailleurs aux nanoparticules. Il analyse des publications sur l'exposition aux nanoparticules et place l'accent sur les effets néfastes pour la santé susceptibles de résulter de l'exposition sur le lieu de travail. Le rapport dresse le tableau de la réglementation existante en 2009 et des activités mises en œuvre en vue de faire face à ce risque émergent.

Peu avant 2009, a été publié un article recensant une série de cas de travailleurs subissant des effets indésirables liés à l'exposition aux nanoparticules en milieu de travail. Huit femmes (âgées de 19 à 47 ans) qui avaient été exposées à des nanoparticules d'ester polyacrylique en suspension dans l'air pendant cinq à treize mois sur le même lieu de travail en Chine ont été hospitalisées pour essoufflement et deux d'entre elles sont décédées. Toutes présentaient un épanchement pleural, une fibrose et des granulomes. Le cytoplasme et les nucléoplasmes des victimes contenaient des nanoparticules correspondant à celles trouvées sur leur lieu de travail. Cette publication apporte des données crédibles sur le lien de causalité dans ce cas particulier et met plus généralement en évidence les risques potentiels d'un type de nanoparticules, mais le fait qu'on ignore le niveau d'exposition, les antécédents d'exposition et l'état de santé des victimes, ainsi que le manque flagrant de mesures de protection du personnel, rendent difficile l'application des résultats à d'autres contextes. Cela dit, la brièveté du délai d'apparition des syndromes graves et des décès justifie de considérer cet événement comme un signal d'alerte significatif.

Constatant la quasi-absence de recherche permettant de tirer des conclusions formelles, EU-OSHA a décidé de réaliser cette revue afin de formuler des recommandations détaillées quant aux lacunes à combler dans le domaine de la gestion des risques aux postes de travail.

Afin de donner un aperçu général des informations disponibles en 2009, des informations ont été recueillies en se basant sur les connaissances disponibles dans la littérature scientifique, les documents de politique publique, la législation et les programmes de travail. Les documents de l'UE ont eu la priorité, bien que les activités nationales et internationales aient également été décrites. Les études publiées jusqu'à Novembre 2008 ont été pris en compte dans le rapport.

En accord avec de nombreuses publications antérieures, le rapport montre que les principes actuels de l'évaluation des risques semblent être en général suffisants pour traiter les risques liés à l'exposition des travailleurs aux nanomatériaux. Cependant, la validation des méthodes in vitro et le développement d'une stratégie de test adéquate nécessitent de plus amples investigations.

L'examen des différents documents montre qu'il est également essentiel de concentrer les futurs efforts de recherche dans le domaine de l'évaluation des risques aux postes de travail, sur les thématiques prioritaires suivantes :

- identification des nanomatériaux et des chemins d'exposition
- mesure de l'exposition et efficacité des mesures de protection
- évaluation des risques relatifs aux nanomatériaux en ligne avec le cadre législatif actuel a minima
- réalisation d'études in vivo afin d'évaluer les effets sur la santé des nanomatériaux
- validation des méthodes in vitro et des tests de détermination des propriétés physico-chimiques des nanomatériaux
- formation des travailleurs et développement de guides de bonnes pratiques pour la gestion des risques aux postes de travail.

3.6.2.2 BILAN

Ce rapport réalise un bilan des connaissances disponibles jusqu'en 2008 en ce qui concerne l'évaluation des risques aux postes de travail liés à l'utilisation de nanomatériaux et a vraisemblablement contribué à l'orientation de la recherche dans le cadre du FP7. Des programmes FP7 tels que MARINA, NANOVALID ou encore SANOWORK s'intéressent en effet directement à l'étude des thématiques prioritaires qui avaient été identifiées. Ce rapport n'est pas un guide de bonnes pratiques : il réalise seulement un état de l'art des connaissances disponibles dans le domaine. Il ne reflète qu'une petite partie des connaissances actuellement disponibles compte tenu de l'explosion des études sur la santé des travailleurs entre 2009 et 2012.

3.6.3 FD ISO/TR 13121 « NANOTECHNOLOGIES - ÉVALUATION DES RISQUES ASSOCIES AUX NANOMATERIAUX » (EUROPE, 2011)

3.6.3.1 DESCRIPTION ET POINTS CLEFS

L'ISO/TR 13121:2011 décrit un processus afin d'identifier, évaluer, traiter, gérer les risques potentiels lié au développement et à l'utilisation de nanomatériaux manufacturés et pouvoir communiquer sur ces risques afin de protéger la santé et la sécurité du public, des consommateurs, des travailleurs et l'environnement.

Le guide est construit autour de deux grandes étapes, qui visent respectivement à décrire dans un premier temps les matériaux et applications relatives, et, dans un second temps à identifier le profil des matériaux. Cette deuxième étape décrit un processus afin d'identifier 3 « facettes » des nanomatériaux:

- Propriétés physiques et chimiques de nanomatériau manufacturé ;
- Dangers pour l'environnement, la santé et la sécurité ;
- Risques d'exposition pour l'homme et l'environnement tout au long du cycle de vie.

Ce rapport technique fournit une approche progressive pour l'évaluation des risques pour la santé des nanomatériaux, en lien avec le niveau de développement industriel du nanomatériau, tout au long de sa chaîne de valeur.

Un acteur pourrait mettre en œuvre la première étape de l'approche qui vise à réaliser une évaluation générale du potentiel cytotoxique en utilisant des tests in vitro ou par modélisation informatique, ce durant la phase de R&D. Ensuite, lorsque les nanomatériaux passent une étape supplémentaire de leur développement, on passe au niveau 2 d'évaluation (e.g. test pulmonaire in vitro, cancer, toxicité...) et ainsi de suite jusqu'au niveau 4 lorsque les nanomatériaux s'approprient à rentrer sur le marché. A chaque étape, les tests demandés sont plus exigeants, plus spécifiques et plus chers.

Le processus pour établir le profil requis pour l'évaluation de l'exposition est ensuite décrit. Il est important d'évaluer le potentiel d'émission des nanomatériaux manufacturés, d'identifier les voies d'exposition, afin de définir les moyens de prévention, protection et mitigation. Les processus et l'efficacité des moyens techniques de gestion du risque doivent être clairement définis.

Ce rapport technique indique enfin comment obtenir des informations relatives à l'exposition, à chaque étape du cycle de vie du matériau manufacturé (e.g. volume de production, types d'industrie, niveau de maturité, utilisation, stockage, distribution, gestion des déchets...). Les moyens de mesure aux postes de travail sont également décrits.

