



**HAL**  
open science

## Comment assurer la sécurité d'un laboratoire utilisant des nanoparticules ?

Felipe Munoz, Alexis Vignes, Laurent Perrin, Olivier Dufaud, André Laurent, Dominique Thomas, Jacques Bouillard

### ► To cite this version:

Felipe Munoz, Alexis Vignes, Laurent Perrin, Olivier Dufaud, André Laurent, et al.. Comment assurer la sécurité d'un laboratoire utilisant des nanoparticules ?. 11. Congrès de la Société Française de Génie des Procédés "Des réponses industrielles pour une société en mutation" (SFGP 2007), Oct 2007, Saint-Etienne, France. pp.NC. ineris-00973272

**HAL Id: ineris-00973272**

**<https://ineris.hal.science/ineris-00973272>**

Submitted on 4 Apr 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Comment assurer la sécurité d'un laboratoire utilisant des nanoparticules ?

MUÑOZ Felipe<sup>a</sup>, VIGNES Alexis<sup>ab</sup>, PERRIN Laurent<sup>a\*</sup>, DUFAUD Olivier<sup>a</sup>, LAURENT André<sup>a</sup>,  
THOMAS Dominique<sup>a</sup> et BOUILLARD Jacques<sup>b</sup>

<sup>a</sup>CNRS LSGC UPR 6811 - UHP INPL ENSIC 1, rue Grandville BP 20451 54001 Nancy Cedex France

<sup>b</sup>INERIS DRA Parc Technologique ALATA BP2 60550 Verneuil en Halatte France

## Résumé

Arrivant dans de nouveaux locaux et souhaitant réaliser des mesures d'inflammabilité et d'explosivité sur des poussières nanométriques, les membres du LSGC durent revalider les appareillages existant mais également la totalité du laboratoire de sécurité des procédés afin d'assurer la sécurité des personnes se trouvant à l'intérieur et à l'extérieur du laboratoire. La modélisation de ce système complexe (Le Moigne, 1994 ; Schupp, 2006) fut réalisée à l'aide de la méthodologie MADS et l'analyse de risques avec la méthode MOSAR. Outre la méthodologie nous ne présentons ici que l'étude du sous-système « sphère de 20 litres » sur lequel nous étudions l'événement principal « émission d'un flux de nanoparticules dans le laboratoire » au travers d'un arbre de défaillance ainsi que le positionnement de plus de 60 barrières de sécurité permettant d'assurer la sécurité des personnes et des biens vis-à-vis de cet événement redouté.

**Mots-clés :** Sécurité, laboratoire, hygiène, nanoparticules, barrières

## 1. Introduction

Depuis huit ans, l'équipe de recherche en sécurité des procédés du LSGC (Laboratoire des Sciences du Génie Chimique) développe une plate-forme visant à étudier l'inflammation et les explosions de poussières. Cette plate-forme composée entre autres appareillages d'une sphère d'explosion de 20 litres, d'un tube de Hartmann modifié (Mike 3), un four Godbert Greenwald, etc. fut initialement conçue pour étudier des poudres micrométriques dans de bonnes conditions de sécurité (Laurent, 2003). Un nouveau thème de recherche axé sur l'étude des paramètres d'inflammation et d'explosivité de nanopoudres est développé durant l'année 2004. En raison de ce changement de taille et des propriétés spécifiques de ces nanomatériaux, il a été nécessaire de vérifier et de revalider les postes de travail afin de déterminer s'ils présentaient le niveau de sécurité adéquat pour manipuler des nanopoudres.

Dans cette optique, un groupe de travail a été formé afin

- de savoir comment manipuler ces particules (détermination des meilleurs équipements de protection collectifs et individuels)
- de modifier les appareils de mesure
- de vérifier que les modifications apportées ne diminuaient pas la sécurité intrinsèque du laboratoire.

Le travail réalisé présente le modèle et la méthodologie appliqués afin de définir les meilleures barrières de prévention, de protection et de mitigation qui ont été positionnées dans le but d'assurer le meilleur niveau de sécurité à tous les travailleurs. Pour cela, nous avons associé nos connaissances sur les produits pulvérulents à une approche systémique a priori de type MADS (Méthodologie d'Analyse des Dysfonctionnements dans les Systèmes). Ce modèle a pour principaux avantages d'être simple, pédagogique et complet (Laurent, 2003). Cette approche nous a permis de réaliser une modélisation systémique et systématique des dangers. Un « système laboratoire » a été défini, et ensuite décomposé en différents sous-systèmes. Dans cette étude nous ne développerons que le travail effectué sur le sous-système « sphère de 20 litres ».

