



Nanoparticules naturelles, anthropiques ou manufacturées

Quels enjeux sanitaires et environnementaux ?

Emeric FREJAFON
Emeric.frejafon@ineris.fr

INERIS
maîtriser le risque |
pour un développement durable |



Plan de l'exposé

L'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques
INERIS en bref

Le nano-monde
Quelques repères

Nanoparticules naturelles et anthropiques
Quels enjeux sanitaires et environnementaux

« Nanoparticules » (nano-objets) intentionnellement produits
Quels enjeux sanitaires et environnementaux

INERIS

Établissement public (EPIC)
placé sous la tutelle
du ministère chargé
de l'écologie

Une mission plus que jamais
d'actualité :

celle « ...de réaliser ou de faire réaliser des études et des recherches permettant de prévenir les risques que les activités économiques font peser sur la **santé**, la **sécurité des personnes** et des **biens** ainsi que sur l'**environnement**, et de fournir toute prestation destinée à faciliter l'adaptation des entreprises à cet objectif »



Vue aérienne de l'INERIS à Verneuil-en-Halatte (Oise)

L'INERIS, partenaire scientifique et technique

Créé en 1990,
CERCHAR + IRCHA
70 ans d'expérience

Effectif : 580 salariés
400 ingénieurs et chercheurs

Site de 50 Ha
25 000 m² de laboratoires
5 Ha essais à grande échelle
Des moyens uniques

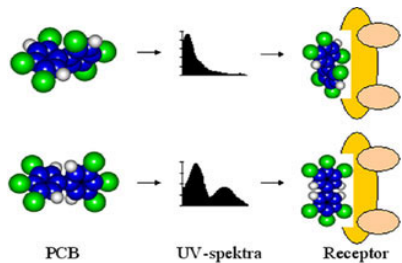
Mission transversale
Prestations d'expertise
Activité de recherche
Mission de service public

Clients, partenaires
Industriels tous secteurs
Etat, régions, collectivités



Accompagner l'évaluation et la maîtrise des risques...

.. Sanitaires et environnementaux
toxicité, exposition, impact



.. Accidentels et phénomènes
danger, probabilité, gravité



.. Comportement sol et sous-sol
aléa, vulnérabilité, désordre



.. Evaluation et certification
conformité, référentiels



Direction des Risques Chroniques

Quatre pôles métiers

Compétences en toxicologie, éco toxicologie, métrologie et analyse des polluants dans l'air, l'eau, les sols, les déchets, modélisation de leur transfert, économie de l'environnement

Activités :

- évaluation des dangers présentés par les substances chimiques, les rayonnements électromagnétiques, les agents biologiques
- évaluation et modélisation des risques qu'ils présentent pour l'homme et l'environnement
- certification de nouveaux dispositifs de métrologie environnementale

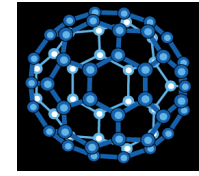
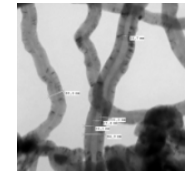
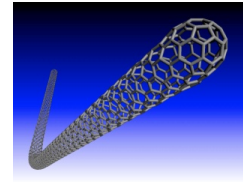


Le nano-monde ?

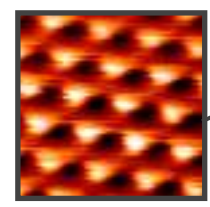
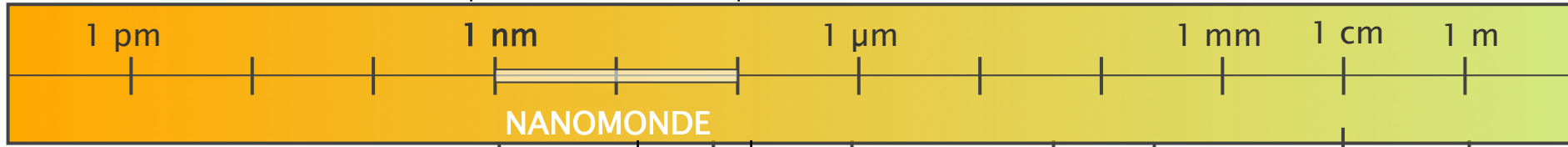
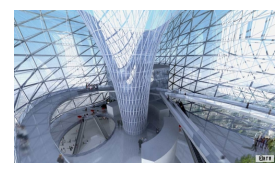
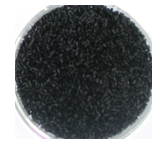
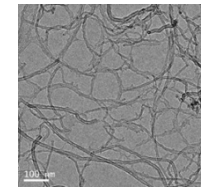
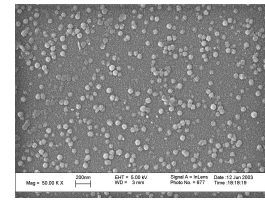
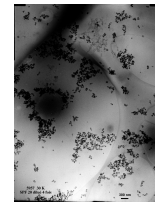
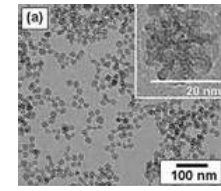
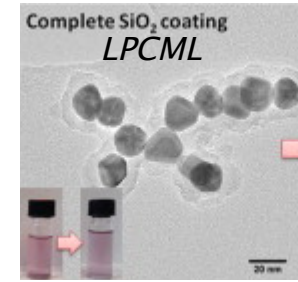
symbole « n » en SI

1 nanomètre (nm) = 10^{-9} m

Produits techniques



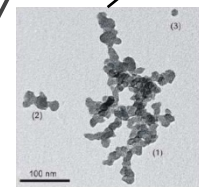
Nano-objets
1 nm - 100 nm



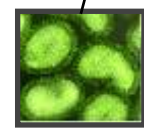
Atomes graphite
0,1 nm



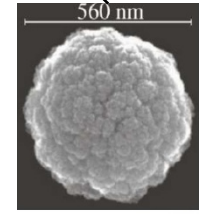
ADN
2 nm



Suie
20 nm



Virus
70 nm



Agrégats suie
500 nm



Bactérie
1 µm



Cheveu
50 µm



Acarien
200 µm

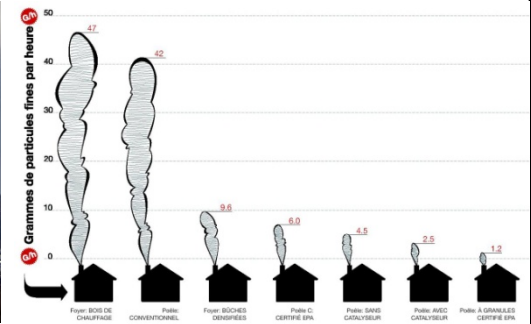


Fourmi
1 cm



Chat
1 m

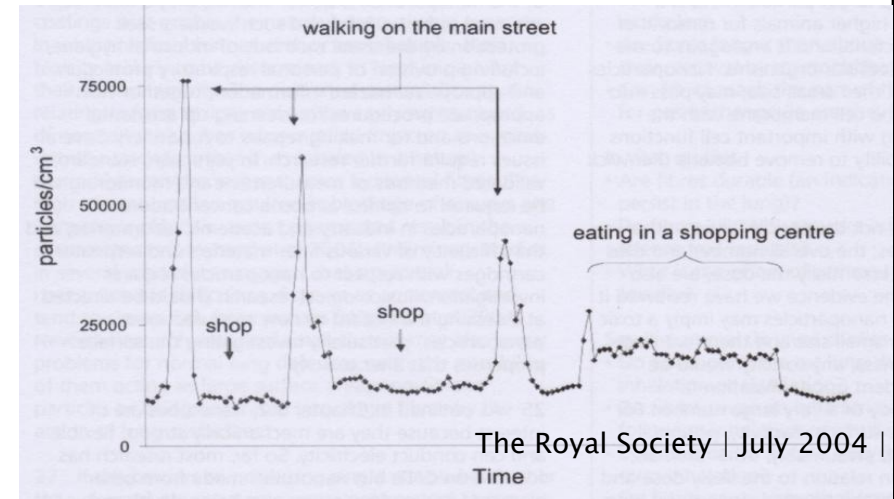
Nanoparticules naturelles & nanoparticules anthropiques



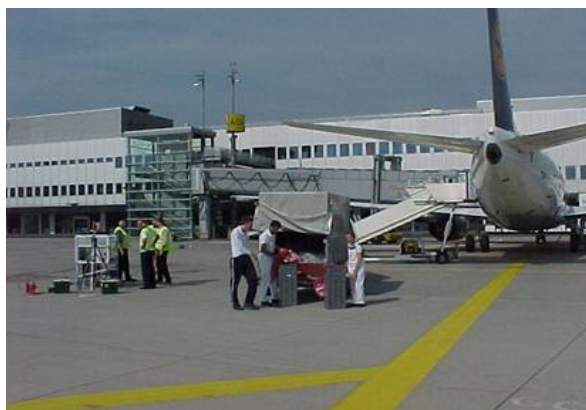
Concentration dans l'air ambiant :

- ~10 000 particules/cm³ (urbain)
- ~ 1 000 particules/cm³ (fond)
- ~ 1 000 000 particules/cm³ (industries)

Une forte variabilité spatio-temporelle
suie (combustion), terrigène (érosion),
composé organique, des sels, nitrates ...



Exemple d'activités anthropiques et concentrations enregistrées



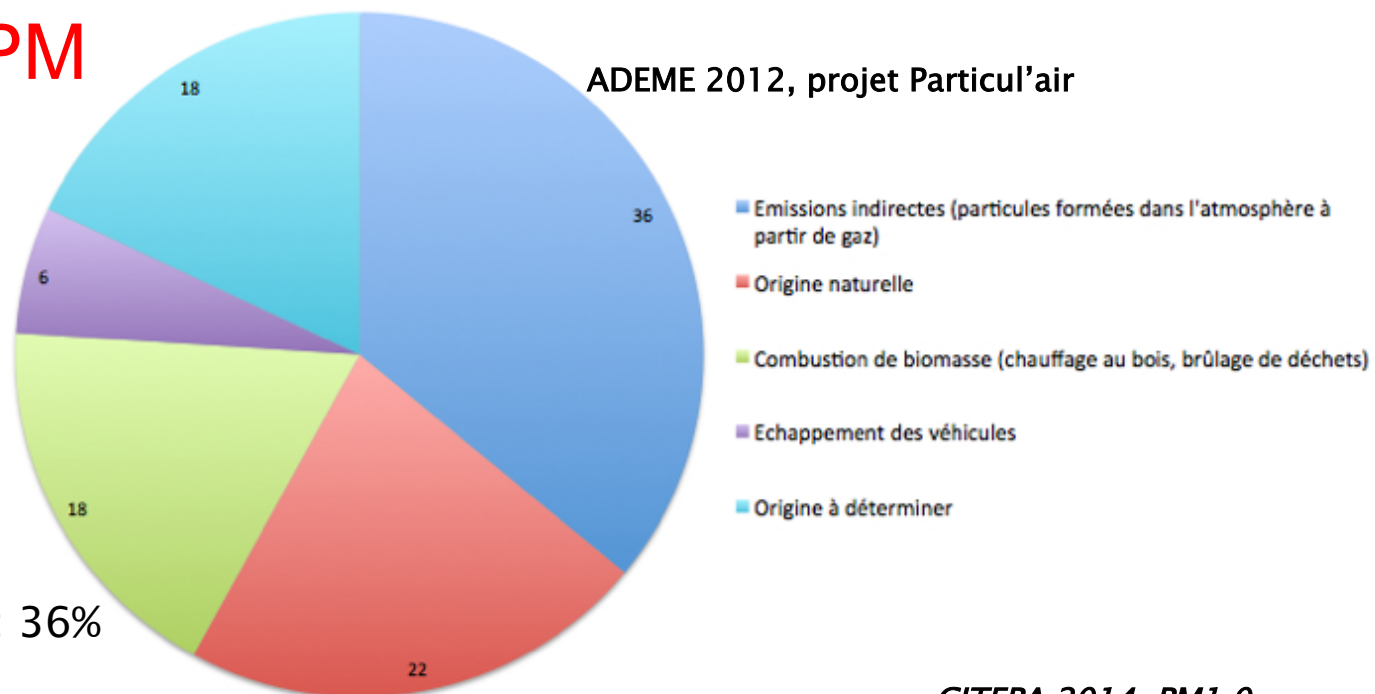
Procédés	Concentration totale dans la gamme de mesure: 14 - 673 nm en particules / cm ³	Dimensions à la concentration maximale en nm
Extérieur, bureaux	⇒ 10 000	
Fonderie de silicium	⇒ 100 000	280 - 520
Broyage de métal	⇒ 130 000	17 - 170
Soudage	⇒ 400 000	36 - 64
Découpe au plasma	⇒ 500 000	120 -180
Boulangerie	⇒ 640 000	32 - 109
Terrain d'aéroport	⇒ 700 000	< 45
Brasage fort	54 000 à 3 500 000	33 - 126
Soudure autogène	100 000 à 40 000 000	40 - 600

