

_Nanosécurité :

**_Etudier les émissions des déchets nano-structurés
dans les procédés d'incinération**

_Résultats du projet NanoFlueGas

[2 avril 2015]

► INERIS // 03 44 55 63 01 // 06 20 90 03 48 // Aurelie.Prevot@ineris.fr ◀
► Ecole des Mines de Nantes // 02 51 85 81 90 // Nathalie.le-calvez@mines-nantes.fr ◀
► Séché Environnement // 02 43 59 60 60 // j.aubert@groupe-seche.com ◀



NanoFlueGas : une étude pionnière sur l'incinération de déchets nanostructurés

Paris, 2 avril 2015 – L'INERIS, les Mines de Nantes et Trédi, filiale du groupe Sêché Environnement ont conduit, avec le soutien de l'Ademe, le projet NanoFlueGas, qui constitue l'un des premiers projets sur la sécurité des nanomatériaux en fin de vie, notamment dans le cadre de la filière incinérative.

Ces travaux exploratoires montrent, d'une part, que la nanostructure de certains déchets peut être transférée dans les émissions brutes en sortie de four qui sont générées par le processus de combustion. D'autre part, les premiers résultats indiquent que les systèmes d'épuration de type filtre à manche font preuve d'une bonne efficacité pour traiter ces émissions contenant des nanos.

Les produits nanostructurés ne bénéficient pas pour l'heure de traitement particulier en fin de vie. Il n'existe pas de filière d'incinération spécifique et l'efficacité des procédés actuels d'épuration des fumées n'est pas démontrée vis-à-vis de ce risque spécifique. En effet, la réglementation ne prend pas encore en compte les spécificités des nanomatériaux. Dans ce contexte, l'INERIS, les Mines de Nantes et TREDI, filiale du Groupe Sêché Environnement, ont mis en commun leur expertise pour mener à bien, entre 2011 et 2014, le projet NanoFlueGas.

Ce projet exploratoire est réalisé dans le cadre du programme CORTEA de l'Ademe « Connaissance, réduction à la source et traitement des Emissions dans l'Air », qui s'attache à prendre en compte les questions de santé-environnement dans les travaux de recherche sur la qualité de l'air. Coordonné par l'INERIS, le projet NanoFlueGas a pour vocation de contribuer à améliorer la sécurité de la filière Traitement de Déchets, en particulier l'incinération, vis-à-vis du risque présenté par les nanomatériaux manufacturés.

Contribuer à la sécurité de la filière incinération

L'objectif est d'une part de mieux appréhender, sur la base de l'étude de trois déchets, les mécanismes d'émission de nanocharges dans le processus de combustion. D'autre part, le projet se propose d'évaluer l'efficacité, vis-à-vis des nanomatériaux, des systèmes d'épuration des effluents gazeux utilisés dans les installations modernes d'incinération de déchets.

Ce projet est pionnier en ce qu'il s'efforce d'étudier la question de l'émission potentielle de nanos dans des conditions se rapprochant au mieux des conditions d'exploitation réelles de la filière de traitement de déchets par incinération. NanoFlueGas a ainsi permis de développer deux pilotes expérimentaux pour réaliser les essais : un four tubulaire et un système de filtration sur manche assistée par injection de sorbants.

Au terme de l'étude des gisements, trois déchets-types ont été sélectionnés pour la phase d'étude des émissions de combustion : un déchet « Carbone » sous forme de poudre, un déchet « Peinture » liquide et un déchet « Polymère » qui prend la forme d'un solide pâteux. Dans les trois cas, la présence de nanomatériaux dans le déchet a pu être confirmée et quantifiée par le couplage de plusieurs techniques analytiques.

Une base de connaissances qui ouvre la voie à d'autres travaux de recherche

Les résultats du projet NanoFlueGas constituent un premier socle de connaissances sur la fin du cycle de vie des nanos et ouvrent la voie à d'autres travaux visant à améliorer la prise en compte de la nanosécurité dans la maîtrise des risques de la filière incinération.

Les émissions brutes produites par les déchets en phase de combustion ont été étudiées avant épuration. Dans les trois cas, on observe l'émission d'un aérosol nanostructuré lors du processus de combustion : un aérosol de nano-carbone (déchet « Carbone ») et deux aérosols de nano-silice (déchets « Polymère » et « Peinture »). L'incinération ne supprime pas systématiquement le caractère nano-structuré des déchets, certaines nanocharges pouvant être transférées aux effluents gazeux bruts. Dans le cas du déchet Polymère, l'étude montre ainsi que la combustion entraîne l'émission, dans les gaz bruts, de deux familles distinctes de particules nanostructurées : l'une issue de la nano-structure contenue initialement dans le déchet, et l'autre produite par le processus de combustion.

Par ailleurs, les travaux réalisés dans le cadre de NanoFlueGas soulignent l'intérêt des filtres à manches, associés à l'injection de sorbants, comme système de traitement des émissions brutes. Dans les meilleures conditions, il semble que ce procédé, testé sur un aérosol nano-carbone, parvienne à retenir plus de 96% en nombre des nanoparticules de carbone émises dans les fumées brutes. L'efficacité de ce type d'équipement est généralement combiné à d'autres procédés de traitement sur une même ligne d'épuration des fumées. Par ailleurs, l'analyse du rapport coût-bénéfice de l'utilisation de ce système s'avère favorable dans le cas des unités équipées pour la valorisation énergétique, selon les premières estimations.