3.6.3.2 BILAN

Ce rapport technique est basé sur le "Nano-Risk Framework", approche développée par Dupont et soutenue par plusieurs industriels (General Electric, Intel...) et de manière plus générale par le NIA (Nanotechnology Industries Association). Cette approche peut être utilisée pour évaluer et gérer les risques liés aux nanomatériaux manufacturés, et plus spécifiquement, au cours du développement d'un produit nanostructuré. L'approche par niveau fait la force de ce rapport technique, avant tout aux industriels.

Risques accidentels :

Ce guide permet de définir des scénarios d'exposition, fonction du potentiel d'émission des nanomatériaux et décrit une méthodologie permettant de mettre en place les moyens de maîtrise des risques adéquats en fonction du degré de maturité industrielle des nanomatériaux, tout au long de leur cycle de vie. Les scénarios accidentels ne sont pas abordés en tant que tels mais leur appréhension pourrait reposer, du moins en partie, sur une méthodologie similaire.

3.6.4 GUIDE HSL «FIRE AND EXPLOSION PROPERTIES OF NANOPOWDERS » (ROYAUME-UNI, 2010)

3.6.4.1 DESCRIPTION ET POINTS CLEFS

Rédigé par le HSL en 2010, ce rapport s'intéresse aux risques d'incendie et d'explosion associés aux nanoparticules. Il fournit en particulier une liste d'équipements permettant la manipulation et la caractérisation des propriétés physico-chimiques dangereuses des poudres nanométriques (violence d'explosion, énergie minimale d'inflammation, système confiné permettant la manipulation des poudres en atmosphères inertes).

Il collecte également des résultats obtenus à l'aide de ces appareillages pour la caractérisation des propriétés explosives d'une série de poudres nanométriques métalliques et carbonées. Le potentiel explosif de ces poudres a ainsi été mis en évidence.

Caractérisation des propriétés relatives aux risques d'incendie et d'explosion :

Pour la violence d'explosion, le rapport propose l'emploi d'une sphère de 2L plutôt qu'une sphère de 20L ou de 1 m³, afin de réduire les quantités de poudre nécessaires aux essais.. Des tests ont été réalisés afin de pouvoir reproduire à un facteur proportionnel près, les résultats obtenus en sphère de 20 L. Pour minimiser l'exposition de l'opérateur, le matériau testé doit être manipulé, pesé et introduit dans la chambre d'injection en boîte à gants. L'introduction dans la chambre d'injection est réalisée sous atmosphère inerte, ce qui permet d'éviter l'oxydation des poudres avant l'essai.

L'énergie minimale d'inflammation est caractérisée à l'aide d'un dispositif MIKE3. Ce dispositif étant destiné aux poudres micrométriques, le HSL a adapté ce dispositif pour une utilisation pour des poudres nanométriques. Ainsi, la chambre de dispersion de l'appareillage a été adaptée afin d'éviter à l'opérateur d'être exposé et le remplissage de cette dernière est réalisée sous boîte à gant.

Au niveau des propriétés électrostatiques, les appareillages existants pour caractériser la résistivité des poudres sont adaptés à des tailles micrométriques. Le HSL a développé deux équipements permettant de caractériser respectivement le potentiel de charge et la résistivité des poudres nanométriques, pour lesquels les cellules d'essai sont isolées en boîte à gant afin de minimiser l'exposition de l'opérateur.

Concernant le risque d'incendie, le document insiste sur la faible probabilité d'observer des couches de poussières de nanomatériaux manufacturés du fait de leur valeur ajoutée, qui incite à minimiser les pertes. Ainsi, les stockages sont les principales situations dans lesquels les nanomatériaux sont présents en masse. Or dans le cas d'un incendie, les effets d'échelles sont importants et des essais à une échelle représentative sont recommandés. Or, du fait de leur coût, de tels travaux sont rares. Au niveau des conséquences d'incendies, il est nécessaire de prendre en compte les effets thermiques (démarrage de nouveau incendie / explosion) ainsi que les effets chimiques (formation de gaz toxiques, dégagement de suies/particules).

3.6.4.2 BILAN

Ce document récent a été rédigé par le HSL qui est un institut de référence dans le domaine des risques relatifs aux activités industrielles. Il ne s'agit pas à proprement parler d'un guide de bonne pratique mais l'un des rares documents disponible traitant des caractéristiques spécifiques des poudres nanométriques pour les dangers d'incendie et d'explosion.

Risques accidentels :

Ce guide décrit les moyens d'essai utiles pour la caractérisation des propriétés des poudres vis-à-vis du risque incendie et explosion pour lesquels des adaptations pour la caractérisation des nanomatériaux ont été proposées. Notons que les procédures de nettoyage des appareillages ne sont pas considérées dans ce rapport. Or, ces opérations sont des tâches au cours desquels l'opérateur est susceptible d'être fortement exposé ;

Ce guide ne traite pas de l'évaluation des risques mais seulement des dangers des nano-produits. En ce sens, il ne fournit pas d'information sur l'identification des scénarios accidentels et leur prise en compte dans l'analyse des risques. Il ne traite pas non plus des informations relatives à la toxicité aigue des substances ou à leur dispersion (dans le cadre de scénarios accidentels).

3.6.5 GUIDE FOEN « FIRE AND EXPLOSION PROPERTIES OF SYNTHETIC NANOMATERIALS » (SUISSE, 2010)

3.6.5.1 DESCRIPTION ET POINTS CLEFS

Réalisé dans le cadre du plan d'action suisse « Risk Assessment and Risk Management for Synthetic Nanomaterials », programme lancé par Bureau Fédéral pour l'Environnement (FOEN) et le Bureau fédéral Suisse de Santé Publique en 2006, ce rapport tente de fournir des pistes de réponse quant à la manière dont les nanomatériaux doivent être pris en compte dans le cadre de la réglementation suisse sur la prévention des accidents majeurs.

Ce rapport montre qu'on ne dispose, en 2010 que de très peu de données fondamentales concernant l'inflammabilité et l'explosibilité des nanomatériaux, la majorité de ces données ayant été fournies par le projet européen NANOSAFE2.