Moehlmann et al - Oct 2005 - NanoSafe 1

Contributions aux PM

Emissions naturelles : 22 %
 Emissions des véhicules : 6%
 Emission issues du Bois : 18%
 Indéterminés yc industries : 18 %
 Non émises mais formées (AOS) : 36%

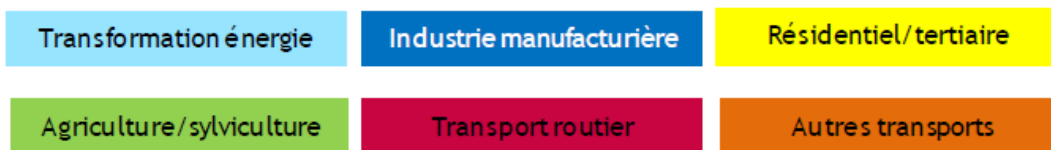
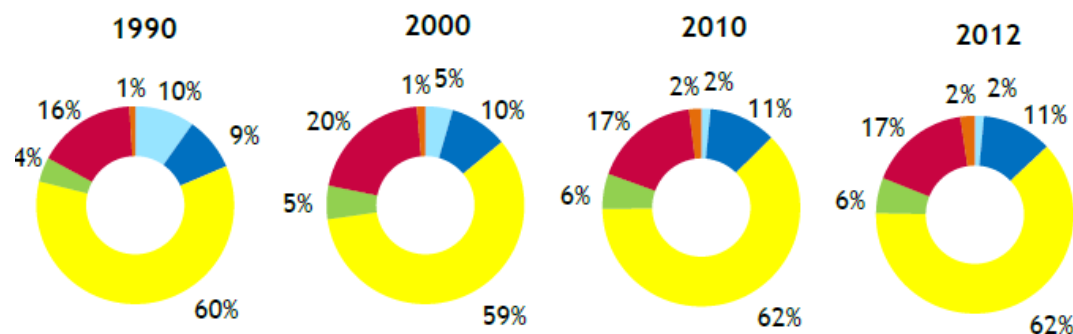
Répartition des sources de particules
 En % de la masse des particules



Valeurs cibles :

L'Organisation mondiale de la santé (OMS) considère qu'il vaut mieux ne pas dépasser pour les PM_{2.5} le seuil 25 µg/m³ en moyenne sur 24h et de 10 µg/m³ en moyenne annuelle

CITEPA 2014, PM1.0





Comment les mesurer ?

Gamme de taille à considérer :

- PM10, PM2.5, PM1.0 → en relation avec les fractions inhalables
- 50% des particules ont un diamètre inférieur à 10 μm , 2.5 μm ...

Quelle métrique : mesure exprimée en masse de PMx par m^3 → $\mu\text{g}.\text{m}^{-3}$

La référence : la gravimétrie (pesée de filtre avant et après prélèvement)

Ou sinon :

- La micro-balance : variation de fréquence d'un quartz vs masse déposée
- Absorption β : rayonnement β transmis vs la masse déposée sur filtre
- Par analyse chimique organiques et inorganique (en laboratoire)

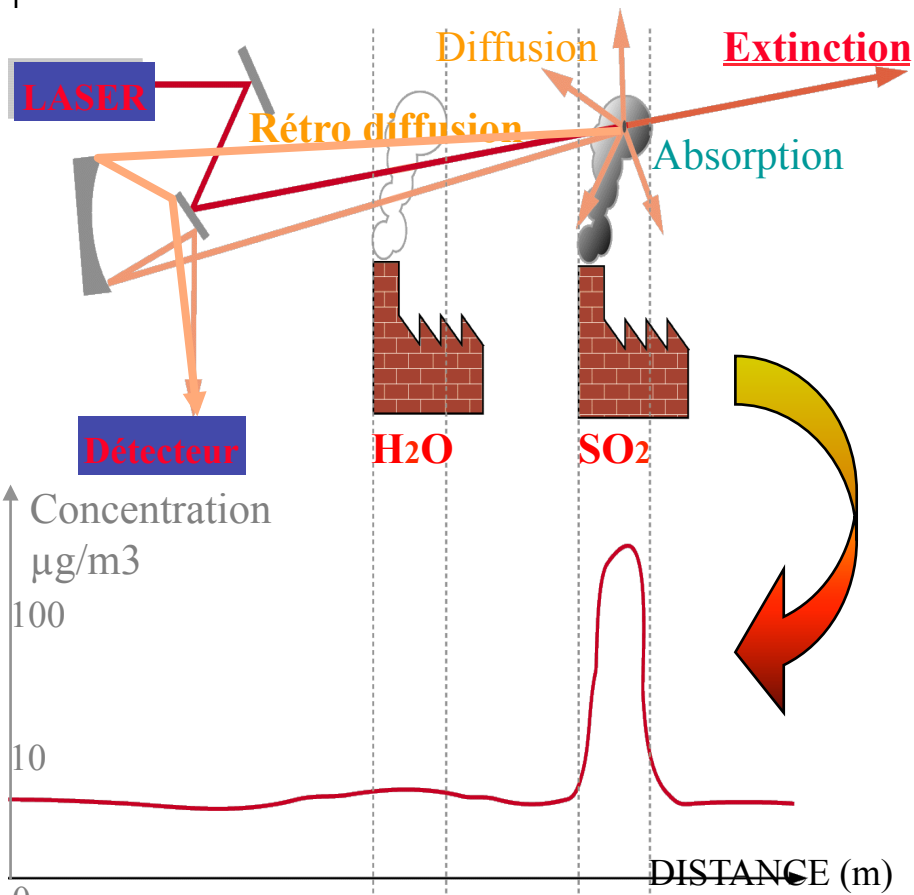
Ou bien encore, de manière indirecte :

- Le compteur optique + la diffusion de lumière (Mie en général)
- Le compteur aérodynamique + la masse volumique
- Le compteur de mobilité électrique + la loi de charge

Ou par des méthodes de mesures résolues dans l'espace ... →

Mesurer les particules dans l'air

→ À distance : LIDAR : Light Detection And Ranging



Envoi d'une impulsion laser dans l'atmosphère :
 Diffusion et absorption (molécule, particule)
Extinction de l'impulsion laser

L'intensité rétro diffusée correspond à un écho :
 Fonction de la signature optique des polluants
 Molécule = fonction de l'absorption moléculaire
 Particule = fonction de la taille, forme, composition...

Impulsion laser : résolution temporelle et spatiale
 Différentes directions avec une précision de 10 m

$$P(x, \lambda_i) = P_0(\lambda_i) \frac{c\Delta t}{2} \beta(x) \frac{A\eta O(x)}{x^2} \exp\left\{-2 \int_0^x [\alpha(\xi) + N(\xi)\sigma(\lambda_i)] d\xi\right\}$$

Intensité reçue

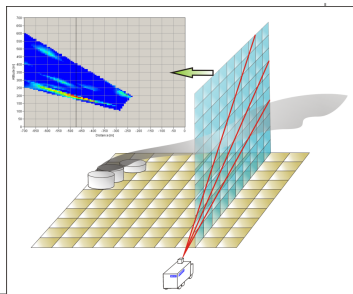
Caractéristiques laser (puiss., délais) → $P_0(\lambda_i)$

Caractéristiques Émission/réception → $\beta(x)$

Rétro-diffusion à la distance x → $\frac{A\eta O(x)}{x^2}$

Extinction atmosphérique → $\exp\left\{-2 \int_0^x [\alpha(\xi) + N(\xi)\sigma(\lambda_i)] d\xi\right\}$

Extinction moléculaire du polluant considéré → $N(\xi)\sigma(\lambda_i)$

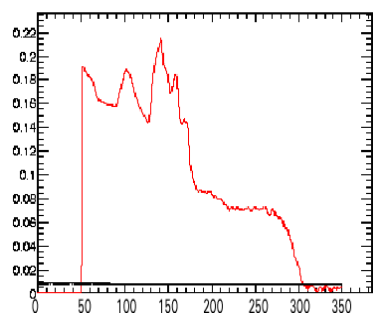


Quantification des aérosols par LIDAR

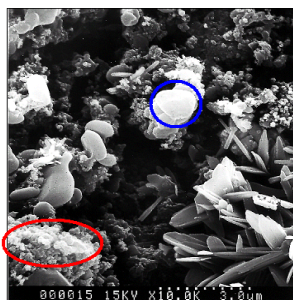
Exemple : cas d'un LIDAR à 1 longueur d'onde :

Couplage : signaux LIDAR , prélèvements au sol et modèle de diffusion optique

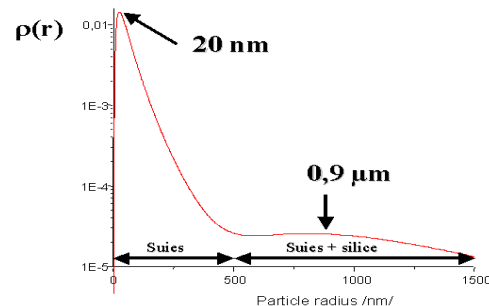
Rétro-diffusion (LIDAR)



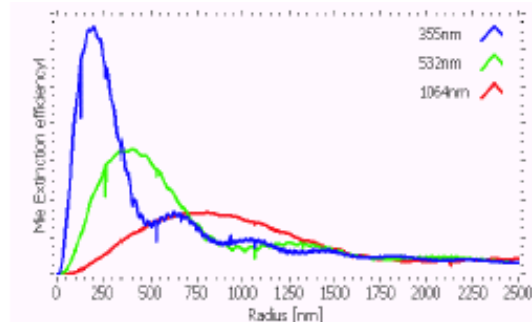
SEM/RX (Filtre QZ)



Distribution de taille au sol $\rho(r)$



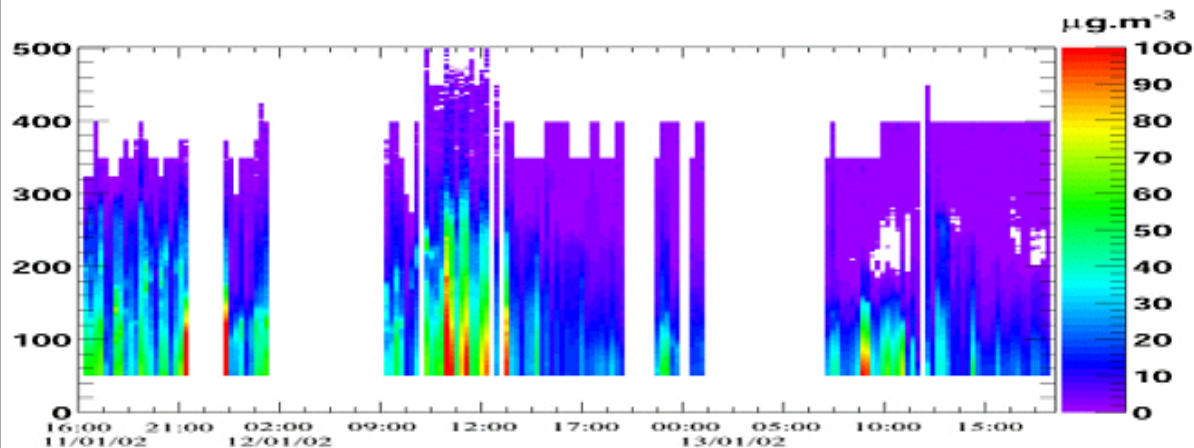
Modèle de diffusion (Mie, Fractal)



Faisabilité démontrée sur une étude Lyonnaise

Frejafon et al, Applied Optics 1998 ; Kasparian et al Atm Env 1998

→ Qualification de la contribution entre pollution urbaine et pollution de fond



Résultat :

Profils Concentrations en aérosols

Limitations :

