

## Sujet de thèse : Contribution aux traitements des incertitudes : application à la métrologie des nanoparticules sous forme d'aérosols

### Contexte des Incertitudes

Le traitement des Incertitudes (de mesures, d'essais,..) est une thématique en plein essor aussi bien dans la sphère académique qu'en statistiques industrielles, les secteurs de l'environnement, la santé, la finance... Aujourd'hui, le traitement des incertitudes dans les problèmes industriels fait l'objet d'un consensus méthodologique. Le LNE, l'IRSN et Supélec sont d'ailleurs membres actifs du groupe « Incertitudes et Industrie » de l'Institut de Maîtrise des Risques qui développent des collaborations et travaux scientifiques entre industriels et académiques sur ce sujet.

En métrologie, il existe notamment des normes, NF ISO 13005 (GUM) et son supplément numéro 1 qui précisent cette démarche. La méthodologie communément admise repose sur trois points :

- spécification du ou des modèle(s) physique(s) représentant le comportement du système,
- construction d'un modèle probabiliste des variables d'entrée des modèles, à partir des données disponibles, du jugement d'expert, etc..
- propagation des incertitudes à travers les modèles, de façon à obtenir des informations de nature probabiliste sur les quantités d'intérêt calculées par les modèles (« réponse »), telles que moments statistiques, quantiles, probabilité de dépassement de seuils. La hiérarchisation des paramètres d'entrée vis-à-vis de la quantité d'intérêt considérée est également un des produits de la propagation d'incertitudes.

Dans ce contexte, il apparaît clairement que les résultats des simulations dépendent de la qualité du modèle probabiliste utilisé. Il existe cependant beaucoup de cas pratiques pour lesquels il n'est pas possible de construire un modèle précis, notamment :

- quand les données disponibles, et qui attestent de la variabilité du paramètre, sont en nombre trop faible pour pouvoir appliquer les techniques classiques de statistique inférentielle ;
- quand le paramètre considéré n'est pas mesurable directement, mais indirectement à travers une chaîne de mesure dont le résultat demande une interprétation (en termes de problème inverse) pour remonter à la valeur dudit paramètre.

La phase de modélisation physique tient également une place importante dans le calcul d'incertitude. Or, la connaissance du modèle physique peut être très partielle. Dans d'autres cas (problèmes inverses notamment) le choix entre plusieurs méthodes de résolution, de complexité différente, conduisent à des approximations plus ou moins acceptables, elles-mêmes sources d'incertitude pour la variable d'intérêt.

En outre, les modèles de complexité différente (et d'incertitude, bien que le lien ne soit pas aussi direct) conduisent à utiliser (donc modéliser) les sources différemment, ce qui enrichit encore plus l'incertitude sur la variable d'intérêt.

Les méthodes usuelles de détermination de l'incertitude n'abordent pas cet aspect incertitude de modélisation et de méthode ou alors les représentent comme une variable d'entrée incertaine supplémentaire, choix très artificiel et limitatif.

Forts de leur expérience sur la thématique « Incertitudes », le LNE, l'IRSN et Supélec souhaitent désormais enrichir et élargir le schéma méthodologique actuel de traitement des incertitudes pour dépasser les limites évoquées précédemment. Dans ces cas, la formulation du traitement des incertitudes dans un contexte Bayésien est pertinente. Le développement méthodologique du traitement Incertitudes s'effectuera essentiellement dans le cadre d'une application en métrologie sur la détermination de la distribution granulométrique d'un aérosol nanométrique.

### Contexte de la métrologie des nanoparticules

L'exposition aux nanoparticules a, certes, toujours existé. En effet, l'air que nous respirons contient des quantités très importantes de particules ultrafines naturelles : plus de 10 000 particules supérieures à 10 nm dans 1 cm<sup>3</sup> d'air, avec de fortes variations selon la saison ou le degré de pollution

industrielle. Dans le monde du travail, cette exposition est aussi très ancienne : condensation de fumées émises par des fours métallurgiques, fumées de soudage, fabrication et utilisation de noirs de carbone, etc.

Cependant, l'essor et l'industrialisation des nanotechnologies vont conduire à la production d'une très grande quantité de nanofibres et de nanoparticules aux propriétés physico-chimiques très diverses, voire nouvelles. Les risques sanitaires qui découlent de ces nouveaux développements concernent aussi bien les travailleurs du secteur, qui peuvent être exposés de manière chronique à des quantités importantes de nanoparticules, que la population en général, dont l'exposition est plus indirecte.