Etudier la fin du cycle de vie des nanos, un chantier prioritaire

L'INERIS, les Mines de Nantes, et TREDI, filiale du Groupe Sèché Environnement, ont mis en commun leur expertise pour mener à bien le projet NanoFlueGas, avec le soutien de l'Ademe.

Coordonné par l'INERIS, ce projet exploratoire a pour vocation de contribuer à améliorer la sécurité de la filière Traitement de Déchets, en particulier l'incinération, vis-à-vis du risque présenté par les nanomatériaux manufacturés. L'objectif est d'une part de mieux appréhender, sur la base de l'étude de trois déchets, les mécanismes d'émission de nanocharges dans le processus de combustion. D'autre part, le projet se propose d'évaluer l'efficacité, vis-à-vis des nanomatériaux, des systèmes d'épuration des effluents gazeux utilisés dans les installations modernes d'incinération de déchets.

Produire de la connaissance sur le « risque nano », une priorité

Le projet NanoFlueGas réalisé entre 2011 et 2014 est né d'un triple constat sur l'enjeu de santé publique que le « risque nano » constitue :

- les nanomatériaux peuvent présenter des risques pour la santé qui ne sont pas encore estimés avec certitude. Ce constat a conduit l'ANSES à recommander de limiter l'exposition des populations et de l'environnement, en l'absence de connaissances consolidées. L'Agence souligne, à cet effet, la nécessité de poursuivre les travaux de recherche.
- Au niveau international, européen et national, les travaux réglementaires destinés à encadrer l'utilisation des nanomatériaux ne sont pas achevés. En témoignent la révision des annexes du règlement européen REACH et la mise en place de groupes de travail par des instances internationales et européenne de normalisation.
- Du fait de leurs propriétés particulières, les nanomatériaux sont d'ores et déjà utilisés dans de nombreux produits. L'inventaire de l'Institut Woodrow Wilson répertoriait, en 2013, 1628 produits sur le marché mondial, dont 440 au niveau européen.

La gestion des déchets, une étape du cycle de vie des nanos à explorer

Dans ce contexte, les produits nanostructurés ne bénéficient pas aujourd'hui de traitement particulier en fin de vie. Il n'existe pas de filière d'incinération spécifique et l'efficacité des procédés actuels d'épuration des fumées n'est pas démontrée vis-à-vis de ce risque spécifique. En effet, la réglementation ne prend pas encore en compte les spécificités des nanomatériaux : dans le cadre de la Directive européenne dite « Emissions » (IED) qui a vocation à encadrer la réduction des rejets industriels, aucune Meilleure Technique Disponible (MTD) propre aux nanomatériaux n'est mentionnée dans le document de référence (BREF) relatif à l'incinération des déchets.

Pour tenter de répondre à ces enjeux techniques, le projet NanoFlueGas a d'abord procédé à l'identification des « gisements » de déchets pour sélectionner trois déchets nanostructurés représentatifs de flux avérés et conséquents. La composition des effluents gazeux bruts (non encore épurés) issus de la combustion de ces déchets a ensuite été analysée, ce qui a permis dans le même temps d'évaluer et de tester la pertinence d'un pilote expérimental de combustion. Dans une troisième phase, le projet s'est intéressé à l'efficacité des procédés de traitement des fumées existants vis-à-vis des nanomatériaux ; dans ce but, un pilote expérimental de filtration a également été développé.

NanoFlueGas, projet du programme CORTEA

Le projet NanoFlueGas a reçu le soutien de l'Ademe dans le cadre du programme CORTEA « Connaissances, Réduction à la source et Traitement des Emissions dans l'Air », lancé en 2011. Dans la droite ligne de la Loi du 12 juillet 2010, l'Ademe a orienté ses actions d'appui à la recherche dans le domaine de la qualité de l'air en tenant compte des émissions de polluants jugés les plus préoccupants pour la santé.

Cette mise en cohérence des problématiques de qualité de l'air avec les questions de santé-environnement est un élément structurant de la stratégie de recherche 2014-2020 de l'Ademe. Le programme CORTEA vise ainsi à contribuer au développement de solutions de réduction des émissions et d'amélioration des connaissances sur ces émissions. Les nanoparticules issues de nanomatériaux manufacturés font partie des polluants d'intérêt dans le secteur Industrie/Energie.

Les gisements concernés par les nanos : trois déchets-types sélectionnés

La première phase du projet NanoFlueGas a permis d'identifier des échantillons-types de déchets susceptibles de contenir des nanomatériaux en quantité suffisante pour mener à bien l'expérimentation. Les échantillons ont été identifiés à partir de l'hypothèse selon laquelle une grande partie des produits nano-structurés possède des nanostructures à base de silice et de carbone. En effet, les nanoparticules de noir de carbone constituent 20% de la production annuelle de nanoparticules (toutes applications confondues) et les nanoparticules de silice représentent 40% du total.

Les partenaires du projet ont sélectionné ces échantillons avec le souci qu'ils soient représentatifs de flux de déchets conséquents, réellement collectés et traités toutes filières d'élimination confondues, dont l'incinération. Ces échantillons appartiennent aux catégories des Déchets Dangereux des Ménages et Artisans (DDMA), et des Déchets Dangereux des Activités Economiques (DDAE) ; ils correspondent à des flux de déchets supérieurs à 50 t/an au sein du Groupe Sèche (toutes filières confondues). Le projet NanoFlueGas s'est également attaché à mettre en œuvre des dispositifs expérimentaux de combustion qui soient représentatifs à la fois de la filière incinérative spécialisée (Déchets Dangereux) et de la filière d'incinération des OMA (Ordures Ménagères et Assimilés).