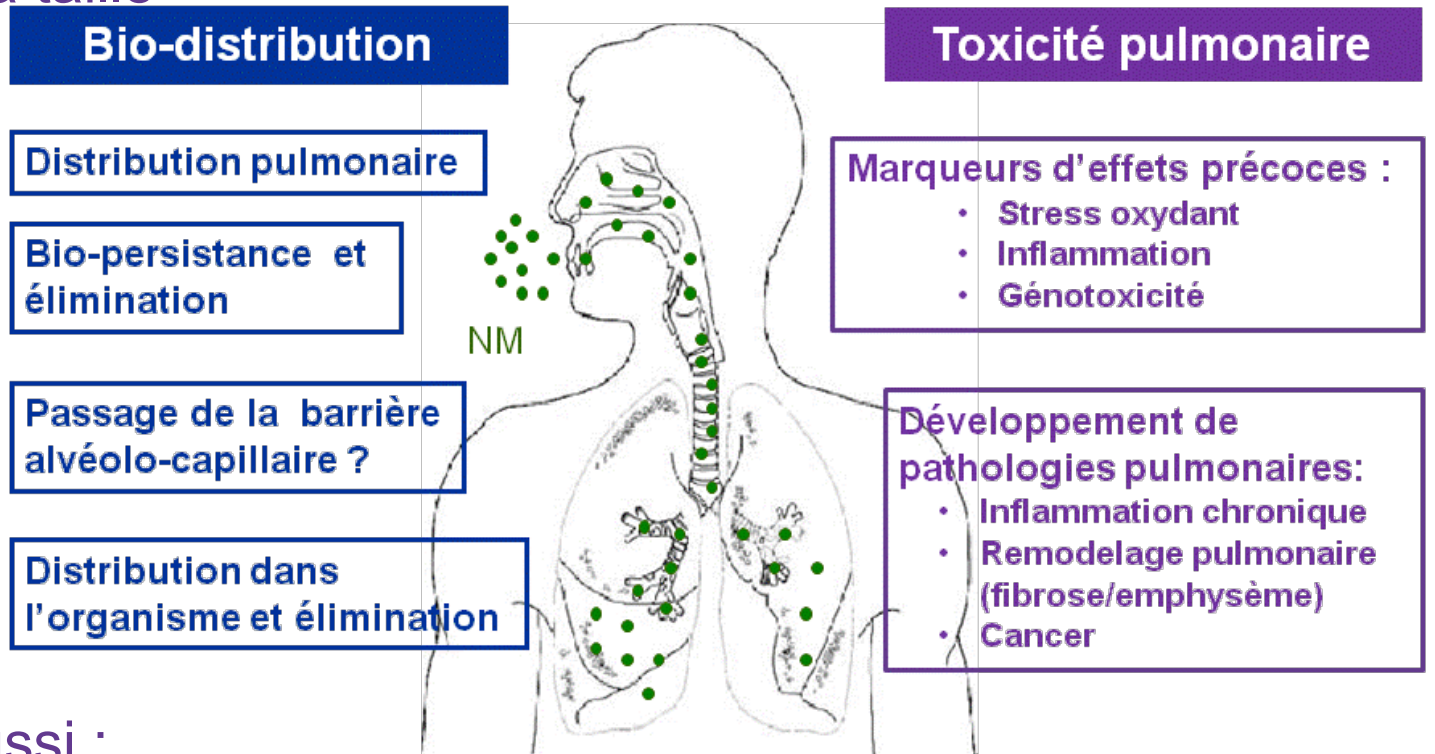
distribution de taille constante

Miffre et al, Aerosol load study in urban area by lidar and numerical model, Atm Env, 2010

Quels sont les risques ?

Réduction des concentration $\rightarrow 10\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM2.5 en moyenne annuelle

- Particules + Ozone \rightarrow Augmentation de la sensibilité aux allergènes
- Effet important de la taille



Sur l'environnement aussi :

changement climatique et bilan radiatif (Energie reçue/dissipée vs réfléchi)

Ecosystèmes (cf fermeture du tunnel du Mt Blanc et présence des abeilles)

Sur la fonte des glaces par réduction de la réflectivité (noirci)

Quels sont les enjeux ?

Répondre aux objectifs fixés par l'OMS, l'Europe, les états c'est :

Identifier les principales sources

Combustion (chauffage bois, diesel) + agriculture (épandage/ NH_3)

Et comprendre les mécanismes de transformation gaz/particules

Engager des actions de réduction :

Action ADEME Vallée de l'Arve : incitation à moderniser les foyers bois

En lien avec action INERIS sur la caractérisation des émissions vs leurs modes énergétiques (bois, granules, déchets verts et autre biomasse)

Actions relatives au véhicules polluants : pastille, Euro X, interdiction, péage

Incitation sur mode de transport collectif, hybride....

Interdiction du chauffage bois dans certaines villes.... Etc....



Nanotechnologies, Accompagner l'innovation par l'amélioration de la sécurité tout au long de la chaîne de valeurs

*Nanoparticules intentionnellement produites
Quels enjeux sanitaires et environnementaux*

Les nanomatériaux – applications innovantes

Des propriétés nouvelles → polymères, métaux, céramiques, peintures, huiles, poudres ...
résistance mécanique, thermique, corrosion, abrasion
conductivité thermique ou électrique (polymères)
propriétés de surface (photo-catalytique)

Des moyens de transports qui sont :

Légers, économiques, moins émissifs, résistants

Des consommables performants et économes

Des performances énergétiques augmentées

Batterie (électrodes), Photovoltaïque, Stockage

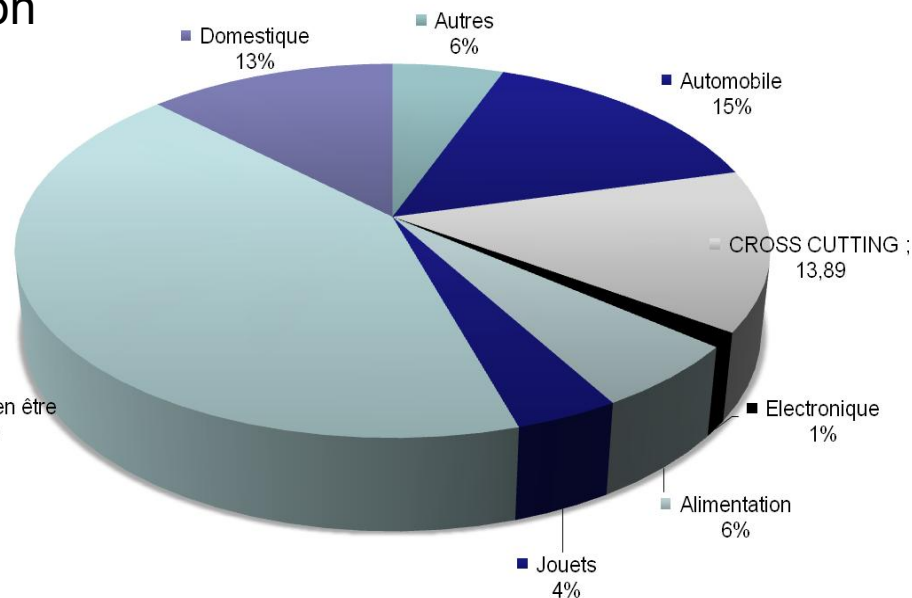
Des moyens de protection améliorés/ biologique

des emballages « intelligents »/ qualités produits

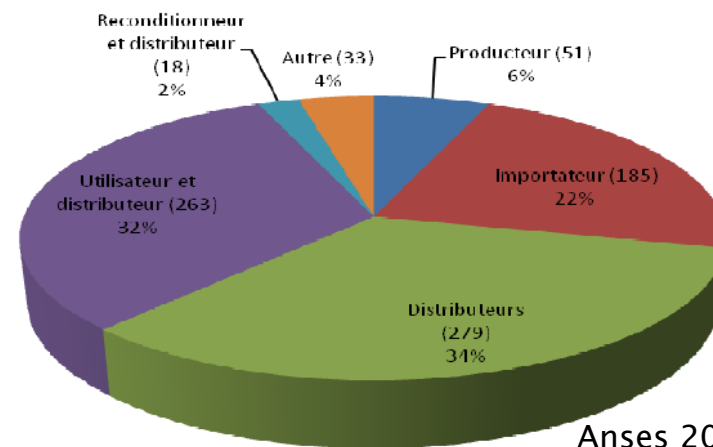
des surfaces biocides (chaîne alimentaire, vêtements...)

Des nouveaux produits pharmaceutiques

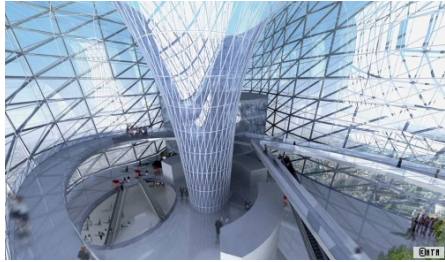
nano-médecine/ vecteurs thérapeutique & diagnostique



Répartition des acteurs en France



Domaines d'application et produits de la vie quotidienne



Etat de surface / facilité d'entretien



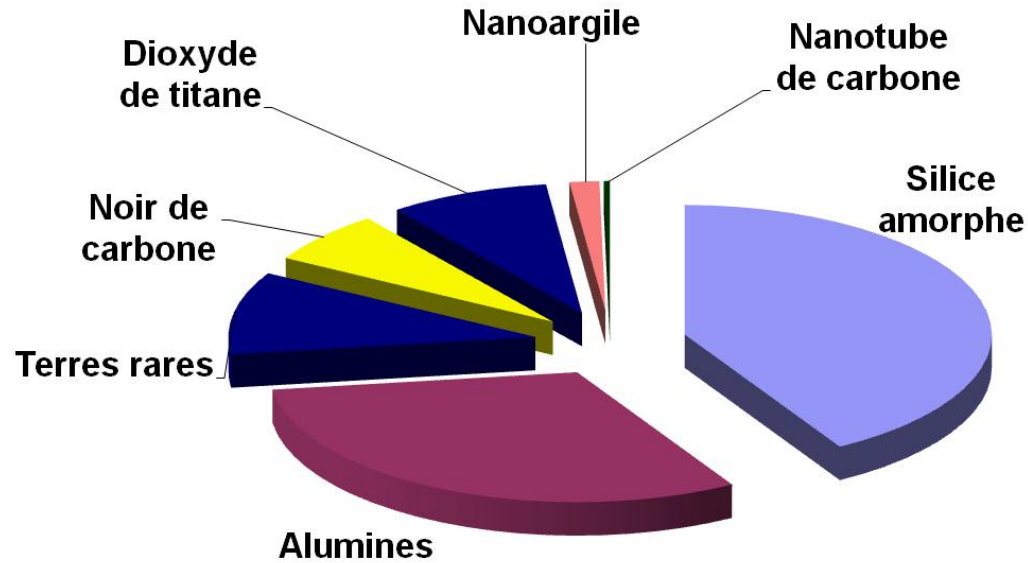
Traitement anti-bactérien



pneumatiques



Cosmétiques



Peintures
Vernis
Colles



Emballages alimentaires



Matériaux aux propriétés innovantes (mécanique, thermique...)



Franz Ziener Jacket



Efficacité énergétique

Composant	Apport	Domaine et application
NanoArgent Ag⁰	Bactéricide	Réfrigérateur, Emballage alimentaire Textile (anti-transpirant) Médical (bloc opératoire, cicatrisant, ...)
Dioxyde de titane TiO₂	Anti-UV, propriété optique Photo-catalyseur	Crème solaire Pigment alimentaire / E172 Revêtement auto-nettoyant et dépolluant
Nanotubes de carbone NTC	Propriété thermique Propriété électrique Renfort mécanique Propriété « Biocide »	Electronique (composant, emballage) Automobile , Sport Energie (électrodes, stockage) Peintures
Silice SiO₂	Propriété de pulvérulence Hygroscopicité	Alimentaire (pulvérulence) Biocide par effet désiccant
Aluminium oxydé Al₂O₃	Carburant (Al+coating O ₂) Propriété biocide si alumine	Spatial, militaire Cosmétique, produit d'hygiène corporelle
Oxyde de zinc ZnO	Additif alimentaire Antimicrobien	Emballage alimentaire Produit d'hygiène corporelle



Nano – Quelques définitions, en constante évolution

Nanosciences : connaissances (théories, modèles, savoir-faire) mobilisées pour comprendre les phénomènes et propriétés nouvelles apparaissant à l'échelle nanométrique (dans des objets dont au moins une dimension est nanométrique)

Nanotechnologies : instruments, techniques de fabrication, application des nanosciences pour les produits dérivées (téléphones portables, ordinateurs, cellules solaires, nouveaux médicaments...)

Nano-Objets : objet dont une dimension au moins est comprise de manière non exclusive entre 1 et 100 nm

NOAA : ensemble de nano-objets qui sont isolés, agrégés ou bien agglomérés.

Nanomatériau : naturel, accidentel ou intentionnel. Substances dont la distribution granulométrique révèle qu'elle est constituée d'au moins 50% de particules primaires <100nm. Une poudre sèche est un nanomatériaux si sa Surf. Spec. Vol. > 60 m²/cm³

Substance à l'état nanoparticulaire (R523-12 du Code de l'env) = nanomatériaux fabriqué intentionnellement, contenant des NOAA pour plus de 50% en nombre

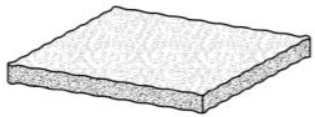
Nano-objets → Nanomatériaux

Nano-objets (ISO)
 =
Particules ayant 1, 2 ou 3 dimensions
 externes < 100 nm

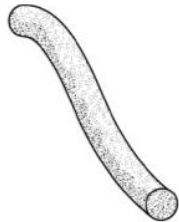
1 dimension

2 dimensions

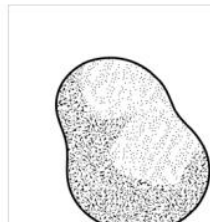
3 dimensions



Nanofeuillet



Nanofibre



Nanoparticule

Nanofils

Nanotubes

Nanotige

Domaine des nanomatériaux



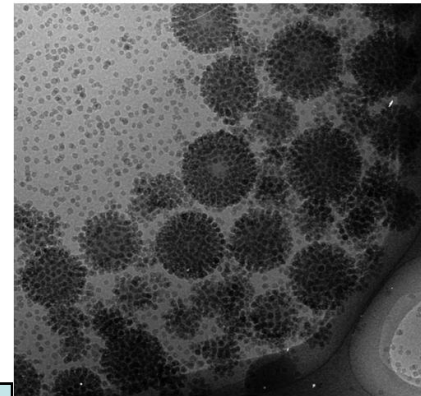
Nanofeuillets (argile, graphène...)