Le LNE et l'IRSN sont équipés de l'instrument commercial le plus utilisé à ce jour au niveau national et international pour mesurer la distribution granulométrique des nanoparticules en phase aérosol, instrument qui est le SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer). Cet instrument couple un DMA (Differential Mobility Analyzer) permettant de sélectionner des particules en suspension dans un gaz (*définition d'un aérosol : suspension de particules dans un gaz ayant une vitesse limite de chute négligeable*) suivant leur mobilité électrique et un CNC (Compteur de Noyaux de Condensation) placé en aval ayant pour rôle de compter les particules sélectionnées, ce qui permet d'obtenir une distribution granulométrique entre quelques nanomètres et environ 1 µm sur plusieurs dizaines de canaux de mesure.

Jusqu'à présent, bien que certains travaux aient été menés sur la pertinence des mesures de granulométrie des particules effectuées par cet appareil, aucune étude n'a été réalisée pour évaluer l'incertitude associée à une distribution granulométrique. Par conséquent, il est difficile de se prononcer sur la qualité des mesures, de faire évoluer le matériel puisque les paramètres principaux d'incertitude ne sont pas connus et chiffrés, de comparer des résultats obtenus lors de campagnes d'inter-comparaison, etc.

Le laboratoire national de métrologie suisse (METAS) travaille depuis une dizaine d'années sur les mesures de granulométrie et de concentration en nombre effectuées avec le système de mesure SMPS. Il s'est tout d'abord intéressé à l'étalonnage du SMPS et a organisé des exercices d'inter-comparaison entre des analyseurs de particules. Les résultats d'exercices d'inter-comparaison montrent que les diamètres et les concentrations en nombre obtenus peuvent être différents d'un laboratoire à l'autre, alors que le même type d'appareil (SMPS) est utilisé (workshop EURAMET n° 834, Berlin, octobre 2007).

A ce jour, aucun laboratoire national de métrologie ne peut fournir ce type de caractéristique dimensionnelle avec une incertitude associée, et ce, bien que le besoin industriel dans ce domaine soit manifeste (utilisation dans les lieux de travail, salles blanches, etc.).

Les travaux de thèse proposés seront réalisés dans le cadre d'une collaboration entre l'IRSN (Laboratoire de Physique et de Métrologie des Aérosols), le LNE (Division Métrologie Chimique et Biomédicale et DG - Service Mathématiques et Statistiques) et Supélec (Département Signaux & Systèmes Électroniques).

### Objectifs de la thèse

- Fournir un cadre méthodologique innovant de traitement d'incertitude adaptée aux mesures de SMPS
- Améliorer les mesures de granulométrie d'un aérosol ultra-fin fournies par un SMPS : calculer et automatiser l'évaluation de l'incertitude sur cette mesure

Ces travaux permettront donc à terme de fournir des distributions granulométriques avec une incertitude de mesure associée, dont l'intérêt réside par exemple dans le fait que :

- les mesures effectuées par plusieurs SMPS pourront être comparées entre elles, ce qui pourra conduire à mettre en évidence éventuellement des biais systématiques et dans ce cas à mettre en place des actions pour les corriger,
- les mesures pourront être comparées entre elles dans le temps et dans l'espace afin de dégager des tendances et des évolutions de la granulométrie de l'aérosol ambiant, avec un niveau de confiance connu.

## Déroulement du travail de thèse

Le travail de thèse portera dans un premier temps à la fois sur la compréhension de l'instrument SMPS (physique sous-jacente, modélisation, sources d'incertitude et leur quantification, état de l'art sur les mesures granulométriques, etc.) et sur un état de l'art sur la prise en compte des erreurs de modélisation physique, qu'elles soient dues au manque de précision d'un modèle direct, ou apportées par une procédure d'inversion.

Dans un deuxième temps, les travaux porteront sur la recherche d'une méthodologie pour caractériser les incertitudes dues aux erreurs de modèles. Au-delà de l'intérêt direct qui est de quantifier les incertitudes, cette caractérisation sera également pensée, et utilisée, pour choisir le meilleur modèle physique ou la meilleure procédure d'inversion, en étudiant notamment la sensibilité des deux méthodes d'inversion à disposition (Méthodes MICRON et TWOMEY) aux variations des paramètres d'entrée.

Enfin, les développements précédents seront appliqués pour comparer des résultats déjà existant sur la mesure de granulométrie d'aérosols nanométriques.

### Contacts :

Nicolas FISCHER  
Laboratoire National de métrologie et d'Essais (LNE)  
Service Mathématiques et Statistiques  
01 30 69 10 79  
[nicolas.fischer@lne.fr](mailto:nicolas.fischer@lne.fr)

François GENDARMES  
Institut de Radioprotection et de sûreté Nucléaire (IRSN)  
Laboratoire de Physique et de Métrologie des Aérosols  
01 69 08 55 06  
[francois.gensdarmes@irsn.fr](mailto:francois.gensdarmes@irsn.fr)

Laurent LEBRUSQUET  
SUPELEC  
Département Signaux & Systèmes Électroniques  
01 69 85 14 23  
[laurent.lebrusquet@supelec.fr](mailto:laurent.lebrusquet@supelec.fr)