Les nanoparticules, bien qu'ayant tendance à s'agglomérer rapidement, forment des agglomérats de taille nanométrique à micrométrique. La taille de ces agglomérats n'augmente que très progressivement au cours du temps, la sédimentation est donc très lente, les particules restant en suspension.

Les calculs effectués, sur la base de certaines hypothèses, montrent que les suppressions calculées sont similaires à celles de poussières conventionnelles équivalentes.

La comparaison du rayonnement thermique et de la hauteur de flamme, sur la base de certaines hypothèses, montre qu'un déversement de nanoparticules d'aluminium aurait un comportement similaire à celui d'un feu de flaque d'essence. En revanche, les nanoparticules de carbone nanostructuré déversées réagiraient de manière bien moins dynamique ;

Le rapport conclut que les connaissances actuelles ne justifient pas qu'on réglemente les nanomatériaux de manière spécifique dans le cadre de la réglementation suisse sur les accidents majeurs et qu'il n'est pas nécessaire de prendre des mesures pour la prévention des accidents majeurs dans le domaine des incendies et des explosions de nanoparticules différentes de celles qui seraient prises pour des particules conventionnelles.

3.6.5.2 BILAN

Ce rapport présente un intérêt indéniable, cherchant à apporter des éléments concrets de réponse aux principales questions posés dans le domaine.

Risques accidentels :

Réalisé en 2010, ce rapport s'appuie principalement sur les résultats bruts issus du projet NANOSAFE 2 (2005-2009). Cette étude peut donner des éléments de réflexion aux personnes confrontées à la réalisation d'une étude de danger d'un site de production de nanomatériaux. Toutefois, il sera nécessaire de réévaluer les hypothèses prises à la lumière des résultats qui seront issus du projet européen FP7 MARINA (2011-2015). De même, plusieurs « avis d'experts » utilisés dans le rapport pour combler le manque de connaissances, devront être confirmés dans l'avenir. A l'heure actuelle, compte tenu du nombre restreint de résultats et de l'absence de questionnement sur la validité des résultats expérimentaux, il n'est pas possible de tirer des conclusions d'ordre général.

4. ANALYSE COMPARATIVE

Les guides et documents étudiés ont des domaines d'application variés en termes de cibles (industries, laboratoires, institutions publiques). Le Tableau 2 donne une vision globale de leur domaine d'application.

	UIC (France)	VCI (Allemagne)	BSi (Royaume-Uni)	OCDE (Europe)	AFSSET (France)	INRS (France)	Delft (Pays-Bas)
année de publication	2009	2007	2007	2012	2008	2012	2010
industries	✓	✓	✓	✓	✓		
laboratoires			✓	✓	✓	✓	✓

Tableau 2 – Domaines d'application ciblés par les principaux guides étudiés

Compte tenu de l'importance des informations contenues dans ces divers documents, cette partie du rapport résume les aspects pris en compte par les 12 guides recensés dans le cadre de la présente étude afin d'obtenir une vision claire des avancées et manques existants encore à l'heure actuelle.

4.1 CARACTERISATION / METROLOGIE RELATIVE AUX NANOMATERIAUX

Les guides de bonnes pratiques insistent sur la difficulté de mise en œuvre du recueil des informations sur les propriétés des nanomatériaux. Aussi, si certaines méthodes de caractérisations sont parfois proposées, certains guides renvoient à la documentation qui peut être disponible (fiches de données de sécurité, données de la littérature, guides, documents techniques) en conseillant de prendre garde à la fiabilité de ces données. A défaut de données, le principe de précaution est préconisé et le nanomatériau doit être considéré avec un niveau élevé de danger.

Le Tableau 7 en Annexe 4 présente les données physico-chimiques que les différents guides recommandent de collecter ainsi que les outils de caractérisation proposés pour acquérir ces données.

Concernant la définition d'une nanoparticule, les guides renvoient explicitement à la définition de l'ISO qui définit les nano-objets comme ayant au moins une des 3 dimensions de taille nanométrique, c'est-à-dire inférieure à 100 nm¹⁶ :

¹⁶ ISO TS/27687 :2008, Nanotechnologies-Terminologies et Définitions relatives aux nano-objets-nanoparticule, nanofibre et nanofeuillet

- 1 dimension < 100 nm : feuillets (graphènes ou argiles) ;
Ex : nanocouches de silicium, nanofilms de titanate de strontium.
- 2 dimensions < 100 nm : nanofibres, nanotubes, nanofilaments ou nanobâtonnets ;
Ex : nanotubes de carbone, nanotubes de nitrure de bore, nanofibres de polyester.
- 3 dimensions < 100 nm : nanoparticules (auparavant appelées PUF, particules ultrafines), nanocristaux, grains quantiques (semi-conducteurs), fullerènes et dendrimères ;
Ex : dioxyde de titane, alumine, noir de carbone, silice, fullerènes, fumées de soudage, émissions de moteur diesel, fumées de volcan.

Notons également que les guides proposés considèrent les nanomatériaux manufacturés, c'est-à-dire fabriqués intentionnellement, et non l'ensemble des particules de taille inférieure à 100 nm présentes dans l'atmosphère ambiante naturelle ou issue de divers procédés industriels ou domestiques.

La plupart des guides recommande de prendre en compte les différences de profil toxicologique entre le produit nanostructuré et le produit parent. Par défaut, le danger du nanomatériau doit être considéré comme potentiellement élevé. Cette dernière considération est commune pour la grande majorité des nanomatériaux.

Du point de vue du risque accidentel, aucune information n'est fournie par les guides pour la prise en compte des propriétés relatives à la dispersion accidentelle des poudres nanométriques ou à leur toxicité aiguë. Des informations sont par contre disponibles pour la caractérisation des risques d'inflammabilité et de d'explosivité, en particulier dans le guide HSL.

4.2 EVALUATION / ANALYSE DES RISQUES

Dans la plupart des guides, des recommandations générales sont fournies concernant l'évaluation des risques, sans prise en compte des scénarios accidentels potentiels.

Le tableau 3 synthétise les méthodes d'évaluation des risques recensées au cours de cette étude.