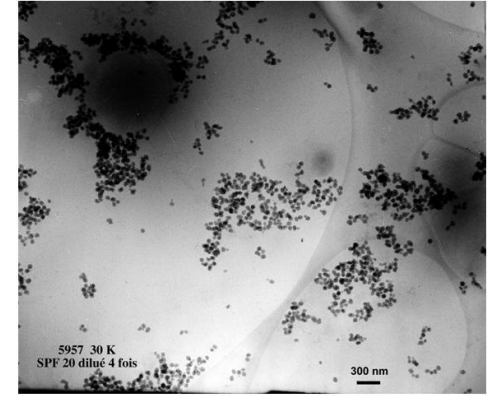
Nanofibres (carbone, silicium, ZnO...)



Nanoparticules (noir de carbone, TiO₂...)



Emulsion silicone + silice

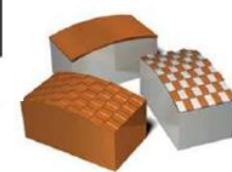


TiO₂ dans crème solaire diluée

Nanomatériaux

En masse

En surface



Particules

IIIa



Fixées sur un support



Dans un liquide ou un solide



En poudres « sèches »

Une taille → de nouvelles métriques

Diamètre	Masse de chaque particule	Nombre de particules	Surface de chaque particule	Surface totale (surface développée)
1 000 nm	1	1	1	1
100 nm	10^{-3}	10^3	10^{-2}	10
10 nm	10^{-6}	10^6	10^{-4}	100
1nm	10^{-9}	10^9	10^{-6}	1000



Particules:

La mesure réglementaire de la dose (exposition au poste de travail-fraction inhalable, qualité de l'air-PM10/PM2.5,...) est la gravimétrie

Nano-Objets :

La masse est négligeable,

Dangers : les effets peuvent être liés à la taille, forme, surface spécifique

Pas de consensus sur la métrique (masse, taille, surface, chimie...)

→ Conséquences :

une carte d'identité qui se fonde sur 8 critères → R-Nano

Risques potentiels des nanomatériaux

Les propriétés particulières des Nanomatériaux peuvent potentiellement engendrer des risques accrus ou nouveaux



⇒ Des propriétés dangereuses différentes:

- (éco)Toxicité (translocation, inflammation...)
- Oxy-réactivité (explosion, inflammabilité, EMI)

⇒ Des voies/modes d'exposition différents

- pénétration, translocation, réactivité

⇒ Des comportements différents

- dans les milieux biologiques
- dans les milieux environnementaux

⇒ *Maîtriser les risques durant tout le cycle de vie*

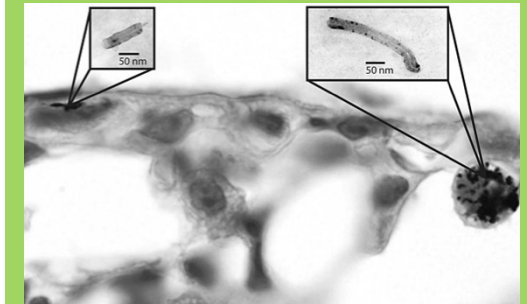
Production et intégration

Usage & Fin de vie

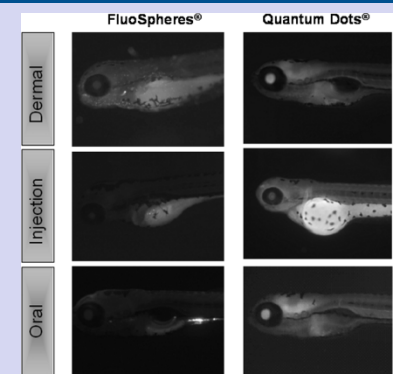
Technologiques



Toxicologiques



Environnementaux

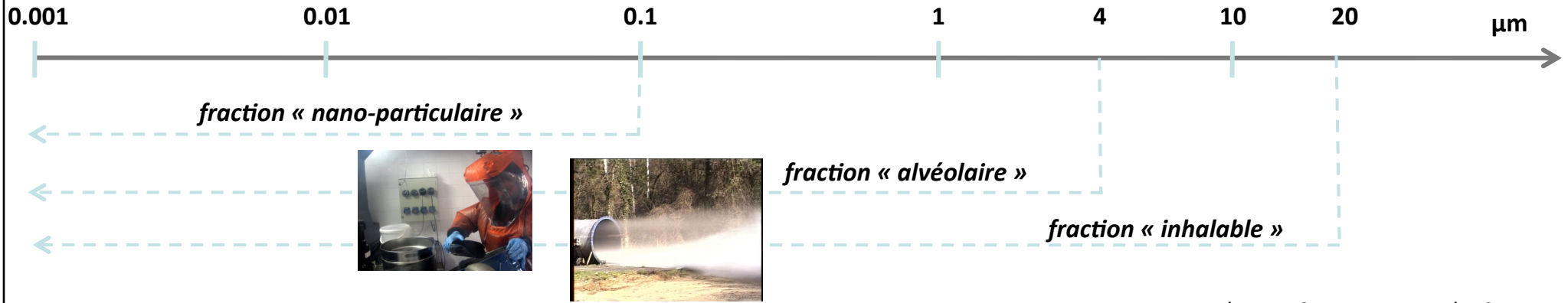




Développer une métrologie adaptée

Différenciant :
les nano manufacturées vis-à-vis des nano non intentionnelles

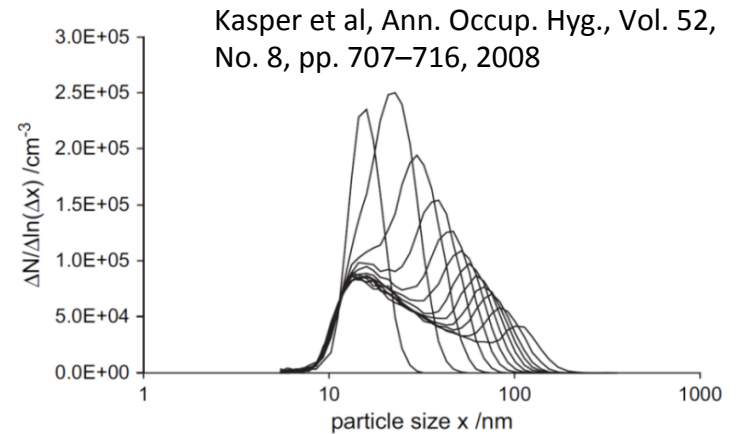
La mesure des (nano)particules dans l'air : quel enjeu ?



Comment mesurer les nanoparticules en matrice gazeuse :

DIRECT

- Masse : Les nanoparticules représentent une fraction massique très faible (masse $\sim d^3$)
- Taille : Les nanoparticules manufacturées peuvent être sous forme agrégées et existent dans des gammes de taille >100 nm
- Nombre : Un accroissement en nombre ne prend pas en compte l'agglomération
Bruit de fond élevé (10^3 - 10^4 p/cc) \rightarrow différencier ?

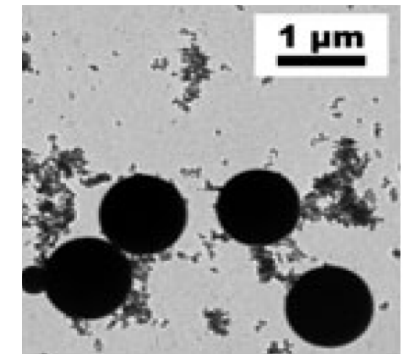
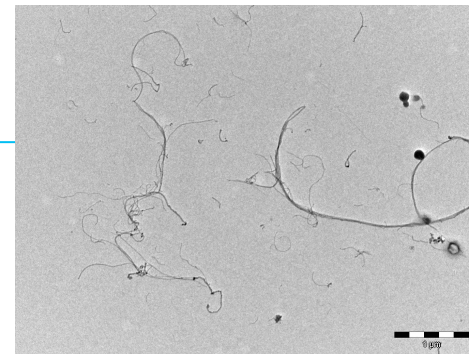


DIFFERE



Spéciation chimique résolue en taille ?

Efficace mais peu adapté à la surveillance
(dans une logique de détection de fuite)



Exemple de métrologie dédiée

- Prix 2011 « La Recherche »
- Prix INPI-2013
- 15 publi ISI

Détection et mesure en temps réel

Des particules et des nano-objets dans différentes matrices :

Air (poste de travail, environnement), liquides (eau, fluides bio), solides (filtres, matériaux, sols)

Actuellement : mesure en masse (gravimétrie), en nombre, taille, surface spécifique ...

→ Ne permet pas de distinguer NOAA du bruit de fond

Exemple de métrologie dédiée :

→ **Matrice air : par LIBS**

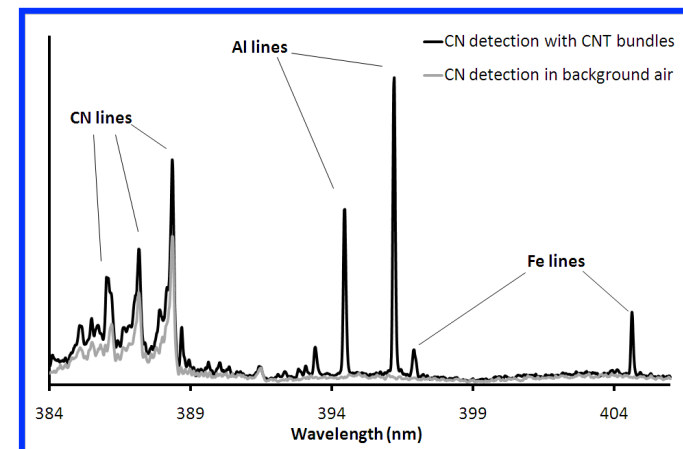
Spectro de plasma induit par laser

LDD $\sim \mu\text{g}/\text{m}^3$ for Ag, Ti, Zn...

→ Matrice liquide : par SP-ICP-MS

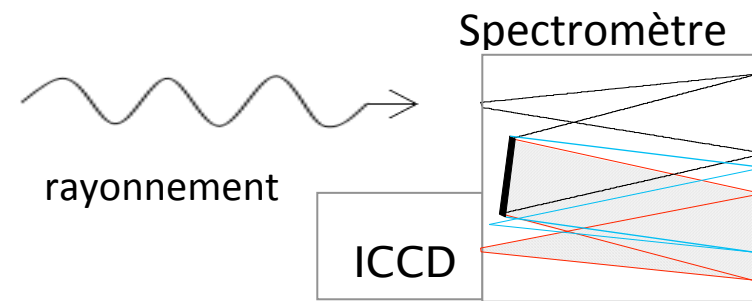
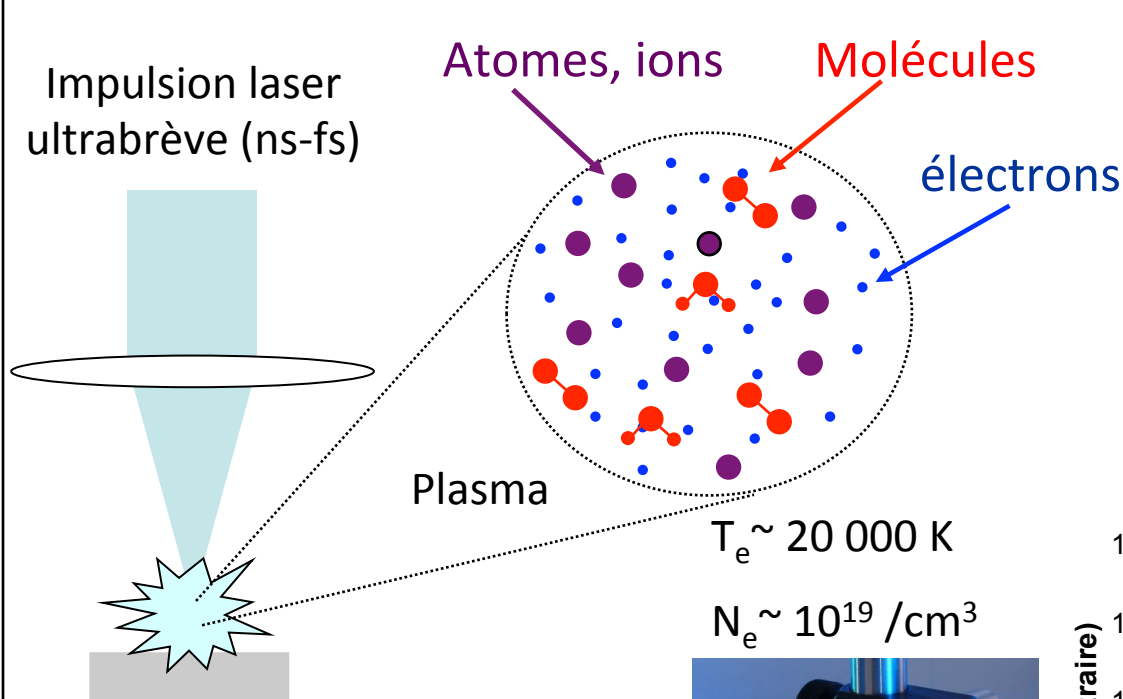
Mode analyse de particules individuelles