Au final, les trois échantillons utilisés pour la phase d'étude des émissions de combustion ont été sélectionnés de manière à ce que les différentes formes que peut prendre un déchet soient prises en compte. Le déchet « Carbone » se présente sous forme de poudre, le déchet « Peinture » est liquide et le déchet « Polymère » prend la forme d'un solide pâteux.

Nanomatériaux : définition

Deux critères servent à définir le terme « nanomatériau » au niveau réglementaire et normatif : la taille et la notion d'intentionnalité pour conférer au matériau des propriétés nouvelles.

On distingue deux grandes catégories de nanomatériaux : les nano-objets qui ont une ou plusieurs dimensions externes de taille nanométrique (nanoparticules, nano-fibres/nanotubes, nanocouches...) ; les matériaux nano-structurés qui n'ont pas de dimensions externes dans le domaine nanométrique mais qui sont composés de parties ou de motifs de surface nanométriques (nanocomposites, agrégats nanostructurés, matériaux nanocristallins...).

Un phénomène de transfert potentiel de la nanostructure des déchets dans les émissions avant épuration

Le projet NanoFlueGas constitue l'un des premiers projets français et internationaux sur la sécurité des nanomatériaux en fin de vie. C'est un projet pionnier en ce qu'il s'efforce d'étudier la question de l'émission potentielle de nanocharges par des déchets nanostructurés, dans des conditions se rapprochant au mieux des conditions réelles. Les résultats du projet NanoFlueGas constituent un premier socle de connaissances sur le sujet et ouvrent la voie à d'autres travaux visant à améliorer la prise en compte de la nanosécurité dans la maîtrise des risques de la filière incinération.

La présence confirmée de nanoparticules dans les déchets

En préalable à l'analyse des émissions, les partenaires du projet ont procédé à une caractérisation de la composition des trois déchets sélectionnés, par le couplage original de plusieurs techniques analytiques (analyse élémentaire, chimie moléculaire, granulométrie, analyse morphologique). Dans les trois cas, la présence de nanomatériaux dans le déchet a ainsi pu être confirmée et quantifiée.

Le déchet « Carbone » sous forme de poudre contient 30% en masse de nanoparticules de noir de carbone. La masse sèche du déchet « Polymère » contient environ 8% de nanoparticules de silice. Le déchet « Peinture » est un déchet dont la masse sèche est composée de 0,5% de nanoparticules, principalement de silicium sous forme de silicates de calcium et de sodium.

Le caractère nano-structuré du déchet est pour partie transféré aux émissions brutes avant épuration

L'étude des émissions brutes produites par les déchets en phase de combustion (a été réalisée en laboratoire sur une installation pilote d'incinération spécialement adaptée pour les besoins du projet. Les émissions d'aérosols¹ ont été suivies, collectées et analysées pendant tout le processus de combustion. Cette étape du projet visait à évaluer la présence, dans les émissions avant épuration, des nanocharges initialement contenues dans le déchet ainsi que les éventuelles transformations que la combustion pourrait leur faire subir.

Dans les trois cas, on observe l'émission d'un aérosol nano-structuré lors du processus de combustion : un aérosol de nano-carbone (déchet « Carbone ») et deux aérosols de nano-silice (déchets « Polymère » et « Peinture »). Une analyse plus approfondie montre que l'incinération ne supprime pas systématiquement le caractère nano-structuré des déchets, certaines nanocharges pouvant être transférées aux effluents gazeux bruts. Dans le cas du déchet Polymère, l'étude montre ainsi que la combustion entraîne l'émission, dans les gaz bruts, de deux familles distinctes de particules nano-structurées : l'une issue de la nano-structure contenue initialement dans le déchet, et l'autre produite par le processus de combustion.

- Le déchet « Carbone » génère majoritairement des émissions gazeuses et aucun solide résiduel, du fait du caractère très complet de la combustion. Ce déchet est peu émetteur d'aérosol, en comparaison des deux autres déchets ; les particules qui dominent dans cet aérosol sont principalement < 100 nm. Des essais complémentaires seraient nécessaires pour mieux cerner la morphologie de ces nanoparticules.

La complémentarité entre les partenaires

L'INERIS a apporté au projet NanoFlueGas ses compétences en métrologie et en analyse physico-chimique des nanomatériaux ainsi que son expertise sur les processus de combustion. Entre 2008 et 2011, l'Institut a mené des travaux sur la combustion de polymères nano-structurés, dans le cadre du projet européen SAPHIR et du projet ANR NanoFeu.

Les Mines de Nantes comptent parmi leurs principaux axes de recherche l'étude des procédés de traitement physico-chimique des polluants gazeux et particulaires. Les Mines de Nantes disposent ainsi de moyens techniques d'essais pour étudier l'efficacité de ce type de traitement.

Trédi, filiale du Groupe Sèché Environnement, conçoit et exploite depuis plusieurs décennies ses installations de traitement thermique (couplé à la valorisation énergétique) et physico-chimique (couplé à la valorisation matière) de Déchets Dangereux. Le Groupe dispose par ailleurs de toutes les autres filières de traitement de déchets. Trédi possède ainsi une connaissance fine des gisements de déchets, ainsi que savoir-faire et expertise en matière d'incinération à échelle industrielle. TREDI dispose notamment de l'unité industrielle TREDI Salaise III, dûment habilitée à traiter deux types de flux : les déchets dangereux et les Ordures Ménagères et Assimilés.

¹ Un *aérosol* est un ensemble de particules solides ou liquides en suspension dans un milieu gazeux.