---

\* Auteur à qui la correspondance devrait être adressée : [perrin@ensic.inpl-nancy.fr](mailto:perrin@ensic.inpl-nancy.fr)

## 2. Présentation de la démarche adoptée

Analyser les risques de notre système laboratoire nécessite d'identifier les dysfonctionnements de nature technique (défaillance matérielle) et de nature opératoire (défaillance opérationnelle, relationnelle ou organisationnelle), dont l'enchaînement ou la conjonction peut conduire à des effets non souhaités. Pour réaliser ce travail, nous nous sommes appuyés sur la méthode MOSAR (Méthode Organisée Systémique d'Analyse des Risques) (Perilhon, 1999 ; Perilhon, 2003). Cette méthode permet notamment de réaliser une analyse des risques principaux. Elle vise à identifier les dangers, les scénarios de risques majeurs possibles et conduit à hiérarchiser les scénarios et à identifier les moyens de prévention et de protection permettant de neutraliser les scénarios (Figure 1).

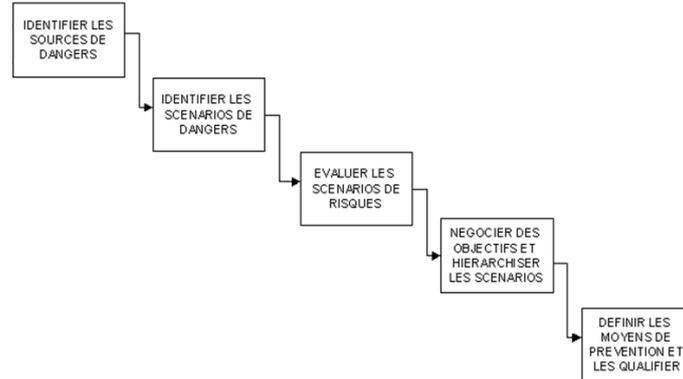


Figure 1. Les différentes étapes de la méthode MOSAR

L'identification des sources de danger se fait en utilisant un modèle général appelé MADS (Méthodologie d'Analyse de Dysfonctionnement dans les Systèmes) (Figure 2). On s'appuie pour cela sur une grille générale qui répertorie les différentes sources de danger possibles.

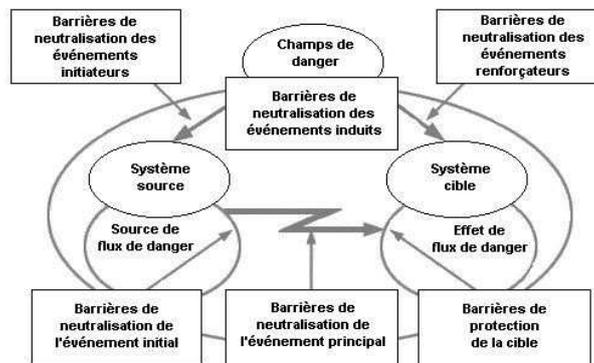


Figure 2. Le modèle MADS et les différents positionnements possibles de barrières de sécurité

Dans une première étape, chaque système est analysé en détails, ce qui permet de repérer en quoi chaque sous-système peut être une source de danger. Dans une deuxième étape, on recherche les événements initiaux pour chaque source de danger. On recherche ensuite quels sont les événements initiateurs (externes et internes) qui peuvent être à l'origine de ces événements initiaux et enfin on détermine quels sont les événements principaux que généreront les événements initiaux identifiés. Dans une troisième étape, chaque système ainsi analysé est alors modélisé sous forme d'une boîte noire avec en entrée les événements initiateurs et en sortie les événements principaux. On peut alors procéder à l'identification des scénarios de danger. On réalise par la suite la construction d'un arbre de défaillances afin de placer finalement les barrières de prévention, protection et mitigation.