→ Matrice solide : par Fluo-X-Rasante

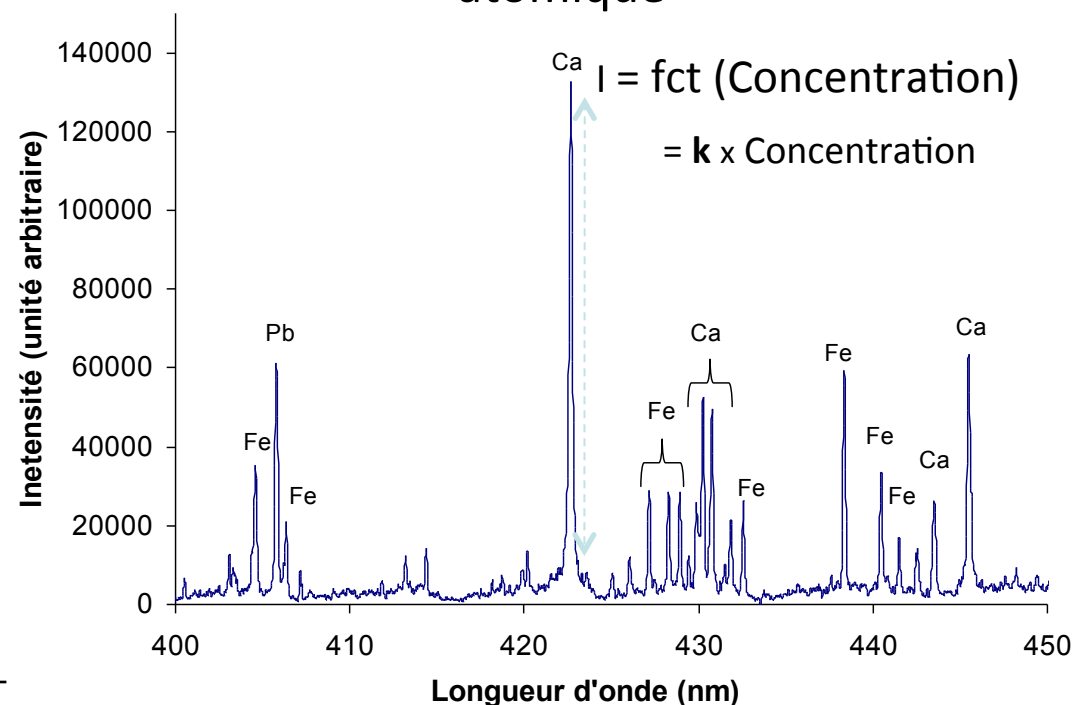


Détection des (nano)particules dans l'air : choix de la LIBS

→ Spectroscopie de Plasma Induit par Laser : son principe

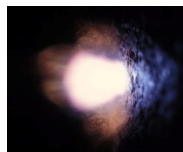


Spectre d'émission atomique

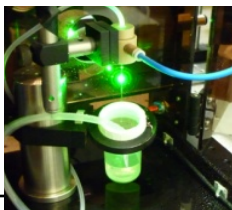


Échantillon :

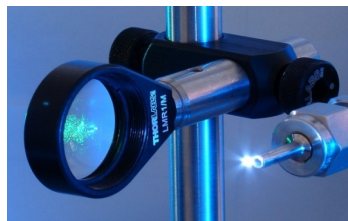
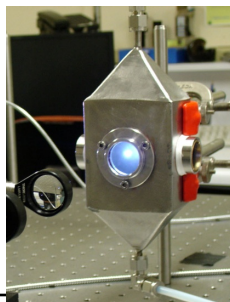
Solide



Liquide



Gaz

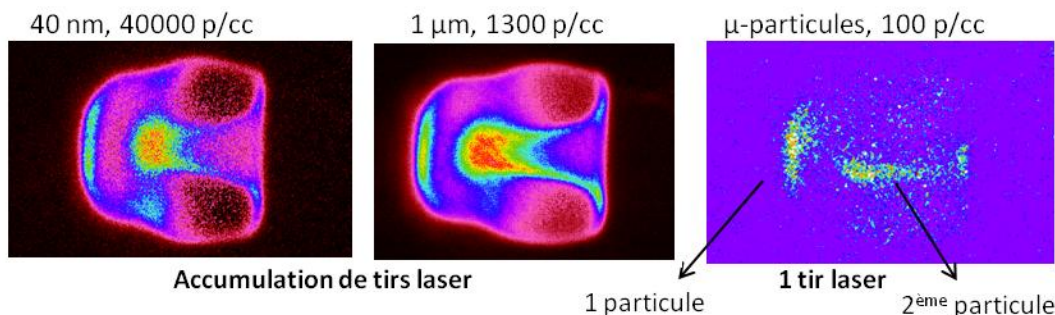


LIBS pour l'analyse de (nano)particules dans l'air

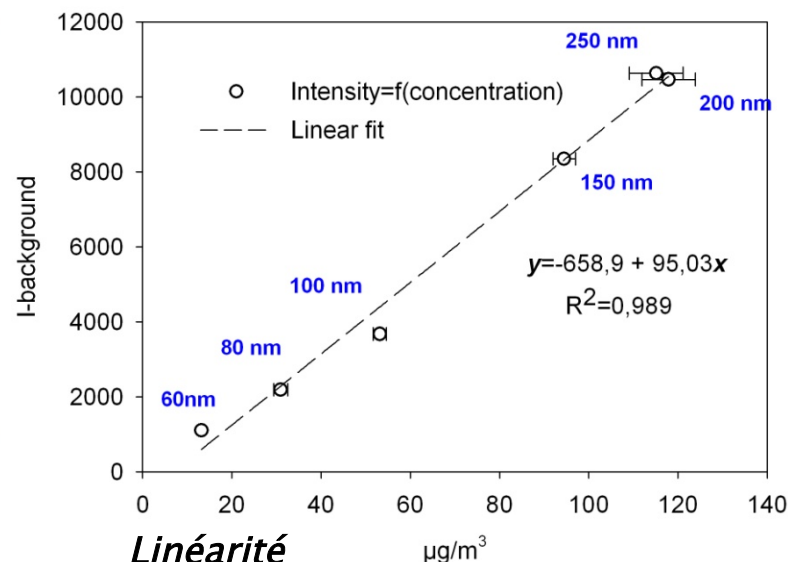


Imagerie → Compréhension, optimisation design

Imagerie spectrale de particules de Chlorure de Sodium dans un LIP (Délai = 20 μ s)



Na spectra intensity as a function of NaCl mass concentration for different particle sizes

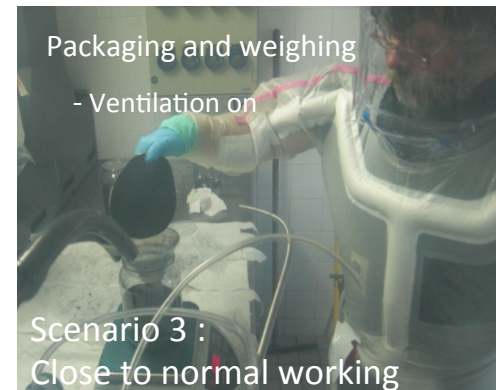
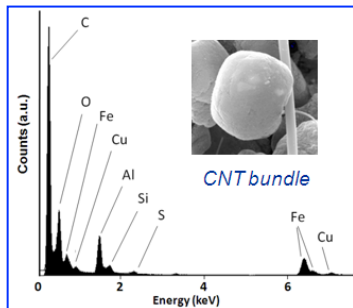


Linéarité
→ auto-absorption, écrantage, principe

Elément	Limite de Détection « LIBS »	VLE (INRS)	Guideline EU-OSHA "0,066"
Cu	52	1000	66
Al	445	10 000	660
Ti	400	10 000	660
Cr	45	500	33
Fe	200	5000	330
Si	500	4000	264

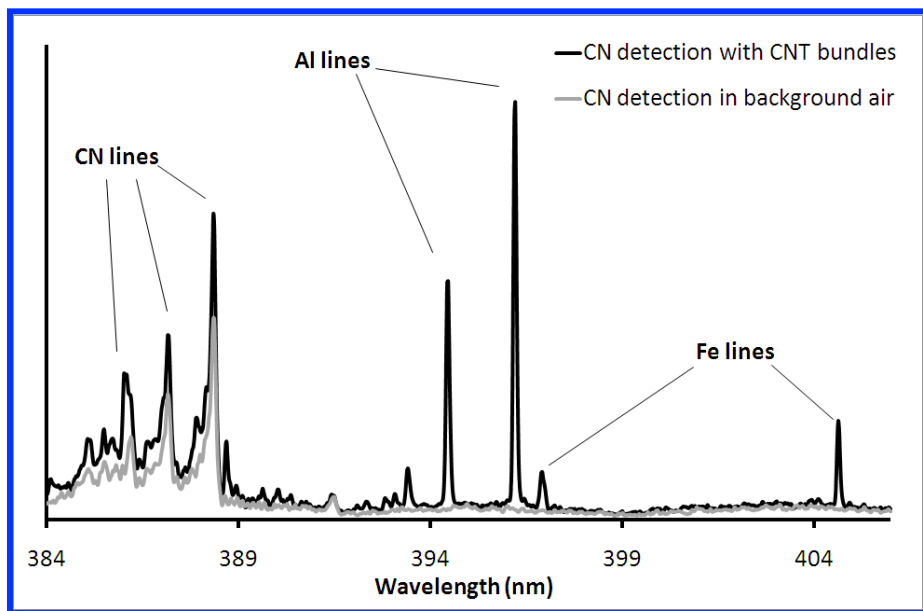
- ◆ Bonne reproductibilité
- ◆ Limite de détection : 1 μ g/m³ à 1 mg/m³
- ◆ Faible sensibilité du signal en fonction :
 - de l'énergie du laser.
 - de la taille des particules (60 → 500 nm).
 - de l'humidité des particules.