	Proposition de méthode spécifique aux nanomatériaux ?	Détails / Commentaires
UIC (France)	Non	<ul style="list-style-type: none"> • Renvoi au document DT 80¹⁷ relatif à l'approche Control Banding • Affectation d'un niveau de danger par un groupe d'experts pluridisciplinaire (hygiénistes, toxicologues, médecins, etc.) → pas de prise en compte des scénarios accidentels
VCI (Allemagne)	Non	<ul style="list-style-type: none"> • Proposition d'un simple organigramme présentant les étapes générales d'une évaluation des risques • Des effets différents/spécifiques pour nanomatériaux attendus comparés au parent → pas de prise en compte des scénarios accidentels
BSi (Royaume-Uni)	Non	<ul style="list-style-type: none"> • Proposition d'un simple organigramme présentant les étapes générales d'une évaluation des risques • Renvoi au COSSH¹⁸ pour l'évaluation du danger des substances chimiques en général → pas de prise en compte des scénarios accidentels
OCDE (Europe)	Non	<p>Bilan des connaissances relatives à l'évaluation des risques d'exposition et mises en avant des besoins de recherche</p> <p>→ pas de prise en compte des scénarios accidentels</p>

¹⁷ Guide UIC concernant l'évaluation et la prévention des risques professionnels liés aux agents chimiques

¹⁸ Control of Substances Hazardous to Health

	Proposition de méthode spécifique aux nanomatériaux ?	Détails / Commentaires
AFSSET (France)	Non	<ul style="list-style-type: none"> • considération des nanoparticules comme des substances inconnues et suivi des recommandations applicables aux substances chimiques dangereuses • proposition de quatre approches « classiques » (complémentaires) basées sur : <ul style="list-style-type: none"> • les mesures d'exposition • le control banding • l'évaluation des risques le long du cycle de vie • l'évaluation de risques nano « a priori » • prise en compte du risque pour les riverains → pas de prise en compte des scénarios accidentels
INRS (France)	Non	<p>Propose une approche générique d'analyse de risques ponctuée de conseils spécifiques pour les nanomatériaux</p> <p>→ pas de prise en compte des scénarios accidentels</p>
Delft (Pays-Bas)	Non	<ul style="list-style-type: none"> • Considération systématique des nanomatériaux comme toxiques jusqu'à preuve du contraire • Proposition d'un organigramme présentant une démarche générale pour vérifier que toutes les précautions nécessaires sont prises → pas de prise en compte des scénarios accidentels

Tableau 3 – Méthodes d'évaluation des risques proposées par les documents consultés

4.3 RECOMMANDATIONS EN TERMES DE MAITRISE DES EXPOSITIONS (RISQUE TOXICOLOGIQUE)

Les guides de bonnes pratiques étudiés proposent des mesures à mettre en place pour assurer au mieux la maîtrise des risques relatifs à la mise en œuvre des nanomatériaux. Il convient malgré tout de noter que les détails relatifs au choix des mesures en fonction des activités mise en œuvre ne sont pas toujours fournis. De même, les niveaux de détails de ces mesures ne sont pas uniformes en fonction des guides, comme montré dans le Tableau 4

Ces guides ont été élaborés dans un contexte d'évaluation des risques aux postes de travail. Ils privilégient les mesures de protection collectives sur les mesures de protection individuelles en accord avec le code du travail. Ces différents guides convergent pour la plupart vers des recommandations similaires. En outre, des mesures organisationnelles (détaillées en section 4.5) sont proposées.

Le guide du British Standards (BSi) suggère la mise en place de barrières techniques spécifiques selon différentes opérations typiques en contexte industriel. Ces recommandations sont proposées en annexe 3.

	Type de mesures	Détails / Commentaires
UIC (France)	confinement des installations et équipements de protection collective	<ul style="list-style-type: none"> • équipements permettant de capter, limiter et éliminer les émissions, si possible à la source • filtration de l'air extrait avant d'être rejeté dans l'atmosphère extérieure
	équipement de protection individuelle	<p>→ recommandé en dernier recours après avoir exploré l'ensemble des moyens techniques, collectifs et organisationnels</p> <ul style="list-style-type: none"> • Equipement de Protection Respiratoire (EPR) : <ul style="list-style-type: none"> ○ Equipements à pression positive (appareil filtrant à ventilation assistée équipé de filtres TH3P ou TM3P¹⁹) ○ Pour tâches courtes à faible exposition, appareils de protection respiratoire à pression négative (type Pièce Faciale Filtrante FFP3 ou masque équipé d'un filtre P3). • port de gants, lunettes avec protections latérales, vêtements de protection (s'assurer de l'adéquation de la matière des gants)

¹⁹ Pour plus de précision, voir document INRS : ED 780 : Les appareils de protection respiratoire - Choix et utilisation

	Type de mesures	Détails / Commentaires
VCI (Allemagne)	confinement des installations et équipements de protection collective	<ul style="list-style-type: none"> • extraction à la source
	équipement de protection individuelle	<p>→ lorsque les mesures de protections techniques ne sont pas suffisantes</p> <ul style="list-style-type: none"> • protections respiratoires (niveau P2, FFP2, F3 ou FFP3) • vêtements, gants et lunettes de protection
BSi (Royaume-Uni)	confinement des installations et équipements de protection collective	<ul style="list-style-type: none"> • lorsque le nanomatériau est délibérément libéré dans l'air • dispositifs d'extraction • maintenance régulière • Ne pas recycler l'air extrait sans purification complète
	équipement de protection individuelle	<p>→ recommandé en dernière option ou en complément des autres méthodes</p> <ul style="list-style-type: none"> • protection contre l'exposition par inhalation à l'aide d'EPR : <ul style="list-style-type: none"> ○ masques à dispositifs filtrants (équipés de filtres haute performance P3 ou FFP3) ○ autres vêtements de protection • protection contre l'exposition cutanée à l'aide de gants et de lunettes de protection
AFSSET (France)	confinement des installations et équipements de protection collective	<ul style="list-style-type: none"> • confinement • emploi de récipients fermés (pour transport et stockage) • éviter la formation de poussières ou aérosols • ventilation et extractions à la source
	équipement de protection individuelle	<p>→ <i>à considérer après substitution, technologie et organisation</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • vêtements de travail • protection contre l'inhalation : masques adaptés • protection cutanée : gants et autres vêtements de protections adaptés • protection des yeux : lunettes ou masques complets

	Type de mesures	Détails / Commentaires
Delft (Pays-Bas)	confinement des installations et équipements de protection collective	<ul style="list-style-type: none"> réacteur, boîte à gants hotte à fumée, cabine de ventilation avec filtres HEPA
	équipement de protection individuelle	<ul style="list-style-type: none"> équipements de protection respiratoire (P3 ou FFP3) gants blouses
INRS	confinement des installations et équipements de protection collective	<ul style="list-style-type: none"> enceintes ventilées boîte à gants ventilation du laboratoire filtres HEPA/ULPA
	équipement de protection individuelle	<ul style="list-style-type: none"> combinaison Tyvek cagoule sous air équipements de protection respiratoire
OCDE	-	-

Tableau 4 – Recommandations relatives à la maîtrise technique des expositions

4.4 RECOMMANDATIONS EN TERMES DE MAITRISE DES RISQUES PHYSICO-CHIMIQUES

D'une manière générale, les risques d'incendie et d'explosion ne sont que peu voire pas traités par les guides de bonnes pratiques étudiés à l'exception des guides INRS et BSI qui restent cependant relativement génériques (Cf. Tableau 6). En revanche, le guide HSL ainsi que le guide FOEN suisse traite plus spécifiquement de ces problématiques.