### **3. Que sait-on des nanoparticules ?**

Le domaine des nanoparticules et de la nanotechnologie constitue un créneau de recherche en pleine croissance. Les chercheurs, et de plus en plus de travailleurs, sont exposés aux nanoparticules et cette tendance va certainement s'accroître au cours des prochaines années. Si on se base sur un rapport récent (Ostiguy et al., 2006) qui résume les grandes conclusions sur la toxicité des particules ultrafines, particules dont les propriétés granulométriques sont semblables aux nanoparticules industrielles, on peut conclure que les nanoparticules auront des effets toxiques de natures diverses et sur de nombreux organes, même s'ils sont absorbés presque uniquement par voie pulmonaire. Les propriétés toxicologiques relatives aux nanoparticules ont néanmoins fait l'objet de plusieurs études. Quoique celles-ci demeurent fragmentaires en ce qui concerne les divers aspects toxicologiques et la diversité des nanomatériaux qui ont été évalués, de nombreux effets délétères ont été mesurés, notamment chez l'animal. Ces nanoparticules inhalées, ingérées ou absorbées par voie transcutanée, peuvent se retrouver dans le sang en ayant franchi tous les mécanismes de protection du corps humain (notamment respiratoire, gastro-intestinal et cutané) et se distribuer ainsi dans les différents organes et s'accumuler sur certains sites spécifiques. Une autre particularité des nanoparticules réside dans le fait que la toxicité semble reliée à leur surface. Il s'agit ici d'une différence majeure par rapport aux situations usuelles où la toxicité est normalement reliée à la masse de produit. Or, puisque les particules sont très petites, de faibles quantités, exprimées en masse, elles pourraient avoir des effets toxiques importants, compte tenu de leur importante surface. Les propriétés des nanoparticules changent parfois radicalement : c'est ainsi que le dioxyde de titane, reconnu comme non toxique, montre une importante toxicité pulmonaire lorsqu'il est de dimension nanométrique.

Compte tenu des nombreuses inconnues reliées aux nanoparticules, à leurs effets potentiels sur la santé et aux risques documentés de toxicité des particules ultrafines chez l'homme, l'instauration de procédures strictes de prévention et de protection demeure la seule façon de prévenir tout risque de développement de maladies professionnelles. Ainsi, les travailleurs potentiellement exposés aux nanoparticules doivent être prudents et appliquer des mesures de sécurité, de contrôle de l'exposition et de protection collective et individuelle lorsqu'ils utilisent ces produits.

### **4. Modélisation du système étudié :**

Le travail réalisé vise à identifier, évaluer, maîtriser, et gérer les dysfonctionnements du système laboratoire. Nous avons dans ce but adopté une démarche de modélisation systémique ; le système « laboratoire de sécurité des procédés » a donc été décomposé en quatre sous-systèmes : les appareils de mesure (sous-système 1), les opérateurs (sous-système 2), l'environnement actif (sous-système 3) et l'ensemble des fournitures (sous-système 4). Le sous-système 1 est composé respectivement des appareillages classiques utilisés dans un laboratoire de sécurité des procédés travaillant sur la thématique des explosions de poussières. Le sous-système 2 comprend respectivement les stagiaires et les chercheurs formés et autorisés à manipuler sur les appareils de mesure. L'environnement actif regroupe les agents d'entretien, les visiteurs ainsi que les chercheurs non habilités à travailler sur les appareils de mesure ; enfin le sous-système 4 comprend le mobilier, les sorbonnes, les paillasses, tout ce qui est utile au fonctionnement de base du laboratoire.

Notre équipe est souvent amenée à travailler avec une sphère d'explosion de 20 litres qui est un appareil normalisé (commercialisé par la société Kühner AG) permettant d'obtenir la pression maximale ainsi que la vitesse de montée en pression d'une poussière explosible (Figure 3). Nous nous proposons par conséquent de nous limiter à l'étude des interactions entre le système sphère et les deux sous-systèmes cibles « environnement actif » et « opérateur ». Nous détaillerons la mise en place des barrières de sécurité que nous avons été amenés à mettre en place pour garantir la sécurité des opérateurs ainsi que l'intégrité de l'environnement actif lors de l'utilisation de la sphère d'explosion. Le scénario que nous avons retenu est l'émission dans le laboratoire d'un flux de nanoparticules lors de l'utilisation de cette sphère d'explosion.