Détection des (nano)particules dans l'air : nanotubes de carbone

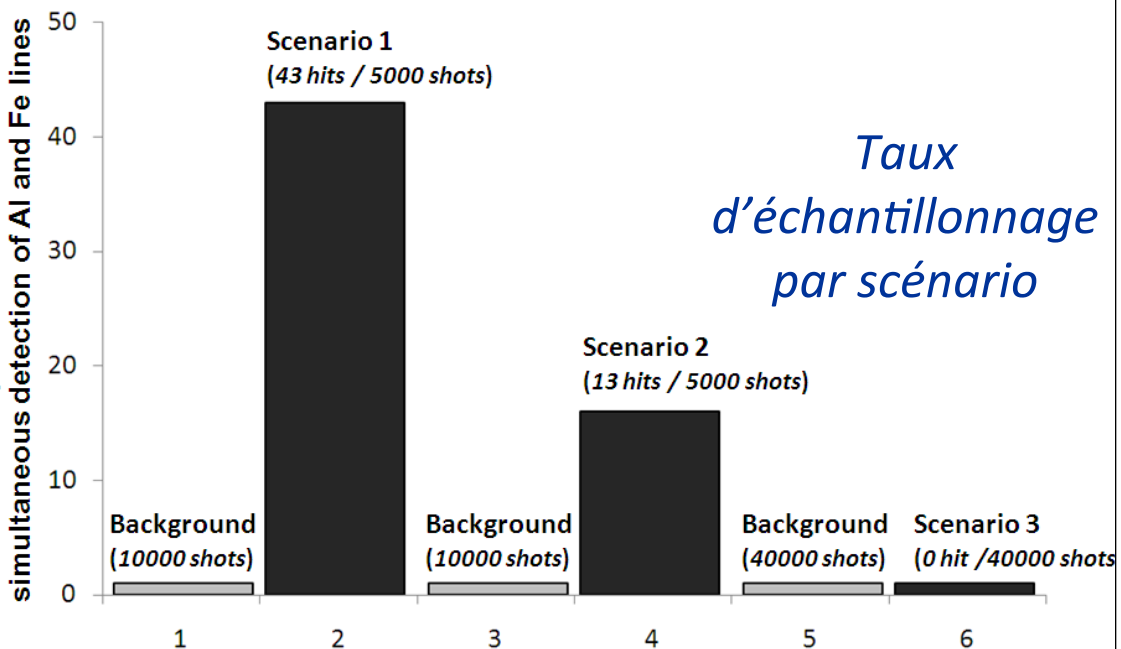


Faisabilité de l'analyse conditionnelle
Appliquée aux pelotes de NTC

Détection simultanée de raies CN, Al et Fe



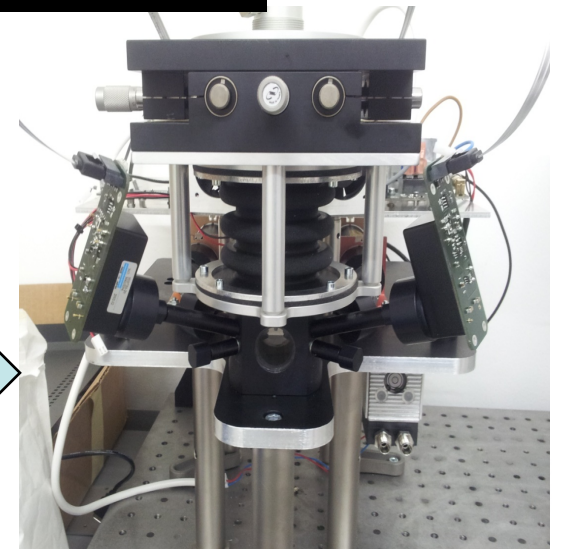
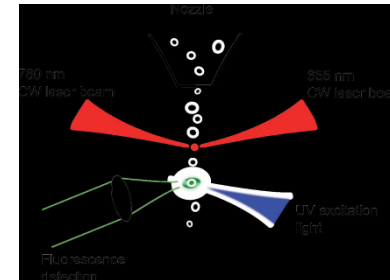
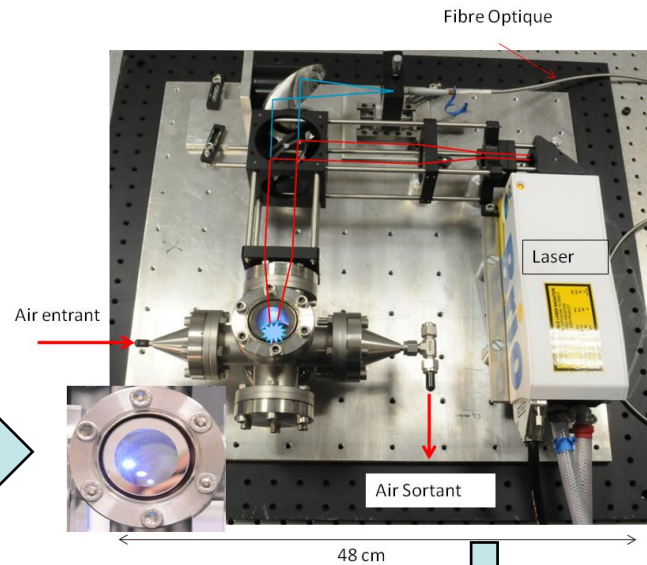
Laser-induced plasma hits:



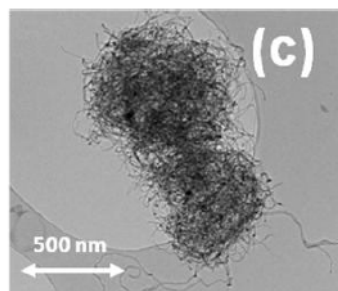
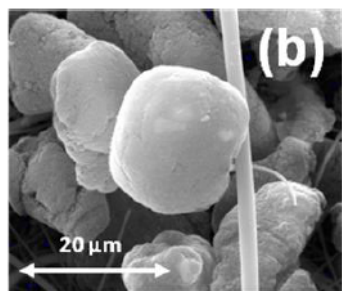
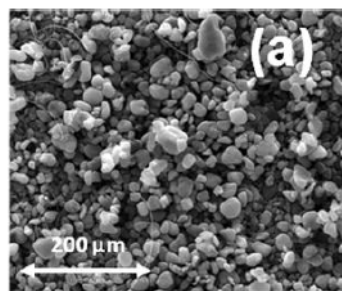
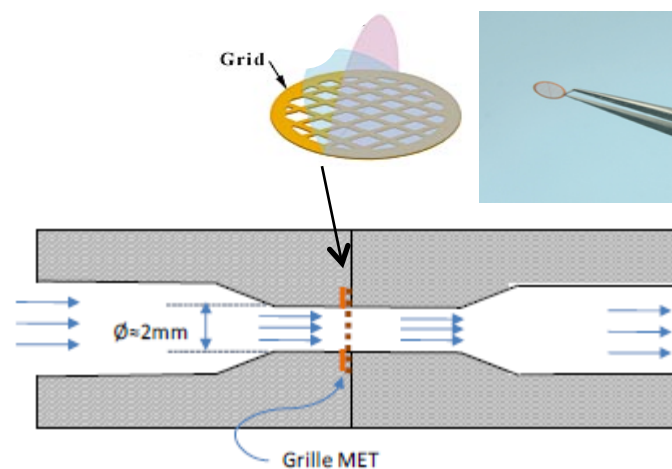
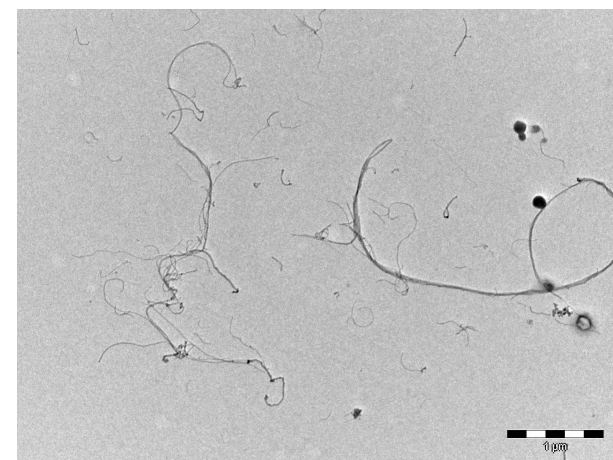
Détection et mesure des nanoparticules dans l'air : perspectives en métrologie LIBS

→ *Collaboration INERIS - UCBL1 - GAP*

Aérosols : LIBS - LIF - DMA
Taille, chimie de surface, composition élémentaire



Exemple de préleveur de nano-objets



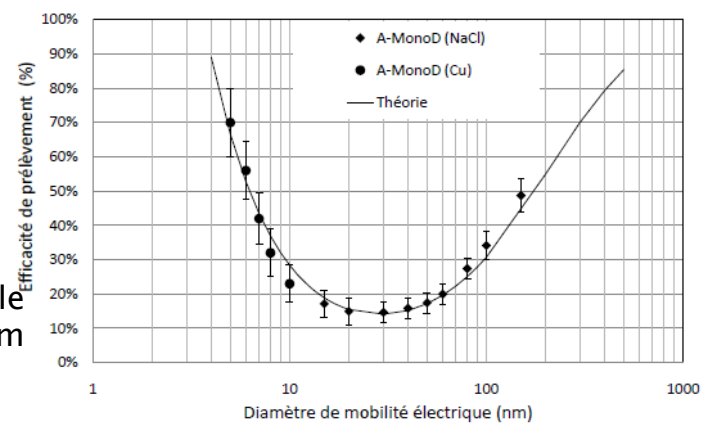
Quartz filter surface SEM image

SEM image of CNT bundles

TEM image of CNT bundle

Ref. R'mili, INRS 2011, nanosafe2012.

Efficacité de collecte vs taille
Minimum : 20% @ 20 nm





Connaissance des dangers des substances à l'état nanoparticulaire

La caractérisation des dangers toxicologiques

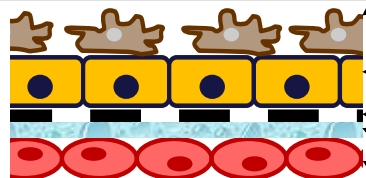
⇒ Des voies/modes d'exposition différents
pénétration, translocation, réactivité

Paramètres étudiés

- Cytotoxicité
- Inflammation
- Stress oxydants
- Genotoxicity

Modèle cellulaire: immersion

Modèles de barrières cellulaires
IA549 ± THP1 → bronchique
Quid barrière alvéolaire ?

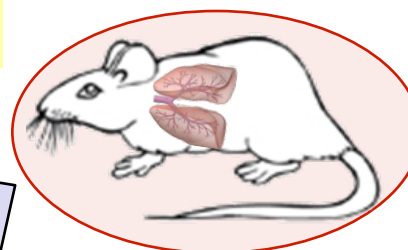


Modèle d'exposition
Air-Liquide (ALI)



Corrélation dose/
réponse
Marqueurs d'effet
sélectivité

Système d'exposition Vivo
par inhalation



Vérification de la cible
Bio-distribution

Vérification de la cohérence vitro/vivo

Dangers éco-toxicologiques

→ méthodologie pré-réglementaire

→ Guide OCDE ENV-JM-MONO(2014)1

Ecotoxicology and Environmental Fate of
Manufactured Nanomaterials: Test Guidelines

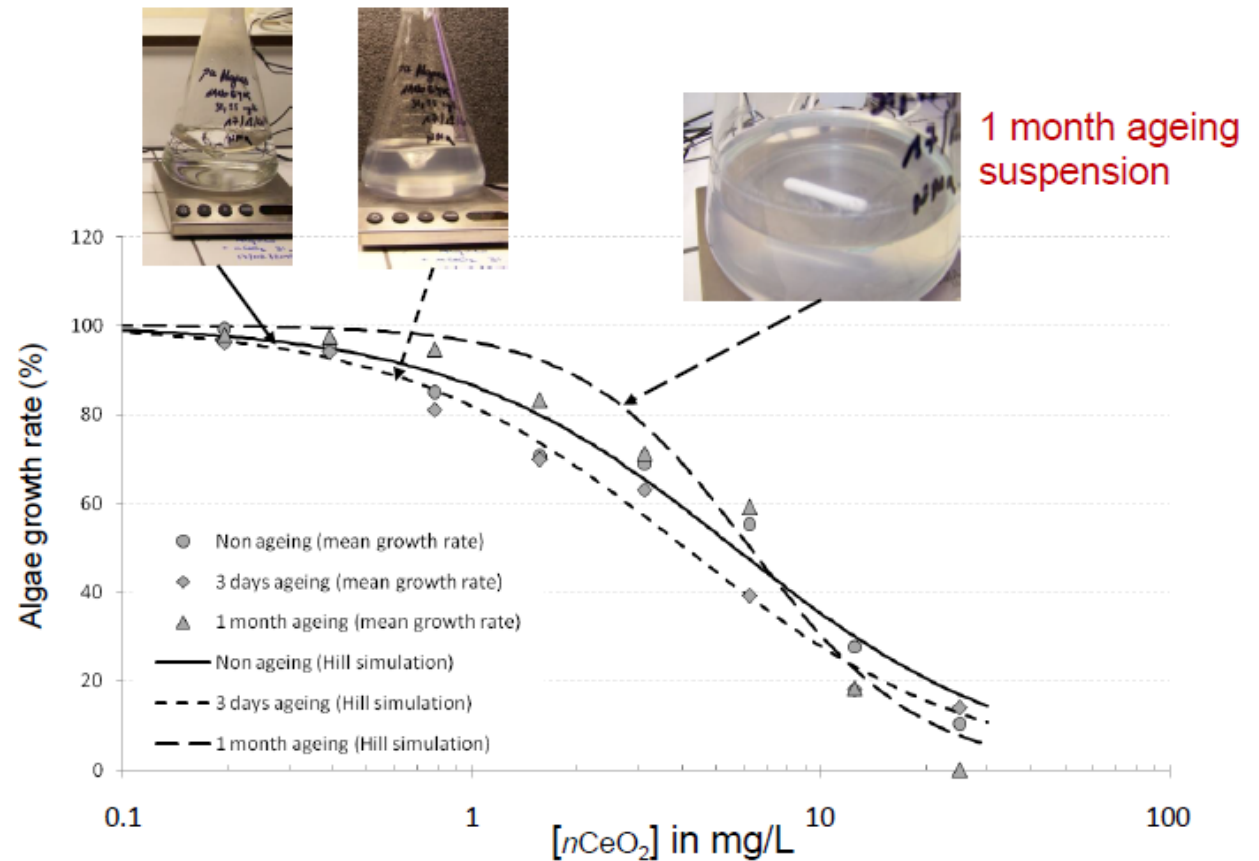
Enjeux

→ Etat de l'art méthodes/ essais
ecotox/sols/sédiments...
Eg. TG 202, 312, 305 ...

→ Approches/ critères
(dispersion, dissolution,
transformation ...)

→ Adapter les guides pour
prendre en compte la spécificité
Statique/ dynamique, PH ...