	Recommandations
UIC (France)	Prendre en compte les propriétés spécifiques de la substance (réactivité, combustibilité, explosivité) Pas de recommandation spécifique
VCI (Allemagne)	Prendre en compte les propriétés spécifiques de la substance (réactivité, combustibilité, explosivité) Pas de recommandation spécifique
BSi (Royaume-Uni)	Efficacité des moyens employés pour la protection des risques d'incendie, d'explosion et de réactivité encore à valider pour les nanomatériaux Nanomatériaux susceptibles de présenter un danger accru. Utilisation de moyens de protection contre l'explosion Emploi de chaussures antistatiques afin de limiter le risque d'inflammation du matériau Attention aux substances incompatibles en termes de réactivité et dans le choix de l'agent d'extinction à employer en cas d'intervention Mesures de protections relatives à l'incendie à mettre en œuvre dans le cas de particules combustibles Risque d'auto-inflammation des nanoparticules à considérer
AFSSET (France)	Risque d'explosion mentionné uniquement Indication concernant la défaillance des équipements de mesures adaptés aux caractérisations en continue des concentrations (pour la détection de fuites accidentelles)
Delft (Pays-Bas)	Nanomatériaux à considérer comme potentiellement explosifs et pyrophoriques
INRS (France)	Maîtrise des risques électrostatiques, suppression des sources d'inflammation Inertage des nanomatériaux lors de leur production et stockage Recommandations sur les procédures de nettoyage (e.g. pas de soufflette)
OCDE (Europe)	-
HSL (Royaume-Uni)	Manipulation, pesée et préparation des échantillons pour les essais de caractérisation

Tableau 5 – Recommandations relatives à la maîtrise des risques physico-chimiques

4.5 AUTRES RECOMMANDATIONS RELATIVES A LA SECURITE, LA SANTE ET L'ENVIRONNEMENT

D'autres recommandations relatives à la sécurité, la santé et l'environnement ont pu être extraites de l'analyse des guides de bonnes pratiques retenus.

Le principe de substitution est rappelé par la plupart des guides comme un moyen de réduire les risques. Il est même souvent recommandé comme la première solution à envisager.

Ce principe peut se traduire de différentes manières :

- remplacement de la substance ou du procédé ;
- modification du procédé : par exemple, mise en œuvre des nanoparticules en milieu liquide ;
- modification de la forme physico-chimique : dispersion du nanomatériau dans des pré-mélanges (nanobatch, résine chargée).

Il est également recommandé de prendre en compte les risques connexes, c'est-à-dire les risques induits non pas par le nanomatériau lui-même mais par le procédé mis en œuvre et/ou les autres produits mis en œuvre, tels que les solvants utilisés.

En outre, les mesures organisationnelles sont proposées :

- mise en place de modes opératoires adaptés afin d'éviter la mise en suspension de nanoparticules sèches ou les éclaboussures de liquides contenant des nanomatériaux, ainsi que pour la gestion des incidents ;
- maintenance des équipements de protection collective et des ventilations ;
- formation et information des travailleurs sur les propriétés dangereuses des substances, sur les résultats des évaluations des risques menées, sur les moyens de protection, leur utilisation et leur efficacité ;
- réduction du nombre de travailleurs exposés : réduction du nombre de travailleurs affectés à ces postes de travail et mise en place de restrictions d'accès ;
- nettoyage : emploi de moyens adaptés pour le nettoyage des postes de travail (aspirateurs HEPA²⁰), distinction des vêtements de travail des travailleurs affectés à ces postes de travail ;
- surveillance médicale des travailleurs pour l'identification précoce de potentiels effets sur les organes cibles, en particulier au niveau de l'appareil respiratoire ;
- documentation, traçabilité et mise à jour des informations.

Pour ce qui est du traitement du transport et des déchets, ils sont à considérer suivant les procédures employées pour les produits chimiques (selon les guides de l'université de Delft et du British Standards).

Il est également à noter que les guides considèrent très largement les risques liés aux nanomatériaux sous leur forme pulvérulente au détriment des applications industrielles mettant en jeu des procédés où les nanomatériaux seront inclus dans des matrices par exemple. Cette considération est uniquement mentionnée dans les démarches de substitution en proposant de considérer l'emploi de formules nano-batch dans des procédés afin de limiter l'exposition des travailleurs aux poudres nanométriques.

Le Tableau 6 résume les aspects pris en compte par les 12 guides recensés dans le cadre de la présente étude. Pour chacun, trois niveaux de prise en compte ont été distingués selon que le guide en fait uniquement mention (+), qu'il fournit des informations générales (++) ou qu'il apporte des solutions détaillées explicitement formulées ou en renvoyant à une norme (+++).