- Le déchet « Polymère » connaît une combustion rapide et intense, probablement due aux Composés Organiques Volatiles (COV) qu'il contient. La combustion génère un important dégagement de particules et un résidu solide (mâchefer) composé principalement de silicium et d'oxygène. Les analyses montrent que le dégagement de particules est un aérosol nano-structuré composé de silice, dans lequel on identifie deux populations distinctes de nanoparticules. La première est celle des particules de nano-silice initialement présentes dans le déchet. La seconde résulte d'un phénomène provoqué par la combustion : la transformation (par oxydation) du silicium organique non nanostructuré contenu dans le déchet en particules de nano-silice. Ce phénomène de production de nanoparticules par la combustion a déjà été observé, mais il n'avait jusqu'à présent jamais été démontré expérimentalement.
- Le déchet « Peinture », qui contient également des COV, a le même profil de combustion que le déchet « Polymère » : la combustion est rapide et intense et il en résulte un résidu solide composé principalement de calcium, titane et oxygène. Un aérosol nanostructuré, majoritairement composé de nano-silice amorphe (et non cristalline), se forme lors de la combustion. Cette nano-silice proviendrait des nanoparticules de silice contenues initialement dans le déchet : des analyses complémentaires permettraient de mieux estimer la part de la combustion dans l'émission ces nanoparticules de silice.

Quelles perspectives pour l'amélioration des connaissances sur la sécurité des nanos en fin de vie ?

Ces résultats sur les mécanismes de transfert permettent de dégager plusieurs axes de recherche futurs.

Le protocole orienté « terrain » et les développements expérimentaux du projet peuvent désormais être utilisés pour continuer à explorer la thématique incinération en approfondissant les résultats obtenus et en élargissant les travaux à une gamme plus large de déchets. Une thèse est ainsi actuellement en cours, en lien avec le projet, sur les mécanismes de dégradation thermique de matériaux thermo-plastiques nanostructurés, conçus spécialement pour l'étude.

Le projet NanoFlueGas ouvre des perspectives sur l'intérêt des développements analytiques pour la caractérisation des déchets et des résidus de combustion d'un point de vue qualitatif et quantitatif. Il conviendrait ainsi de disposer *in fine* d'outils standardisés pour vérifier la présence de nanocharges dans les déchets et les résidus et le cas échéant, déterminer en quelles quantités elles sont présentes.

Les résultats du projet ont également soulevé d'autres questions en matière de gestion des résidus : la présence de nanoparticules dans les émissions brutes, avant épuration, conduit à explorer la question de la gestion des résidus solides que sont les mâchefers, ainsi que la gestion des solides résiduels issus de l'épuration des fumées.

En amont du cycle de vie des produits, dans une logique de *safety by design*, il serait enfin intéressant d'étudier les formulations successives d'un produit dès sa conception, dans la perspective de modifier la part nano-structurée des effluents issus du traitement du produit devenu déchet.

Incinération : définition

L'incinération est une technique de traitement thermo-chimique des déchets par oxydation en présence d'excès d'air. Elle consiste en une combustion et *post*-combustion oxydante des déchets, associée à une ligne de traitement complexe des fumées qui s'en dégagent. Deux catégories de solides résiduels sont retrouvées : les mâchefers et les résidus de l'épuration des fumées.

Les fumées brutes d'incinération peuvent contenir plusieurs types de polluants, dont l'épuration est visée par les procédés de traitement des fumées : des gaz (NOX, gaz acides...), des particules ou des aérosols complexes pouvant contenir des composés particuliers, comme les métaux lourds ou encore des dioxines et des furannes. Ces dernières sont abattues spécifiquement par des systèmes dédiés, placés typiquement en fin de ligne de traitement des fumées.

Les procédés de traitement des fumées les plus efficaces pour réduire le risque nano : premières pistes

Les travaux conduits dans le cadre du projet NanoFlueGas – parmi les premiers sur ce thème émergent – soulignent l'intérêt des filtres à manches comme système de traitement d'émissions brutes contenant des aérosols nanostructurés.

Ce procédé de filtration assistée par injection de sorbants n'est pas représentatif du dispositif de traitement tout entier : il n'est que l'une des étapes d'une ligne complexe d'épuration des émissions.

Ces travaux demandent encore à être complétés et approfondis pour valider la pertinence de cette technique dans le cadre d'une stratégie de nanosécurité.

Etat de l'art des systèmes de traitement des émissions

Dans la mesure où il n'existe pas de filière spécifique de traitement des déchets contenant des nanomatériaux, les systèmes existants de traitement des fumées ne sont pas spécifiques à ce type de matériaux.

Une ligne complexe de traitement des fumées d'incinération se décompose généralement en plusieurs étapes : le refroidissement des émissions (permettant par ailleurs, pour les unités équipées, de récupérer l'énergie de la chaleur des fumées), le « dépolluage » (séparation gaz-particules), la neutralisation des gaz acides, puis le traitement spécifique de certains polluants, comme les oxydes d'azote (NOx) et les dioxines/furannes.

Les systèmes actuels de traitement stoppent la plus grande partie des particules de grande taille, généralement dès le début de la ligne de traitement, au cours de l'étape de refroidissement ; leur abattement se poursuit ensuite de manière efficace sur le reste de la ligne. Les particules les plus fines, qui représentent une faible proportion en masse, sont plutôt traitées en phase de dépolluage. L'état de l'art des techniques existantes a conclu que deux procédés de séparation gaz-particules semblent utilisables vis-à-vis des particules de taille nanométrique : le filtre à manche et l'électrofiltration.