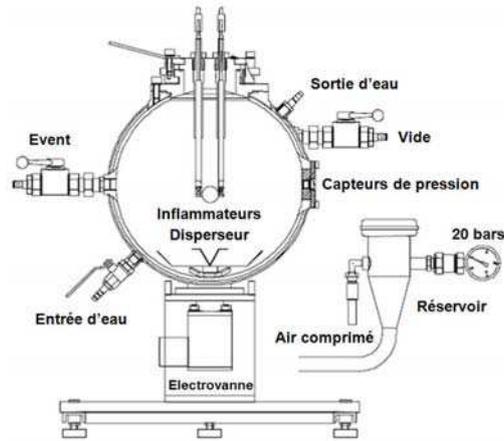


Figure 3. Schéma de la sphère de 20 litres

Nous devons souligner que la sphère de 20 litres est assimilable à un réacteur fermé, il en est tout autre pour d'autres appareils comme le four Godbert-Greenwald ou le tube de Hartmann modifié qui sont assimilables à des réacteurs ouverts.

## 5. Impacts du flux de danger sur les cibles

### 5.1 Impact potentiel du flux de danger sur un opérateur formé

Un opérateur manipulant des nanopoudres est essentiellement exposé à des risques chimiques ou physico-chimiques chroniques. Les nanoparticules, de part leurs propriétés chimiques peuvent induire une toxicité chimique qui se manifestera sur le long terme. Pouvant passer aisément dans le corps, les nanoparticules peuvent également modifier les propriétés physiques des fluides sanguins (Jung et al., 2006), ce qui pourrait entraîner de la fatigue cardiaque sur le long terme. A ce risque chronique, s'ajoute un risque accidentel : le risque chimique. Un contact accidentel avec des nanopoudres pourra entraîner des brûlures chimiques (peau, yeux, etc.) voire avoir un impact physiologique soudain (empoisonnement rapide au contact de nanoparticules pharmaceutiques très réactives par exemple).

### 5.2 Impact potentiel du flux de danger sur l'environnement actif

On peut considérer que l'utilisation des nanoparticules représentera un risque chronique mais également un risque accidentel.

De part la nature ponctuelle de la présence des visiteurs et chercheurs externes à l'unité nous considérons que ces personnes seront principalement exposées à un risque accidentel ponctuel. Par contre, les éventuels agents d'entretien, seront eux au contraire soumis aux deux typologies de flux (chronique et accidentel) de part la nature répétitive, voire journalière, de leur présence dans le laboratoire.

Connaissant la nature des nanoparticules ainsi que l'impact potentiel d'un flux de nanoparticules, nous disposons des éléments nécessaires à l'analyse des événements initiaux et initiateurs à l'origine du flux de nanoparticules qui nous permettront de positionner les barrières de prévention et de protection. Nous avons pour cela réalisé un arbre de défaillance sur la sphère de 20 litres.

## 6. Présentation de l'arbre de défaillance

La construction de cet arbre de défaillance repose sur l'étude des événements entraînant l'événement principal « flux de nanoparticules lors de l'utilisation de la sphère de 20 litres ». Il faut ensuite successivement en partant de l'événement principal sélectionné en allant vers les événements élémentaires analyser en spécifiant précisément ce qu'il représente et dans quel contexte il peut apparaître. Il faut ensuite représenter graphiquement les relations de cause à effet par des portes logiques (ET, OU) qui permettent de spécifier le type de combinaison entre les événements intermédiaires qui conduisent à l'événement analysé. La représentation se termine par des événements élémentaires.

Pour pouvoir réaliser une étude de ce type, il est absolument nécessaire de vérifier que le système a un fonctionnement cohérent, de connaître la décomposition fonctionnelle du système, de définir les limites du système (le degré de finesse de notre étude dépend des objectifs) et de connaître les modes de défaillance des composants, c'est par exemple en s'appuyant sur une analyse de type AMDEC que les branches de l'arbre peuvent être construites.