²⁰ "High Efficiency Particulate Air Filter"

	UIC (France)	VCI (Allemagne)	BSi (Royaume- Uni)	OCDE (Europe)	AFSSET (France)	INRS (France)	Delft (Pays-Bas)	RIP-oN 3 (Europe)	EU-OSHA (Europe)	ISO (International)	HSL (Royaume- Uni)	FOEN (Suisse)
	[1] (2009)	[2] (2007)	[3] (2007)	[4] (2012)	[5] (2008)	[6] (2012)	[7] (2010)	[8] (2011)	[9] (2009)	[10] (2011)	[11] (2010)	[12] (2010)
Dangers toxicologiques	++	+	++	++	++	++	++	++	+++	+++		
Dangers physico-chimiques	+	+	++		++	+	++	+	+		+++	+++
Dangers pour l'environnement	+		+	++	++					+++		++
Métrologie / Caractérisation physico-chimique	++	+++	++	++	+++		++	++	++	++		
Caractérisation toxicologique	+		+	++	+		+	++	++	+++		
Analyse des risques au poste de travail	++	++	++	+	++	++	+	++	++	+		++
Identification et prise en compte des scénarios accidentels			++		+		+				+	+++
Evaluation des risques pour les riverains					+							
Maîtrise de l'exposition	++	++	+++	+	+++	++	+++	++	++	+		
Maîtrise des risques incendie/explosion	+	+	++		+	++	++		+		+++	+
Risques connexes	+				+							
Transport					+	+	++			+		
Gestion des déchets			++		+	++	++		++	+		

Tableau 6 - Aspects couverts par les documents recensés

+ : mention

++ : recommandations générales

+++ : recommandations détaillées

5. CONCLUSION

Depuis 2007, de nombreux guides de bonnes pratiques ont été développés de part le monde pour l'utilisation des nanomatériaux par des organismes publics (INRS, AFSSET) ou des acteurs privés (UIC, VCI). Leur niveau de détails et leur champ d'application sont variables.

Dans le cadre de ce rapport, un panel représentatif des guides européens disponibles (spécifique à un organisme, une université, des acteurs industriels) a été examiné.

D'une manière générale, les risques toxicologiques sont très majoritairement pris en compte contrairement aux risques physico-chimiques pour lesquels seuls les guides BSI et INRS permettent d'initier une démarche d'évaluation et de gestion des risques d'incendie et d'explosion liés à l'utilisation des nanomatériaux. Si les aspects sur lesquels focalisent spécifiquement chaque guide sont variables ils ont tendance à converger vers des recommandations similaires.

Du point de vue des risques accidentels nous notons en particulier qu'aucun guide ne traite de manière approfondie de l'identification des scénarios accidentels, se contentant, au mieux de mentionner des consignes de nettoyages après renversement. Ainsi, aucune méthode d'analyse de risques dédiée à cette problématique n'est proposée. De plus, les propriétés relatives à la dispersion accidentelle et la toxicité aiguë des poudres, indispensables à la prise en compte de ces scénarios ne sont pas considérées. Par contre, les risques d'incendie et d'explosion sont plus souvent mentionnés même si seuls les guides FOEN et HSL proposent des recommandations pour la caractérisation des propriétés des poudres vis-à-vis de ces dangers.

En résumé, on retiendra que :

- la plupart des guides traitant des dangers physico-chimiques des nanomatériaux aborde la gestion des risques induits de manière très générique ;
- le standard du BSI considère que les risques physico-chimiques des nanomatériaux sont les mêmes a minima que ceux induits par les matériaux parents. Tout en alertant sur le risque de réactivité accrue des nanomatériaux, le BSi ne préconise pas de mesures particulières pour gérer les risques incendie et explosion ;
- le rapport du FOEN met en avant le manque de données dans le domaine accidentel, l'absence de réglementation spécifique en 2008 et souligne que le rapport ne peut tirer des conclusions d'ordre général compte tenu du manque de recul actuel (manque de résultats, validité des outils).

Ces guides et référentiels de bonnes pratiques constituent à l'heure actuelle une base « vivante », en constante évolution, pour le développement de la réglementation future et proposent des stratégies d'évaluation des risques permettant de palier, du moins en partie, aux incertitudes actuelles pesant sur les risques liés aux nanomatériaux.

En particulier, la mise en place de guides adaptés à la prise en compte des risques accidentels associés à la mise en œuvre des nanomatériaux est un enjeu pour les années à venir. Néanmoins, les connaissances actuelles sont encore limitées sur le sujet et plusieurs défis scientifiques et techniques sont à relever dans l'optique d'un tel guide. Afin de répondre à ces enjeux, l'INERIS a coordonné le montage d'un projet européen (PREMISS, accepté en phase 1) dans le cadre des appels NMP 2013 (FP7), projet qui vise à terme à mettre en place des guides de bonnes pratiques afin de gérer de manière adéquate les risques accidentels liés à l'utilisation et la production de nanomatériaux.

6. REFERENCES

- [1] Guide de bonnes pratiques - Nanomatériaux et HSE, Union des Industries Chimiques (UIC), France, 2009.
- [2] Guidance for Handling and Use of Nanomaterials at the Workplace, Verband der Chemischen Industrie (VCI) & Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Allemagne, 2007.
- [3] Nanotechnologies: Part 1: Good practice guide for specifying manufactured nanomaterials, PD 6699-1:2007, British Standards (BSI), Royaume-Uni, 2007.
- [4] Important Issues on Risk Assessment of Manufactured Nanomaterials, Series on the Safety of Manufactured Nanomaterials, No. 33, Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE), 2012.
- [5] Les nanomatériaux - Sécurité au travail, Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail (AFSSET), France, 2008.
- [6] Nanomatériaux, Prévention des risques dans les laboratoires, Institut national de Recherche et de Sécurité (INRS), France, 2012.
- [7] Nanosafety Guidelines, Preventing exposure to Nanomaterials at the Faculty of Applied Sciences, Université de Technologie de Delft, Pays-Bas, 2010.
- [8] Specific Advice on Exposure Assessment and Hazard/Risk Characterisation for Nanomaterials under REACH (RIP-oN 3), Final Project Report, 2011.
- [9] Workplace exposure to nanoparticles, European Agency for Safety and Health at Work (EU-OSHA), 2009
- [10] Nanotechnologies - Évaluation des risques associés aux nanomatériaux, FD ISO/TR 13121, 2011.
- [11] Fire and explosion properties of nanopowders, Prepared by the Health and Safety Laboratory (HSL) & Health and Safety Executive (HSE), Royaume Uni, 2010.
- [12] Fire and explosion properties of synthetic nanomaterials, Office Fédéral de l'Environnement, Suisse, 2010.

7. LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation	Nb pages
1	Liste non-exhaustive de guides de bonnes pratiques et autres documents en lien avec la manipulation sûre de nanomatériaux	2
2	Caractéristiques souhaitées des équipements de surveillance des nanoparticules et leurs modes de fonctionnement (Guide AFSSET, 2008)	1
3	Suggestions de mesures de protection minimales pour différentes opérations génériques (Guide BSi 2007)	1
4	Recommandations relatives à la caractérisation des nanomatériaux mis en œuvre	3

ANNEXE 1

**LISTE NON-EXHAUSTIVE DE GUIDES DE BONNES PRATIQUES
ET AUTRES DOCUMENTS EN LIEN AVEC LA MANIPULATION
SURE DE NANOMATERIAUX**

Année	Organisation	Titre	Pays
2006	Australian Safety and Compensation Council	A review of the potential occupational health and safety implications of nanotechnology	Australie
2006	ICON	Review of Safety Practices in the Nanotechnology Industry	Etats-Unis
2006	ICON	A Review of Current Practices in the Nanotechnology Industry	Etats-Unis
2007	VCI / BAUA	Guidance for Handling and Use of nanomaterials at the Workplace	Allemagne
2007	Nanosafe Australian Network	Current OHS Best Practices for the Australian Nanotechnology Industry	Australie
2007	TemaNord	Evaluation and control of occupational health risks from nanoparticles	Danemark
2007	DuPont	Nano Risk Framework	Etats-Unis
2007	British Standards	Nanotechnologies – Part 1: Good practice guide for specifying manufactured nanomaterials	Royaume-Uni
2007	British Standards	Nanotechnologies – Part 2: Guide to safe handling and disposal of manufactured nanomaterials	Royaume-Uni
2008	TÜV	Certification Standard CENARIOS	Allemagne
2008	IRSST	Guide de bonnes pratiques favorisant la gestion des risques reliés aux nanoparticules de synthèse	Canada
2008	AFSSET	Les nanomatériaux - Sécurité au travail	France
2009	Environnement Canada	Guide pour la manipulation sécuritaire des produits issus de la nanotechnologie	Canada
2009	NIOSH	Approaches to Safe Nanotechnology - Managing the Health and Safety Concerns Associated with engineered Nanomaterials	Etats-Unis
2009	Université de Stanford	General Principles and Practices for Working Safely with Engineered Nanomaterials	Etats-Unis
2009	EU-OSHA	Workplace exposure to nanoparticles	Europe
2009	OCDE	Guidance manual for the testing of manufactured nanomaterials: OECD's sponsorship programme; first revision	Europe
2009	SCENIHR	Risk Assessment of Products of Nanotechnologies	Europe

2009	UIC	Guide de bonnes pratiques Nanomatériaux et HSE	France
2009	Social and Economic Council	Nanoparticules in the Workplace: Health and Safety Precautions	Pays-Bas
2010	Université de Santa Barbara	Current Practices and Perceived Risks for Environmental Health, Safety, and Product Stewardship in the Nanomaterials Industry	Etats-Unis
2010	OCDE	Compilation of nanomaterial exposure mitigation guidelines relating to laboratories	Europe
2010	Université de Delft	Nanosafety Guidelines - Preventing exposure to Nanomaterials at the Faculty of Applied Sciences	Pays-Bas
2010	HSL	Fire and explosion properties of nanopowders	Royaume-Uni
2010	FOEN	Fire and explosion properties of synthetic nanomaterials	Suisse
2011	German Advisory Council on the Environment	Precautionary strategies for managing nanomatériaux	Allemagne
2011	REACH-Nano Consultation	Specific Advice on Exposure Assessment and Hazard/Risk Characterisation for Nanomaterials under REACH (RIP-oN 3)	Europe
2011	AFNOR	Nanotechnologies - Évaluation des risques associés aux nanomatériaux	France
2011	Université de Nottingham	Guidance and Safety Requirements for the Creation and Manipulation of Engineered Nano Materials	Royaume-Uni
2012	NIOSH	General Safe Practices for Working with Engineered Nanomaterials in Research Laboratories	Etats-Unis
2012	INRS	Nanomatériaux - Prévention des risques dans les laboratoires	France

ANNEXE 2

**CARACTERISTIQUES SOUHAITEES DES EQUIPEMENTS DE
SURVEILLANCE DES NANOPARTICULES ET LEURS MODES DE
FONCTIONNEMENT**

(AFSSET, 2008)

Nom	Utilisation	Caractéristiques	
		Durée intégration	Délai de mesure
Prélèvement individuel	Chaque individu porte un dispositif de prélèvement individuel intégrant son exposition sur une durée variable de 8H00 à 1 mois. Possibilité de lecture rapide pour surveillance d'une tâche ponctuelle (maintenance) ou nouvelle. (Donnerait idéalement aussi des informations sur la concentration maximale durant 15 minutes)	8 h à 1 mois	1 mois
Compteur mobile	Caractérisation de la concentration particulière à prendre en compte pour un poste lors du calcul de l'exposition. Contrôle de l'exposition durant des opérations ponctuelles, démarrage de nouveaux équipements.	10 min	1 heure
Poste de travail fixe	Equipement de surveillance fixe disposé à proximité d'un poste de travail. Alarme et a/ecte des données en continu .	5 – 30 min	10 min
Ambiance	Equipement de surveillance globale d'un laboratoire ou d'un atelier, détection des fuites non localisées. Monitoring en continu .	5 – 30 min	10 min
Extraction	Vérification de l'efficacité des filtres d'ambiance et de gaz de procédés en fonctionnement normal. Fonctionnement en continu (ou ponctuel).	60 min	10 min
Drain	Vérification de l'efficacité des filtres sur les drains liquides. Fonctionnement en continu (ou ponctuel).	60 min	10 min
Extérieur	a) Vérification de l'impact du site de fabrication de nanoparticules sur l'environnement en mode normal et en situation accidentelle.	1 mois, heures si accident	1 mois, heures si accident
	b) Détermination des fluctuations de l'air extérieur en nanoparticules pour correction des mesures effectuées dans les bâtiments (cas de l'air non conditionné).	5 – 30 min	10 min

ANNEXE 3

**SUGGESTIONS DE MESURES DE PROTECTIONS POUR
DIFFERENTES OPERATIONS GENERIQUES
(BSI, 2007)**

Figure 3 Suggested control approaches for various generic tasks

Deliberate aerosolization, e.g. manufacturing, spray coating

Fibrous and CMAR nanomaterials	The process should be enclosed or otherwise separated from personnel.
Insoluble/soluble nanomaterials	The process should preferably be enclosed or otherwise separated from personnel, although ventilated engineering controls such as extraction booths or hoods might be sufficient.