Le filtre à manche est désigné comme une Meilleure Technique Disponible (MTD) dans de nombreux BREF sectoriels. Par ailleurs, l'étude par simulation numérique, des différents phénomènes de capture des particules par un filtre à manches a conclu également à un bon niveau d'efficacité théorique.

Les premiers essais expérimentaux de filtres à manches sur un aérosol nanostructuré

Un dispositif expérimental de traitement des fumées par filtration sur manche assistée par l'injection de sorbants a été développé pour évaluer l'efficacité de ce type de procédé en conditions les plus proches possibles de celles mises en oeuvre en exploitation industrielle. Ce dispositif porte sur l'efficacité du seul filtre à manche associé à l'injection de sorbants, à la différence des conditions réelles, où ce type d'équipement est généralement combiné à d'autres procédés de traitement sur une même ligne d'épuration des fumées.

Un filtre à manche en PolyTétraFluoroEthylène (PTFE) a été utilisé sur un aérosol doté des mêmes caractéristiques que celui produit lors de l'incinération du déchet « Carbone » poudreux. Dans les meilleures conditions, il semble que ce procédé parvienne à retenir plus de 96% en nombre des nanoparticules de carbone émises dans les fumées brutes. Par ailleurs, l'analyse du rapport coût-bénéfice de l'utilisation de ce système s'avère favorable dans le cas des unités équipées pour la valorisation énergétique, selon les premières estimations.

Le principe du filtre à manche

Le principe de fonctionnement du filtre à manche repose sur le passage de l'aérosol au travers d'un système de « membrane » poreuse (*medium* filtrant).

Par des mécanismes de piégeage différents en fonction de la taille, les particules sont capturées par le *medium* et le gaz épuré traverse le filtre.

Le *medium* filtrant peut être constitué de matériaux de diverses natures, tissés ou non (fibre de verre, métal, fibre synthétique, cellulose...).

Ce système de filtration est couramment associé à d'autres procédés, comme l'injection de sorbants. Ces réactifs permettent d'abattre des composés spécifiques (gaz acides, dioxines/furannes) tout en renforçant l'efficacité de la filtration (principe de double filtration sur *medium* filtrant et sur lit de sorbants).

Etude des procédés de traitement : les prochaines étapes

Des études complémentaires vont être réalisées pour mieux comprendre l'influence des différents paramètres d'exploitation sur les performances de la filtration sur filtre à manche assistée par injection de sorbants : température, humidité, nature des réactifs utilisés dans le cadre de la filtration (et aussi pour l'abattement d'autres polluants). L'impact du processus de vieillissement sur l'efficacité du filtre fera également l'objet de travaux. Par ailleurs, il est envisagé de réaliser d'autres essais pour évaluer l'efficacité non plus du seul filtre à manches, mais de l'ensemble d'une ligne complexe d'épuration des fumées pour capter les particules de taille nanométrique émises dans les effluents bruts, en sortie de four.

Ces premiers travaux ont permis d'obtenir un premier ensemble de résultats d'intérêt, ouvrant la voie à d'autres investigations sur l'efficacité des procédés de traitement vis-à-vis des nanoparticules, en lien avec les exigences réglementaires de la Directive Emissions.

Des outils expérimentaux adaptés aux recherches en matière de nanosécurité des procédés d'incinération

Le projet NanoFlueGas a permis, pour les besoins de la caractérisation des effluents gazeux, de développer deux pilotes expérimentaux qui s'approchent au mieux des conditions réelles de la filière de traitement de déchets par incinération.

En l'occurrence, pour représenter correctement le procédé industriel, ces dispositifs expérimentaux doivent tenir compte des Bonnes Pratiques et du savoir-faire des professionnels du secteur, et se conformer à toutes les exigences réglementaires, notamment celles dictées par la Directive Emissions (IED) relative à la réduction des rejets (BREF incinération de déchets) et par les arrêtés ministériels du 20 septembre 2002 relatifs aux installations d'incinération et de co-incinération de déchets (Dangereux et Non-Dangereux).

Le four tubulaire, un outil qui, une fois adapté, respecte les Bonnes Pratiques

Pour être utilisé comme pilote d'incinération (chambre primaire de combustion et zone de *post*-combustion), le four tubulaire horizontal a connu plusieurs améliorations techniques qui le rapprochent des fours à grille largement utilisés dans la filière de traitement thermique des déchets. Les caractéristiques de cet outil de laboratoire sont conformes à l'exigence que requiert l'incinération, quel que soit le type de déchet concerné : le respect de la règle dite « des 4T ».

La règle des 4T impose la maîtrise de 4 paramètres pendant la conduite du processus thermo-oxydant d'incinération :

- température maîtrisée dans le four et en zone de *post*-combustion (> 850°C dans le cas de l'incinération des OMA) ;
- temps minimal de résidence des gaz en *post*-combustion strictement respecté (au moins 2s à une T ≥ 850°C dans le cas de l'incinération des OMA) ;
- teneur en oxygène maîtrisée par l'injection d'air en continu en plusieurs points du système, et vérifiée via le mesurage à la cheminée, afin de s'assurer d'être toujours en conditions strictement oxydantes (notion d'Excès d'Air) ;
- turbulence (mélange intime du combustible avec l'oxygène comburant) assuré en permanence à la fois dans le lit de déchets et en phase gazeuse dans la zone de *post*-combustion.