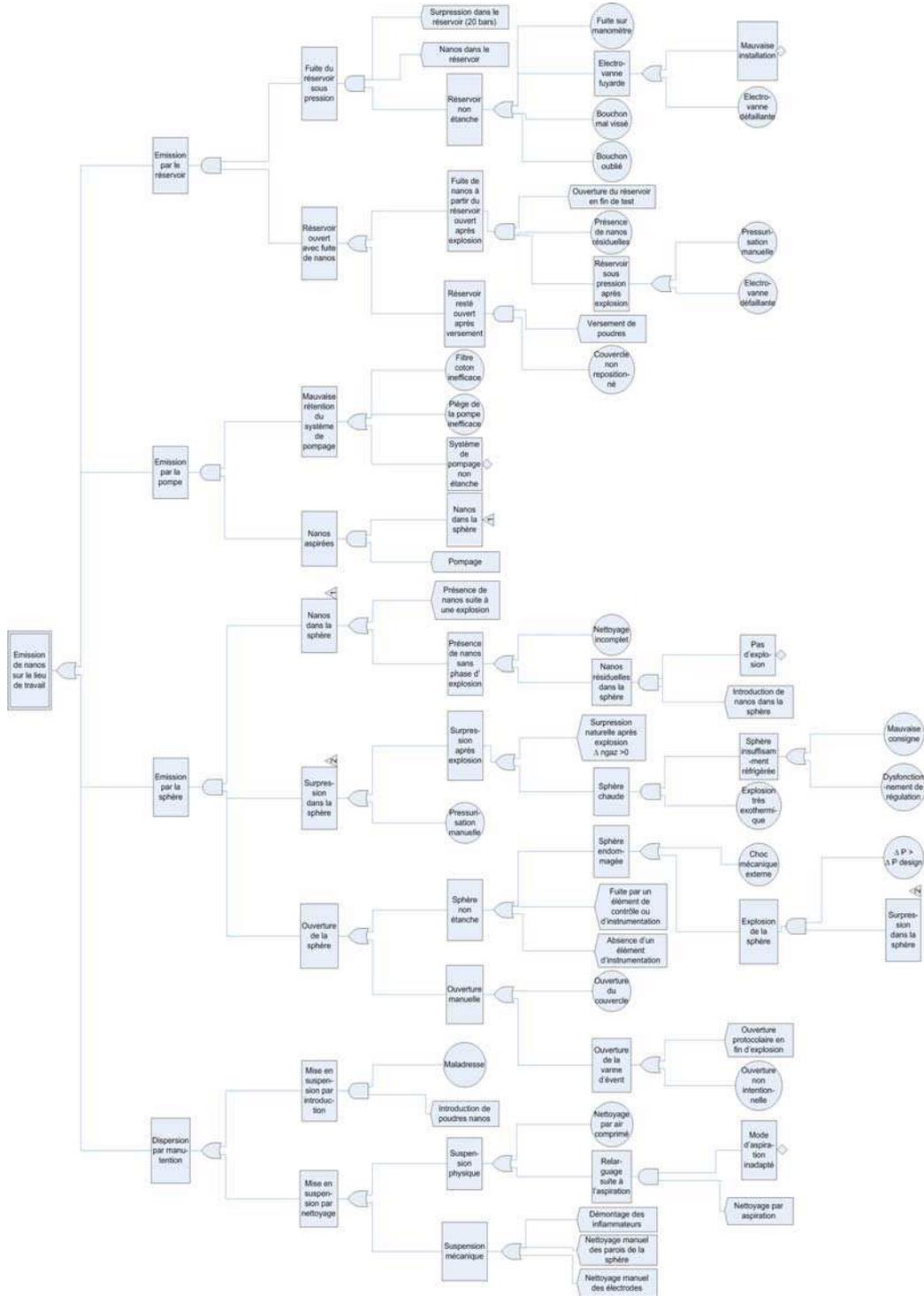


Figure 4. Arbre de défaillance du scénario « flux de nanoparticules lors de l'utilisation de la sphère de 20 litres »

L'arbre présenté (Figure 4) se décompose au final en 21 événements élémentaires et 22 événements qui ne sont pas considérés comme élémentaires mais dont les causes ne sont pas toutes développées dans

cette étude. L'écriture de cet arbre fut réalisée lors de séances de travail qui faisaient suite à des travaux individuels réalisés aussi bien par des utilisateurs expérimentés que par des personnes extérieures au groupe de recherche et n'ayant jamais travaillé sur une sphère d'explosivité. Cet arbre est le résultat d'un travail collectif qui intégra également le retour d'expérience partagé avec d'autres utilisateurs européens (universitaires, industriels et institutionnels) de sphères de 20 litres. Nous avons également 11 portes ET, 22 portes OU qui encadrent 31 événements intermédiaires. L'analyse comporte aussi bien l'étude des scénarios lors de la phase normale et nominale d'utilisation de la sphère que lors des différentes phases de maintenance et de marches dégradées identifiées.