→ Inclure le vieillissement,
harmoniser les procédures



Ici, le vieillissement modifie le taux d'agglomération mais
ne modifie pas son caractère éco-toxicologique

Les dangers physiques

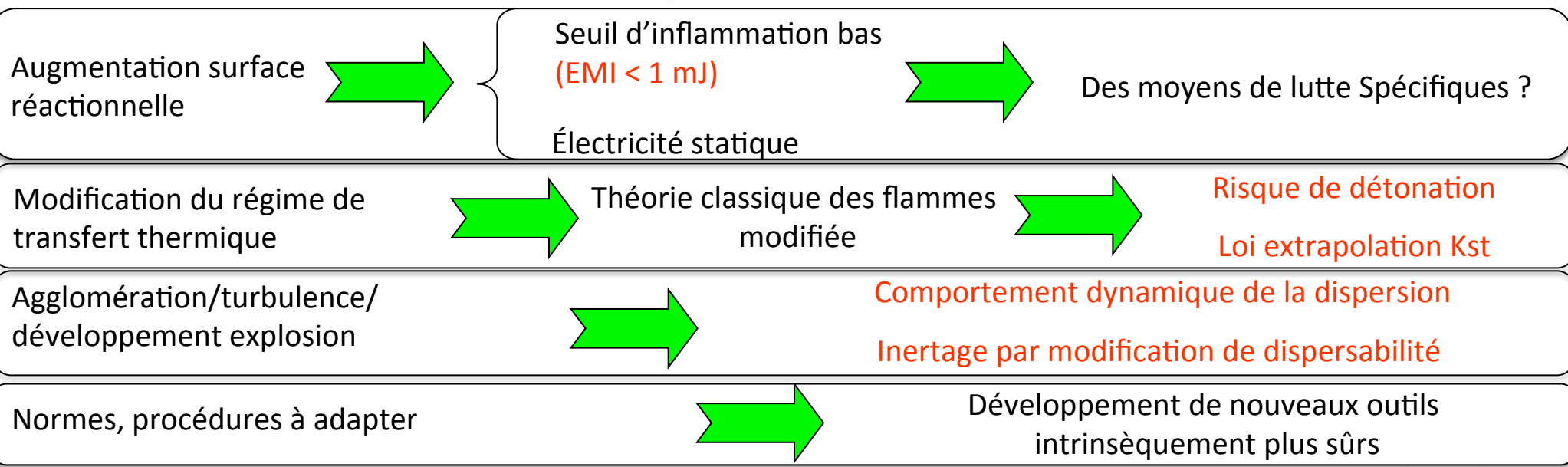
Inflammabilité, explosivité

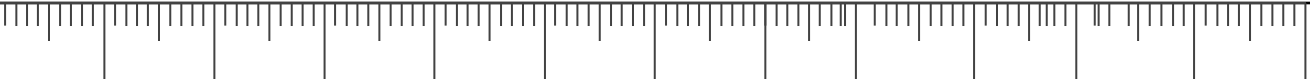
Reconnaissance internationale :
 INERIS leader du GT CEN sur les
 dangers physiques

Une diversité de matériaux concernés,
 une diversité de propriétés dangereuses

Des Questions posées :

Combustibles	Non combustibles
Noir de carbone	TiO2
Nanotubes de carbone multiparois	SiO2
Nanotubes de carbone simple paroi	ZnO
Nano cellulose	Al2O3
Nanofibres de carbone	Oxydes de fer (Fe3O4, Fe2O3)
Nanoparticules organiques	Zircone (ZrO2)
Carbures métalliques, nitrures métalliques	Nanoargiles
Si, SiC	CeOx
MoS ₂	Ag, Au
Cu, Al, Fe	
Composites métalliques (Co-Cu, Ni-Fe, Co-C, Co-C-Au ...)	
Oxydes métalliques revêtus de polymères	





Maitrise des risques des produits
Etude du cycle de vie
Gestion de la fin de vie

Cycle de vie d'un produit de consommation

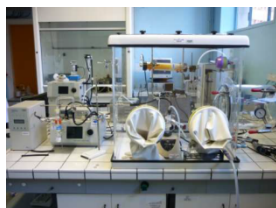
→ Caractériser le potentiel émissif / voie d'exposition

Connaître les émissions de NOAA sous contraintes en tenant compte des effets de vieillissement

→ Exposition directe des consommateurs

→ Risques domestiques

→ Expositions environnementales / Evaluation des risques sanitaires



Les besoins techniques :

Des Bancs d'essais de vieillissement

Action mécanique (érosion, abrasion...)

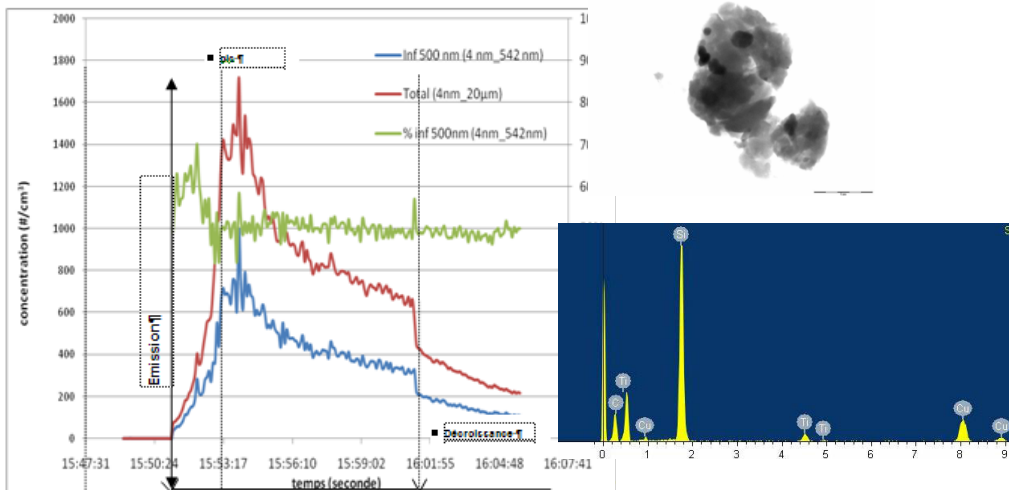
Action chimique (nettoyage, acide/base...)

Action environnementale (UV, lessivage...)

Des moyens de mesure en temps réel :

Tailles, forme, composition chimique

nano-objets : libre ou associée

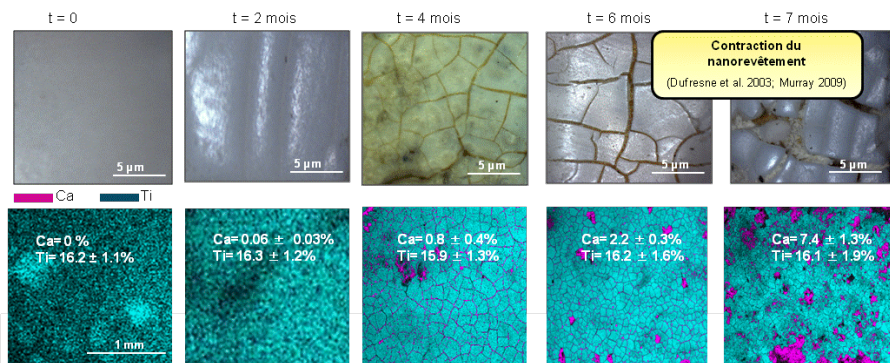


Exemple de travaux en cours : Emissivité de surfaces « nano » & effet du vieillissement

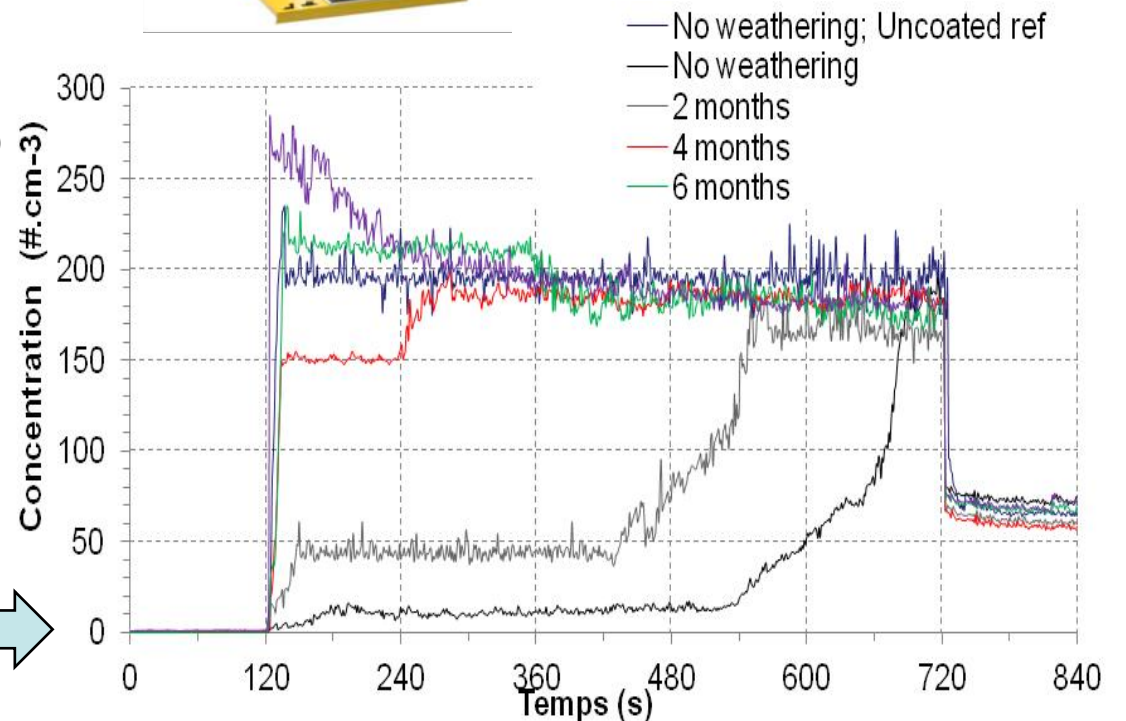
➤ Effet des contraintes mécaniques (via abrasion) ainsi que environnementales sur les revêtements vieillis et non-vieillis



Vieillissement d'un revêtement (7 mois en chambre)



Resistance mécanique de la surface
à l'abrasion $f(t, p_0) = \#/\text{cm}^3$



Politique européenne de gestion des déchets, par ordre d'application (Directive Déchets 2008)

Prévention ...

Réemploi (tel quel ou après requalification)

Recyclage (spécifique : industrielle et municipale/domestique)

Valorisation matière

- Matière première secondaire (ex : broyat de pneu)
- Amendement/Fertilisant (ex : compost, boues de station de traitement des eaux usées domestiques ou industrielles, sous-produits de papeterie, sédiments de curage non dangereux)
- Granulat/Matériau en travaux Publics (ex : mâchefers d'IOM après test, laitier de haut fourneau)

→ Modification d'un matériau = modification de la capacité de recyclage ou valorisation ?



Politique européenne de gestion des déchets, par ordre d'application (Directive Déchets 2008)

Valorisation énergie

- Méthanisation
- Incinération (ex : ordures ménagères OM, déchets industriels banaux DIB, déchets industriels spéciaux ou dangereux DID)

→ Adéquation des technologies aux nouveaux matériaux

Stockage (uniquement pour les déchets non valorisables)

- Décharge pour déchets inertes (liste d'admission, limites de composition chimique totale et lixiviable)
- Décharge pour déchets non dangereux (idem)
- Déchets dangereux (après éventuelle réduction du caractère polluant : incinération, stabilisation/solidification)

→ Modification d'un matériau = modification de classification ?