Le four tubulaire a par ailleurs été instrumenté pour suivre précisément les effluents lors du processus de combustion : prélèvement chaud (170°C) d'aérosol ; comptage des particules en temps réel (granulométrie) ; prélèvement de particules pour analyse en microscopie électronique à transmission ; analyse des gaz de l'aérosol ; collecte des résidus solides pour analyse en microscopie électronique à balayage.

Un système de traitement des fumées représentatif de la filtration par filtre à manche assistée par injection de sorbants

Le dispositif expérimental de traitement par filtre à manche a respecté un cahier des charges précis élaboré par Tredi pour simuler des conditions de fonctionnement réalistes : température (150°C), teneur en eau (10-12%)... Le dispositif expérimental est composé de quatre zones : une zone de ventilation qui alimente le pilote, une zone de « préparation » de l'aérosol (chauffage, humidification), la zone du filtre à manche et une zone de condensation et filtration des gaz en sortie de filtre.

L'efficacité de filtration sur manche industrielle réelle (adaptée à l'outil pilote) a été testée sur un aérosol nano-carbone, généré en amont de la manche filtrante. Cet aérosol est représentatif des émissions en sortie de four (morphologie, granulométrie, concentration). Le système est instrumenté pour effectuer un mesurage à chaud en temps réel de l'aérosol. Le débit de filtration est de 10 Nm³/h.

Pour simuler les conditions réelles d'une ligne d'épuration des fumées, du charbon actif et du bicarbonate de sodium ont été injectés dans le système pendant les tests, c'est-à-dire des réactifs utilisés pour contribuer à l'abattement de composés spécifiques (autres que les nanocharges ciblées ici), tels que les gaz acides ou les dioxines/furannes.

L'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques a pour mission de contribuer à la prévention des risques que les activités économiques font peser sur la santé, la sécurité des personnes et des biens, et sur l'environnement. Il mène des programmes de recherche visant à mieux comprendre les phénomènes susceptibles de conduire aux situations de risques ou d'atteintes à l'environnement et à la santé, et à développer sa capacité d'expertise en matière de prévention. Ses compétences scientifiques et techniques sont mises à la disposition des pouvoirs publics, des entreprises et des collectivités locales afin de les aider à prendre les décisions les plus appropriées à une amélioration de la sécurité environnementale.

L'INERIS, établissement public à caractère industriel et commercial placé sous la tutelle du ministère chargé de l'Ecologie, a été créé en 1990. Né d'une restructuration du Centre de Recherche des Charbonnages de France (CERCHAR) et de l'Institut de Recherche Chimique Appliquée (IRCHA), il bénéficie d'un héritage de plus de 60 ans d'expertise reconnue. L'Institut dispose de deux filiales, INERIS Formation et INERIS Développement.

- Un effectif de 589 personnes dont 350 ingénieurs (347 hommes et 242 femmes).
- Une équipe de spécialistes des géosciences basée à Nancy dans le cadre d'activités de recherche et d'expertise sur les risques liés à l'Après-Mine.
- Une plate-forme d'expertise sur la valorisation des déchets à Aix-en-Provence.
- Un siège dans l'Oise, à Verneuil-en-Halatte : 50 hectares, dont 25 utilisés pour des plates-formes d'essais, 25 000 m² de laboratoires.

Domaines de compétence

- *Risques technologiques* : sécurité industrielle (sites Seveso), TMD, nouvelles énergies, équipements de sécurité, sécurité des procédés chimiques, étude des phénomènes dangereux accidentels (incendie, explosion, dispersion toxique), certification.
- *Risques santé-environnement* : mesure et prédiction de la qualité de l'air (ambiant, intérieur), pollution des milieux aquatiques, toxicité des substances chimiques, CEM, REACH, nanosécurité, gestion des sites pollués...
- *Risques naturels et du sous-sol* : cavités et versants rocheux, industries extractives et après-mine, stockages souterrains, filière CCS, hydrocarbures non conventionnels...

Activité

- Recettes : 78 M€
- Recherche amont et partenariale : 20 %
- Expertise en soutien des politiques publiques: 57 %
- Chiffres d'affaires entreprises : 23 %

L'INERIS, acteur national et européen de la recherche

L'INERIS est membre fondateur du GIE européen EU-VRi (European Virtual Institute for Integrated Risk Management) dédié aux risques technologiques majeurs.

Au niveau national, l'Institut est un des partenaires de l'ANCRE (Alliance Nationale pour la Coordination de la Recherche sur l'Energie) ; il est membre associé d'AVIESAN (alliance nationale pour les sciences de la vie et la santé) et d'ALLENVI (alliance nationale de la recherche pour l'environnement).

L'INERIS est partie prenante de deux unités mixte de recherche : l'UMR PERITOX « Périnatalité et Risques Toxiques » avec l'Université de Picardie Jules Verne et l'UMR SEBIO « Stress environnementaux et biosurveillance des milieux aquatiques » avec l'Université de Reims Champagne-Ardenne et l'Université du Havre.

La Cellule d'Appui aux Situations d'Urgence (CASU)

L'Institut a créé en 2003 une Cellule d'Appui aux Situations d'Urgence (CASU) qui met, en temps réel et 24h/24, les compétences scientifiques et techniques de ses ingénieurs et chercheurs à la disposition des Ministères, des services déconcentrés du Ministère chargé de l'Ecologie et des services d'intervention de la Sécurité Civile (pompiers...).

La démarche Qualité

L'INERIS est certifié ISO 9001 pour l'ensemble de ses activités depuis 2000.