## 7. Positionnements des barrières de sécurité

Après avoir présenté l'arbre de défaillance (Figure 4) nous allons maintenant aborder la description des différents types de barrières envisagées pour tenter d'empêcher cet événement principal de se manifester. Le terme barrière de sécurité est très utilisé depuis le début des années 80 (Sklet, 2006). Il définit la fonction ou l'objet capable d'éliminer ou de réduire l'évolution d'un événement, et sa propagation dans une chaîne d'événements non souhaités.

En tentant de privilégier une sécurité intrinsèque (Kletz, 2003) tout en gardant les spécificités et la certification de la sphère vis-à-vis de son utilisation avec des particules microscopiques, nous avons décidé d'identifier, de positionner et de formaliser l'utilisation de 50 barrières de sécurité pour lutter contre l'apparition de l'événement principal (barrière de prévention) ainsi que de 11 barrières supplémentaires (barrières de protection et de mitigation) destinées à protéger les personnes, l'environnement et les autres appareils dans le cas où un flux de nanoparticules serait néanmoins émis lors de l'utilisation de la sphère d'explosion. Les différents types de barrières sont présentés dans la Table 1 et nous pouvons voir leur positionnement sous la forme d'un nœud papillon (Delvosalle et al., 2004) dans la Figure 5.

Table 1. Les différents types de barrières utilisées

Type de barrière	Définition	Exemples	Nombre
Humain : procédure active	Barrière avec détection/ diagnostic/action réalisés par un opérateur	Législation, procédures, évacuation, actions coordonnées	29
Symbolique : avertissement actif	Barrière avec une détection instrumentée ou un diagnostic et une action opérateur	Alertes de sécurité, affichage, etc.	2
Active: activation manuelle	Barrière avec un système de détection, diagnostic et action opérateur	Arrêt ou ajustement manuel en réponse à une détection ou une alarme	5
Passive : active permanente	Barrière actionnée par un mécanisme. Nécessite un diagnostic et une activation par un autre procédé ou un opérateur	Ventilation, système d'inertage	5
Passive : passive temporaire	Barrière actionnée par un mécanisme ou déclenché par un opérateur	Equipements de protection individuelle, inhibiteurs	5
Passive : intrinsèque	Propriété des équipements	Epaisseur d'un équipement, caractéristiques, compatibilité, etc.	15
Passive : ajout	Barrière actionnée par un mécanisme, ajout sur un appareil principal	Système de captage ou de confinement secondaire, système de drainage, mise à la terre, etc.	2

Ces 63 barrières de sécurité sont nécessaires pour nous permettre d'assumer l'utilisation de nanoparticules dans la sphère d'explosion et de gérer l'événement principal présenté dans cette étude. En aucun cas elles ne peuvent être considérées comme suffisantes si l'on considère le laboratoire de l'équipe sécurité des procédés. Cette étude doit être répétée pour tous les événements redoutés ainsi que pour tous les appareils présents et pouvant être en contact avec des nanoparticules.

Il faut ensuite réaliser des liens entre tous les appareils (sous-systèmes) pour tenter de mettre en évidence d'éventuels scénarios d'accident.

Au final l'étude réalisée sur la totalité du laboratoire de sécurité des procédés permet de mettre au point une véritable stratégie de management de la sécurité liée à l'utilisation de nanoparticules, aussi bien en marche normale, qu'en fonctionnement dégradé et de préparer une gestion a priori des accidents potentiels.