Transferring, mixing, filling, scooping of dry material

Fibrous and CMAR nanomaterials	The process should be enclosed or otherwise separated from personnel.
Insoluble/soluble nanomaterials	The process should preferably be enclosed or otherwise separated from personnel, although ventilated engineering controls such as extraction booths or hoods might be sufficient. If only small (e.g. mg) quantities are involved, procedural approaches such as segregation or RPE might be sufficient.

Transferring, mixing, filling of suspensions

Fibrous and CMAR nanomaterials	The process should preferably be enclosed or otherwise separated from personnel. However, in most cases, ventilated engineering controls should be sufficient. If only small (e.g. mg) quantities are involved, procedural approaches such as segregation or RPE might be sufficient.
Insoluble/soluble nanomaterials	Ventilated engineering controls such as extraction booths or hoods should be sufficient. If only small (e.g. mg) quantities are involved, procedural approaches such as segregation or RPE might be sufficient.

Maintenance and cleaning

Fibrous and CMAR nanomaterials	The extent to which this process can be enclosed should be maximized. In practice, however, use of appropriate RPE and skin protective equipment should be effective. Cleaning cannot involve any deliberate aerosolization
Insoluble/soluble nanomaterials	In most cases use of appropriate RPE and skin protective equipment should be effective. Cleaning cannot involve any deliberate aerosolization.

ANNEXE 4

**RECOMMANDATIONS RELATIVES A LA CARACTERISATION
DES NANOMATERIAUX MIS EN ŒUVRE**

	UIC (France)	VCI (Allemagne)	BSI (Royaume-Uni)	OCDE (Europe)	AFSSET (France)	INRS (France)	Delft (Pays-Bas)	HSL (Royaume-Uni)
Concentration, Composition	<p>structure moléculaire, degré de pureté (% en poids), identification des impuretés → aucune méthode de caractérisation proposée</p>	<p>structure et composition chimique 8. → Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Analysis (EDXRF) concentration en nombre → condensation Particule Counter (CPC), aerosol Mass spectroscopy nano-Aerosol Sampler</p>	<p>concentrations en nombre → Condensation Particule Counter (CPC), Differential mobility particle sizer (DMPS), Electron Microscopy (SEM, TEM), Electrostatic low pressure impactor (ELPI) concentrations en masse → ELPI, SEM, TEM, DMPS concentrations en surface → size selective static sampler, tapered element oscillating microbalance (TEOM), DMPS, ELPI</p>	<p>fait référence aux documents OCDE sur les tests de caractérisation des nanomatériaux</p>	<p>concentration en masse → ex : microbalance à quartz, mesure différentielle de masse de filtre de collection concentration en surface totale de particules → mesure indirecte concentration en nombre de particules → méthode non précisée</p> <p><i>pas de mesure préférentielle mesures individuelles ou ponctuelles et non en continu</i></p>		<p>concentration (d'une manière générale) → aucune méthode de caractérisation proposée</p>	
taille et morphologie	<p>taille, distribution de taille, rapport de forme, état d'agrégation / agglomération → aucune méthode de caractérisation proposée</p>	<p>taille, distribution de taille, forme → Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS), Electron Microscopy (TEM/SEM)</p>	<p>caractère long et fin des particules, distribution de taille → aucune méthode de caractérisation proposée</p>	<p>fait référence aux documents OCDE sur les tests de caractérisation des nanomatériaux</p>	<p>taille, forme, structure cristalline, propriétés de surface</p> <p>méthode de caractérisation précisée</p>		<p>taille → aucune méthode de caractérisation proposée</p>	

	UIC (France)	VCI (Allemagne)	BSI (Royaume-Uni)	OCDE (Europe)	AFSSET (France)	INRS (France)	Delft (Pays-Bas)	HSL (Royaume-Uni)
Propriétés générales	masse volumique, porosité (distribution de taille des pores), solubilité aqueuse, liposolubilité, hydrophobicité → aucune méthode de caractérisation proposée		potentiel de mise en suspension, solubilité → aucune méthode de caractérisation proposée	fait référence aux documents OCDE sur les tests de caractérisation des nanomatériaux	solubilité, adhésion → méthode de caractérisation précisée		solubilité → aucune méthode de caractérisation proposée	
Incendie / Explosion	risques incendie / explosion mentionnés → aucune méthode de caractérisation proposée	risques incendie / explosion mentionnés → aucune méthode de caractérisation proposée	violence explosive, sensibilité à l'inflammation → aucune méthode de caractérisation proposée		sensibilité d'inflammation par étincelle, violence d'explosion → méthode de caractérisation précisée			Violence d'explosion → sphère de 2 L adaptée Energie minimale d'inflammation → MIKE3 adapté Test de charge et de résistivité → dispositifs spécifiques Risque d'incendie → Essais en échelle réelle de stockage

	UIC (France)	VCI (Allemagne)	BSI (Royaume-Uni)	OCDE (Europe)	AFSSET (France)	INRS (France)	Delft (Pays-Bas)	HSL (Royaume-Uni)
Toxicologie	Expositions par inhalation, ingestion ou par voie cutanée → aucune méthode de caractérisation proposée		Expositions par inhalation, ingestion ou par voie cutanée → aucune méthode de caractérisation proposée → Propositions de VLE et de méthodes d'évaluations approximatives de VLE	Fait référence aux documents OCDE sur les tests de caractérisation des nanomatériaux	Expositions par inhalation, ingestion ou par voie cutanée → pas de méthode proposée <i>Rq : variabilité des études ; données peu nombreuses et contradictoires</i>	Expositions par inhalation, ingestion ou par voie cutanée → aucune méthode de caractérisation proposée	→ VLE indicatives	
Eco-toxicologie				Fait référence aux documents OCDE sur les tests de caractérisation des nanomatériaux	<i>Rq : études éco-toxicologiques peu nombreuses</i>			

Tableau 7 - Recommandations relatives à la caractérisation des nanomatériaux mis en œuvre

NB : Notons que le fait que lorsqu'aucune méthode de caractérisation n'est proposée, cela implique dans la plupart des cas qu'aucune méthode spécifique n'est proposée. De même, le guide ne fournit pas toujours d'information sur la validité des essais pour nanomatériaux proposés.



INERIS

*maîtriser le risque |
pour un développement durable*

Institut national de l'environnement industriel et des risques

Parc Technologique Alata
BP 2 - 60550 Verneuil-en-Halatte

Tél. : +33 (0)3 44 55 66 77 - Fax : +33 (0)3 44 55 66 99

E-mail : ineris@ineris.fr - **Internet** : <http://www.ineris.fr>