Plusieurs laboratoires disposent d'accréditations COFRAC :

ISO/CEI 17025 essais et étalonnages ;

ISO/CEI 17043 organisation de comparaisons inter-laboratoires ;

ISO/CEI 17065 certification de produits et services.

L'INERIS possède également une installation d'essai reconnue conforme BPL.

Gouvernance et déontologie à l'Institut

La gouvernance scientifique de l'INERIS est constituée d'un Conseil scientifique qui examine les orientations stratégiques de l'Institut, de trois commissions spécialisées qui évaluent les programmes et équipes scientifiques et de la commission d'orientation de la recherche et de l'expertise (CORE).

Un comité indépendant suit l'application des règles de déontologie qui encadrent l'indépendance des avis de l'INERIS ; depuis 2001, il rend compte directement au Conseil d'administration. L'Institut a la possibilité de se saisir de questions portant sur des risques, notamment à caractère environnemental ou sanitaire. Cet aspect a été pris en compte en septembre 2010, lors de l'adoption de la Charte Nationale de l'Expertise.

Les travaux de l'INERIS en nanosécurité

Acteur du dispositif Nano-INNOV présenté en 2009 par le Ministère de la Recherche pour mettre en place une stratégie d'innovation dans les nanotechnologies, l'INERIS mène des travaux sur la nanosécurité. Ses équipes pluridisciplinaires étudient les risques liés aux nanomatériaux, pour la santé humaine (toxicologie), la préservation de l'environnement (écotoxicologie) et la sécurité des installations industrielles (sécurité des procédés – incendie, explosion). L'Institut développe également des outils de mesure et de caractérisation des nanoparticules, notamment dans l'air ambiant. Enfin, son expertise en certification a conduit l'INERIS à s'impliquer dans l'évaluation de la sécurité de laboratoires et d'unités de production.

L'INERIS s'est doté, avec le soutien financier du Conseil Régional de Picardie, d'une plateforme expérimentale unique en France. Située sur le site de l'Institut à Verneuil-en-Halatte (Oise), cette infrastructure, d'une superficie de 400 m², est composée de laboratoires et de locaux à empoussièrement de nanoparticules contrôlé. Opérationnelle en 2015, cette plate-forme sécurisée est dédiée à la métrologie des nanomatériaux et à la caractérisation des potentiels de danger de ces substances, en particulier dans le cadre de la sécurité des procédés industriels. Elle doit permettre, entre autres, d'étudier :

- le développement d'outils de métrologie et de caractérisation adaptés aux nanomatériaux ;
- les paramètres physiques et l'analyse chimique des nanoparticules à des fins en toxicologie et en comportement physique ;
- les paramètres de sécurité (inflammabilité, explosivité...) des nanoparticules ;
- le potentiel d'émission de nanoparticules dans l'air ambiant par des matériaux et produits tout au long de leur cycle de vie (fabrication, utilisation, fin de vie) ;
- le comportement des nanomatériaux pulvérulents dans l'air ambiant (potentiel de dispersion...) ;
- la qualification et la certification des Meilleures Techniques Disponibles (MTD) de protection des opérateurs qui interviennent dans les laboratoires et les milieux industriels utilisant des nanoparticules.

La Commission d'Orientation de la Recherche et de l'Expertise (CORE)

représente la concrétisation de la démarche d'ouverture de l'Institut. Officialisée par l'arrêté du 26 avril 2011 relatif aux comités d'orientation scientifique et technique de l'INERIS, elle marque le passage d'une gouvernance scientifique à une gouvernance scientifique et sociétale, portant également sur les activités d'expertise et d'appui aux pouvoirs publics.

La Commission d'Orientation de la Recherche et de l'Expertise réunit 5 collèges (industriels, élus, syndicats, associations, État) et des personnalités qualifiées de l'enseignement supérieur



L'École des Mines de Nantes dépend du ministère de l'Économie, de l'Industrie et du Numérique, elle est une référence dans la formation des ingénieurs, mais aussi dans le domaine de la recherche. Elle a intégré depuis le 1^{er} mars 2012 l'Institut Mines-Télécom, un groupe de 13 écoles fort de plus de 13 000 étudiants, il s'impose comme le premier groupe français d'écoles ingénieurs-managers.

L'environnement dans lequel l'École des Mines de Nantes est née et s'est développée depuis 20 ans, subit de profondes mutations dues en particulier à la diffusion à grande échelle des technologies de l'information, ainsi qu'à la montée en puissance des questions d'environnement et d'énergie. L'École a bâti son développement depuis 1990 à la fois sur une recherche de haut niveau, positionnée sur des domaines stratégiques pour la compétitivité des entreprises, et sur une formation originale fondée sur une pédagogie innovante.

Tout en conservant un caractère généraliste, l'école s'impose dans deux domaines d'excellence :

Les sciences et technologies de l'énergie et de l'environnement

Énergétique, biocarburants, génie des procédés pour l'environnement, physique subatomique fondamentale et nucléaire pour l'énergie, l'environnement, la santé et la société.

(Départements Systèmes Énergétiques et Environnement, Sciences Sociales et Gestion, SUBATECH)

Les sciences et technologies de l'information

Automatique, productique, logistique, informatique, systèmes d'information.