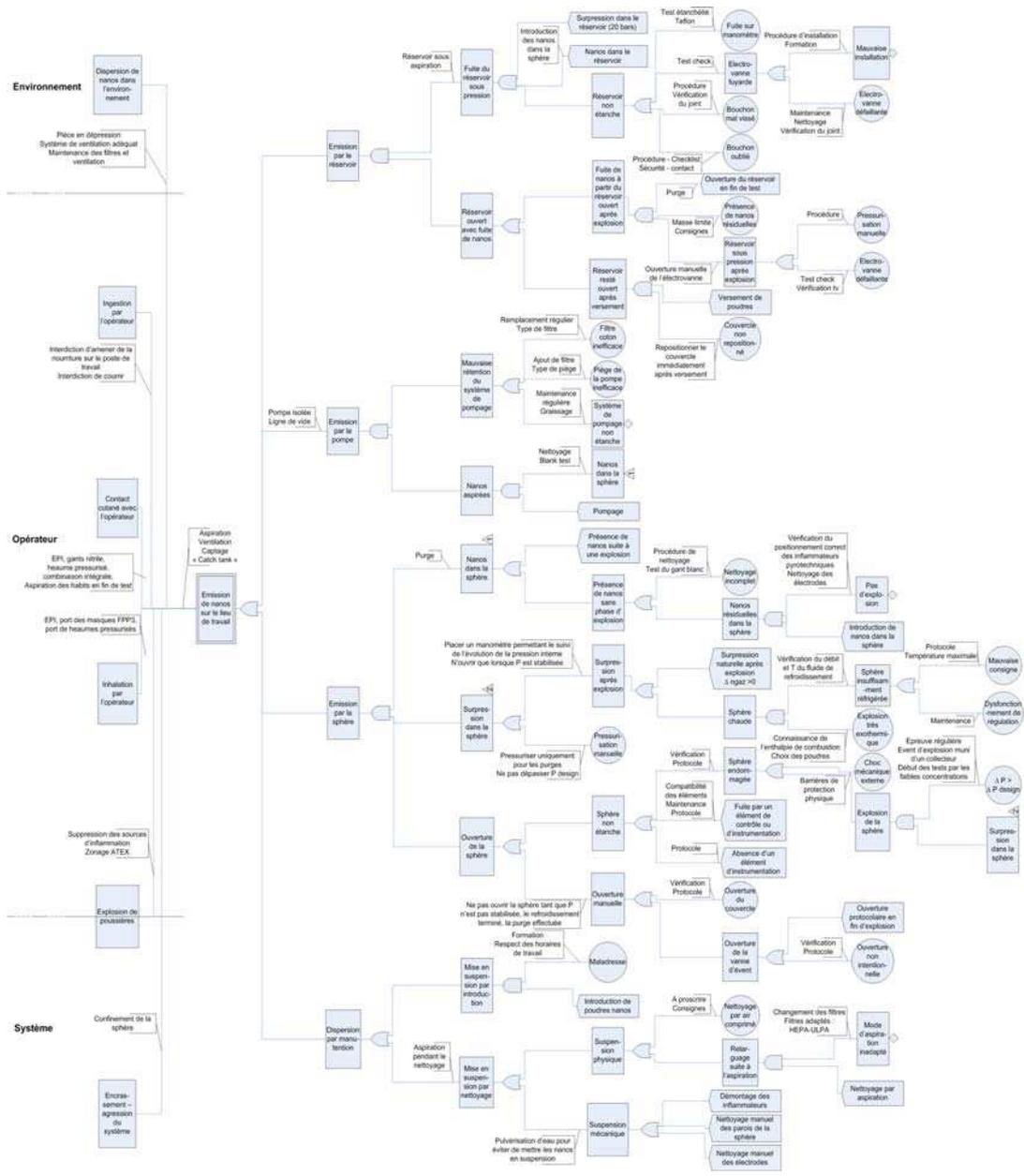


Figure 5 : Arbre de défaillance du scénario « flux de nanoparticules lors de l'utilisation de la sphère de 20 litres », positionnement des barrières de sécurité.

Tous les deux ans, le fabricant de la sphère propose une certification de cet appareillage selon un test CaRo (Calibration Round Robin) conformément à la norme ISO 9000 demandant le calibrage de tout appareil de mesure par rapport à un standard. Ce test s'effectue en répétabilité et reproductibilité sur une poudre envoyée par le constructeur à une cinquantaine de laboratoires détenant une sphère d'explosion à travers le monde (Kühner, 2005). Le LSGC réalisa (et a obtenu) les certifications CaRo des années 1998, 2001 et 2003 avec la sphère avant la mise en place des barrières de sécurité liées aux nanoproducts. Le test de calibration de 2005 fut réalisé au LSGC sur une sphère sécurisée par les 63 barrières identifiées. Ces barrières de sécurité ne nuisent donc pas à la répétabilité et à la reproductibilité des mesures.