(Départements Automatique Productique Informatique, Sciences Sociales et de Gestion)

L'École des Mines de Nantes en quelques chiffres

- Budget : 29,7 M€
- Nombre d'élèves : plus de 1 000, dont 547 en formation ingénieur
- 60 en formation ingénieur par apprentissage
- 149 en masters internationaux
- 107 en masters co-habilités
- 116 doctorants
- 105 en French Summer School
- Plus de 3 000 diplômés
- 130 enseignants-chercheurs
- 250 intervenants extérieurs
- Nombre de publications : 199 articles en revues répertoriées avec comité de lecture
- Montant des contrats : 6,7 M€ dont 3 chaires industrielles
- 200 entreprises partenaires

Des formations pour l'entreprise

- 2/3 des diplômés travaillent dans l'industrie.
- Une forte immersion en entreprise (10,5 mois en entreprise).
- Des pédagogies innovantes pour améliorer l'enseignement et développer le savoir-faire des étudiants.
- Une formation transversale qui abolit les frontières disciplinaires (projet intégrateur qui associe la physique, les mathématiques, l'électronique et l'informatique).
- Une ouverture internationale et multiculturelle.
- Une sensibilisation à la responsabilité sociale et environnementale ainsi qu'à l'innovation.

Une envergure internationale

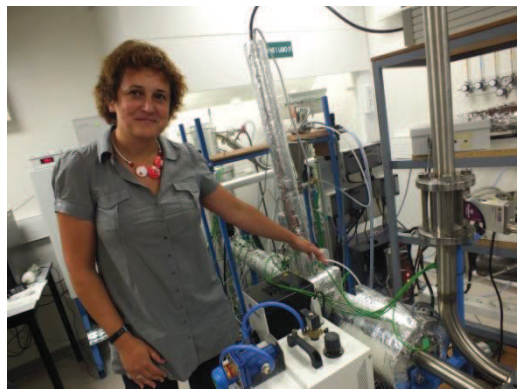
L'École des Mines de Nantes prépare les futurs ingénieurs et docteurs à un monde globalisé en s'appuyant sur un réseau de 41 partenaires privilégiés dans le monde, dont 20 doubles-diplômes, avec des partenaires du monde entier. L'École accueille 27 % d'étudiants étrangers originaires de 39 pays et 15 % de chercheurs étrangers. Elle propose 3 masters internationaux : MOST (MSc in Management and Optimization of Supply-chains and Transport ; PM3E (MSc in Project Management for Environmental and Energy Engineering) et SNEAM (Joint MSc in Sustainable Nuclear Energy : Applications and Management). L'École participe au développement de la filière nucléaire civile française en Chine à travers l'IFCEN (Institut Franco-Chinois de l'Énergie Nucléaire - école d'ingénieur sur le modèle français).

Une culture partenariale forte avec les entreprises au service de leur développement

Son activité de recherche contractuelle est très dynamique (6,7 M€), tant sur le financement industriel direct, que dans le cadre de l'Agence Nationale de la Recherche mais également de contrats européens.

L'École a ainsi monté 3 chaires industrielles (développement d'une thématique de recherche commune en partenariat avec une ou plusieurs entreprises, dotée d'un budget de 1,5 M€ sur 5 ans), portées par son fonds de dotation.

Elle dispose également de 3 plateformes industrielles et d'un incubateur accompagnant des projets de création d'entreprises technologiquement innovantes. incubateur.mines.fr



Pour plus d'informations...



- <http://www.mines-nantes.fr/>
- Toutes nos publications
<http://www.mines-nantes.fr/go-publications>
- Notre espace presse
<http://www.mines-nantes.fr/go-presse>
- E-Talents, le magazine numérique français - anglais
Appli téléchargeable sur App store et Google Play et disponible sur le web :
<http://e-talents.mines-nantes.fr/>
- Nos lettres d'information
<http://www.mines-nantes.fr/go-newsletter>



- Notre page Facebook
<http://www.mines-nantes.fr/go-facebook>



- Twitter
<http://www.mines-nantes.fr/go-twitter>



- Vidéo Alpha réalisée par les étudiants
<http://www.youtube.com/watch?v=1EKLSFgiWtQ>



- iTunes U
<http://www.mines-nantes.fr/go-itunes>



- France Culture Plus
<http://plus.franceculture.fr/partenaire/ecole-des-mines-nantes>



- Trédi, filiale du Groupe Séché Environnement depuis 2002 est spécialisée dans la gestion et le traitement des déchets industriels dangereux (liquides, gazeux, pâteux, solides). La société compte 4 établissements très complémentaires (mutualisation des ressources industrielles et commerciales) en Rhône Alpes et Alsace :
 - Saint-Vulbas (01),
 - Salaise (38),
 - Strasbourg (67)
 - Hombourg (68).
- Elle bénéficie du retour d'expérience lié à son implantation historique dans le secteur de la chimie (près de 300 ingénieurs et techniciens) son activité s'exerçant sur des outils industriels lourds et supportant des contraintes réglementaires croissantes.
- Principaux atouts et valeurs : technicité, expertise, poly compétence.
- Dans un environnement économique qui s'est dégradé depuis 2010, Trédi redéfinit sa stratégie commerciale et son fonctionnement industriel :
 - Développement des marchés industriels de niche en proposant des solutions innovantes,
 - Recherche de solutions de valorisation intégrant le principe de l'économie circulaire,
 - Croissance à l'international (notamment hors Union Européenne),
 - Plan de transformation industrielle.
- **Siège social :**
 - Allée des Pins, Parc industriel de la Plaine de l'Ain, CS 30072, 01155 LAGNIEU
- **Effectif (Equivalents Temps Plein) :** 505 (dont 357 en Rhône Alpes)
- **Chiffre d'Affaires :** 110,2 M€ (2014) dont 14 M€ à l'International





L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, et du ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

www.ademe.fr