## 8. Conclusion

La réflexion menée par notre groupe de travail permet de décrire, d'évaluer et de modéliser les dangers et les risques liés à l'utilisation de nanopoudres dans un laboratoire. Ceci a pu être mené à bien grâce à l'utilisation du modèle MADS pour modéliser de façon systémique les flux de danger auxquels nous pouvions être exposés. Menée sur la totalité des appareils présents dans le laboratoire elle nous permet l'identification et la modélisation de scénarios pouvant avoir un impact sur la santé et la sécurité. Cette étude de longue haleine permet la mise en place d'actions permettant de réduire les risques et les impacts des flux de dangers potentiels relatifs aux nanoparticules via la définition des barrières de prévention, de protection et mitigation.

L'étape suivante est la qualification des barrières de sécurité. Cette étape peut (pour simplifier) être assimilée à un positionnement de barrières sur les barrières de sécurité afin de s'assurer de leur bon fonctionnement et de leur pérennité, elle fut réalisée au sein du LSGC avec une analyse multicritères prenant en compte entre autre l'efficacité, la disponibilité, la robustesse et la fiabilité de chacune des barrières. Au final, une étude de ce type permet de montrer aux responsables du laboratoire que nous avons positionné des barrières qui vont de la formation des opérateurs à l'identification des dangers liés aux nanoproducts au management global de la sécurité au sein du laboratoire. Elles sont essentiellement des barrières de prévention positionnées en amont de l'événement principal pour rendre le procédé intrinsèquement plus propre et plus sûr, mais également des barrières de prévention, de protection et de mitigation dans le cas où les événements redoutés pourraient impacter les différentes cibles. Il ne faut pas non plus oublier d'être toujours extrêmement vigilant car aucune méthode d'analyse de risques n'est exhaustive et ne permet donc de garantir que toutes les situations, causes et effets ont été examinées. De plus nous préconisons un suivi médical préventif spécifique pour toute personne manipulant des nanoparticules afin de pouvoir appréhender au mieux les éventuels aspects chroniques.

## Références

- Delvosalle, C., Fiévez C. and Pipart A., 2004. Methodology for identification of major accidents hazards and methodology for the identification of reference accidents scenarios. Deliverable D1C in WP 1, Projet Aramis, 5° BCRD, Juillet 2004, Mons, Belgique (<http://aramis.jrc.it>) 427.
- Jung, J., Hassanein and Lyczkowski R. W., 2006. Hemodynamic Computation using Multiphase Flow Dynamics in a right Coronary Artery. *Annals of Biomedical Engineering* doi: 10.1007/s10439-005-9017-03.
- Kletz, T.A., 2003. Inherently Safer Design - Its Scope and Future. *Trans IChemE*. 81(B), 401-405.
- Kühner, A., Final Report Calibration-Round-Robin CaRo 05. 2005. Birsfelden, Switzerland, online reports (<http://www.kuhner.com>).
- Laurent, A., 2003. Sécurité des procédés chimiques: connaissances de base et méthodes d'analyse de risques. Génie des procédés de l'Ecole de Nancy, Edition Tech. Et Doc. Paris: Lavoisier.
- Le Moigne, J.-L., 1994. La théorie du système général: théorie de la modélisation. Réseau Intelligence de la Complexité - R.I.C. Ed. Collection Les Classiques du Réseau Intelligence de la Complexité. 352.
- Ostiguy, C, Lapointe G, Ménard L, Cloutier Y, Trottier M, Boutin M, Antoun M, Normand C, 2006. Les nanoparticules : État des connaissances sur les risques en santé et sécurité du travail, rapport IRSST Montréal.
- Perilhon, P., 1999, Réflexions sur les modèles de la science du danger. Ecole d'été "gestion scientifique du risque". Albi, France.
- Perilhon, P., 2003. MOSAR présentation de la méthode. Techniques de l'Ingénieur. Traité sécurité et gestion des risques [SE4 060].
- Schupp, B., et al., 2006. Design support for the systematic integration of risk reduction into early chemical process design. *Safety Science*, 44(1), 37-54.
- Sklet, S., 2006. Safety barriers: Definition, classification, and performance. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19(5), 494-506.