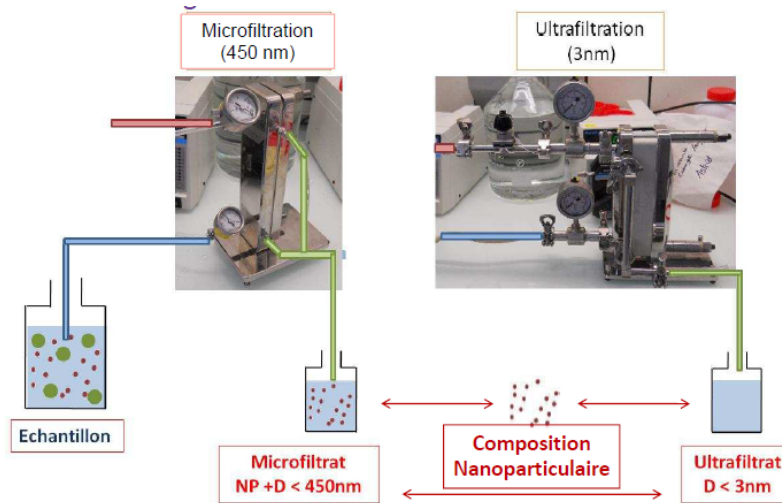
Exemple de travaux en cours

Etude de la dangerosité des déchets de nanomatériaux

Adapter les modes opératoires de classification

→ évaluer la présence de NOAA dans les eaux / boues / sédiments

Préparation



Permet d'obtenir deux fractions :

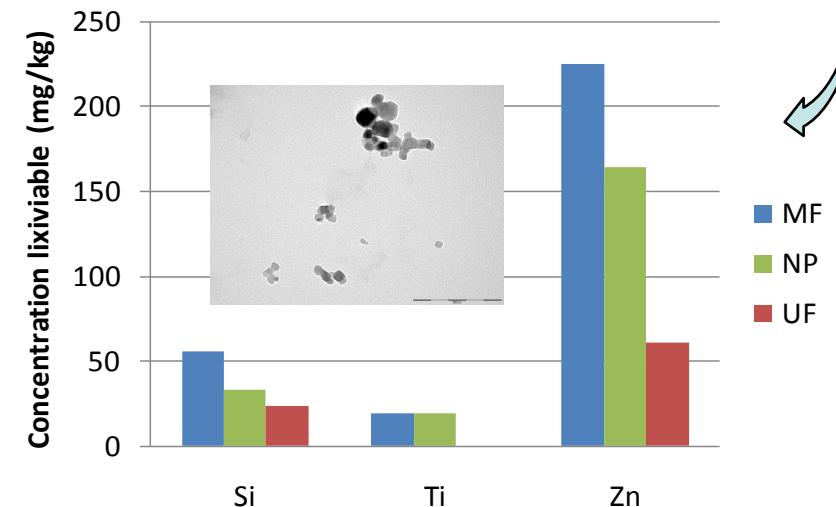
- μ -filtrat composé de nano et de dissous
- Ultra-filtrat composé que de dissous

$[\mu F] / [UF]$: indice de présence de nano

Détection

- Concentration
 - Composition
 - Forme
 - Taux d'agrégation
 - Structure / cristallinité
 - Charge de surface
 - Taille / Distribution des tailles
- ICP-OES ou ICP-MS (minéralisation et mesure des éléments)
COT mètre (mesure du carbone) – CEREGE Aix-en-Provence-
- Microscopie électronique en transmission couplé à Spectro à Dispersion d'énergie
Séchage de l'échantillon sur grille de cuivre puis analyse
- Zétamétrie Charge de surface
- Granulométrie Gammes de tailles
- Coefficient de diffusion (D)

Crème solaire



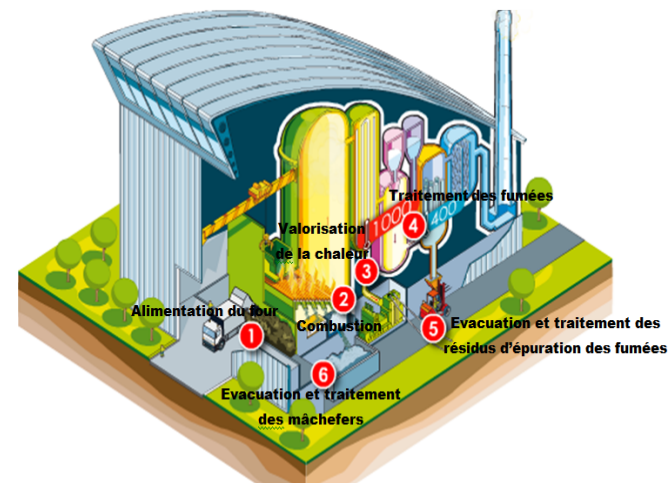
Exemple de travaux en cours

Etude de la filière de valorisation énergétique des déchets

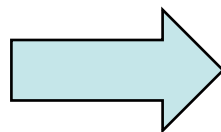
caractérisation des nanocomposites

Etude du comportement en incinération

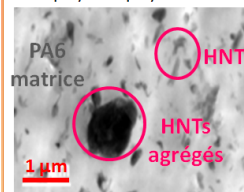
Compréhension des mécanismes de combustion et étude de l'influence de paramètres opératoires



Caractérisation de l'aérosol de combustion (phases gazeuse et particulaire) et des résidus de combustion



Nanocomposite PA6/HNTs
HNTs incorporés dans une matrice polymère polyamide 6



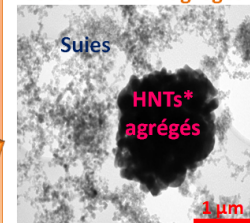
HNTs d'origine



HNTs = Halloysite Nanotubes (nano-objets d'argile)

Incinération à l'échelle laboratoire dans un four modifié

Aérosol de combustion
Suies & HNTs* agrégés



HNTs* = pseudo-HNTs avec une structure minérale transformée

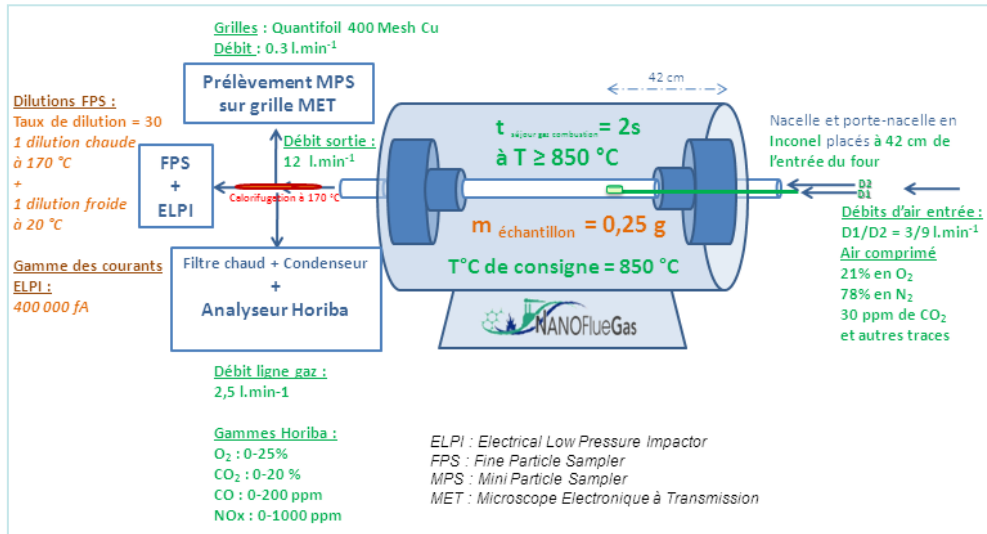
Résidus de combustion
HNTs* & HNTs* agrégés



Exemple de travaux en cours

Etude de la filière de valorisation énergétique des déchets

→ **Efficiace des procédés d'incinération**

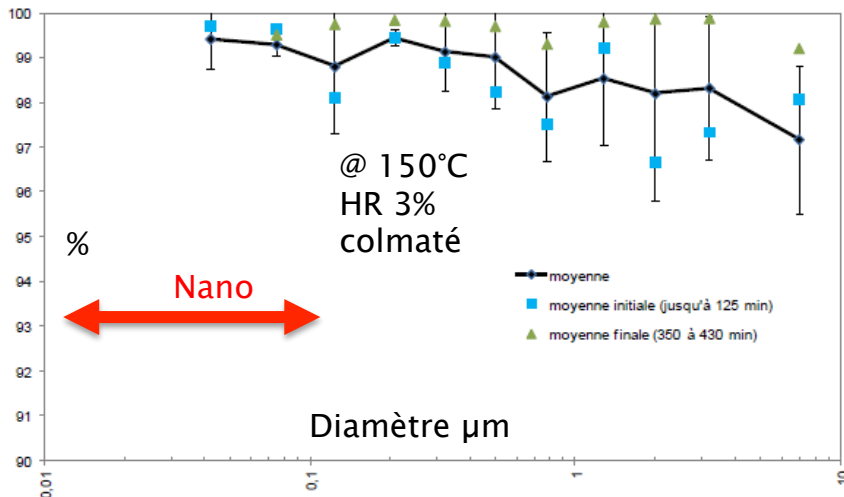


Four tubulaire modifié / représentatif de la réalité industrielle (incinérateur à grille/ 2s@850°C...)

Etude de l'émissivité de différents nanomatériaux / effluents gazeux et solides

Pilote d'incinération à l'échelle laboratoire

Efficacité de filtres à manche/ Traitement



La nanostructuration peut se transférer dans les effluents gazeux et particulaires
Les systèmes de filtration ont une bonne efficacité pour les tailles nanométriques
La gestion des déchets devient celles des résidus d'incinération (mâchefers, filtres)

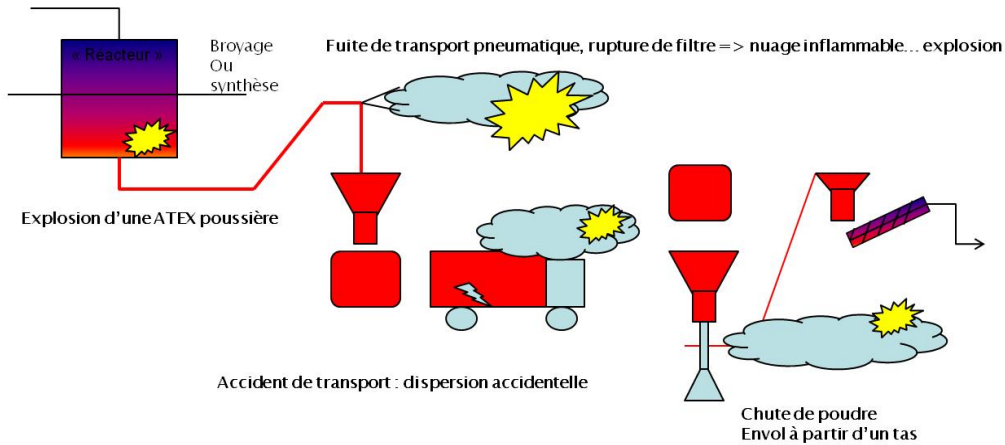


Maitrise des risques des procédés de production et des filières industrielles

Evaluer les risques industriels

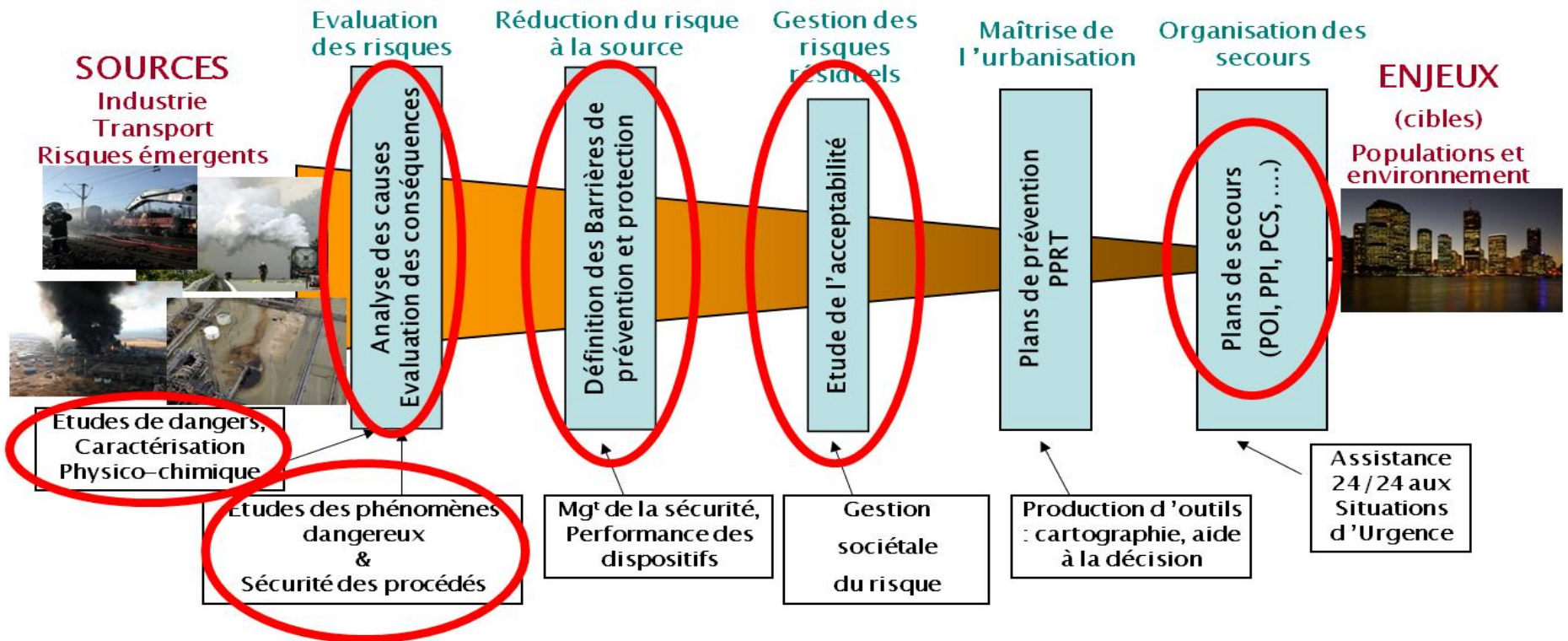
Scénarios accidentels chimiques non spécifiques

Nanoparticules inflammables



Risques :

- Incendie, explosion
- Exposition aigüe ou chronique
- Exposition indirecte (aliments, eau)

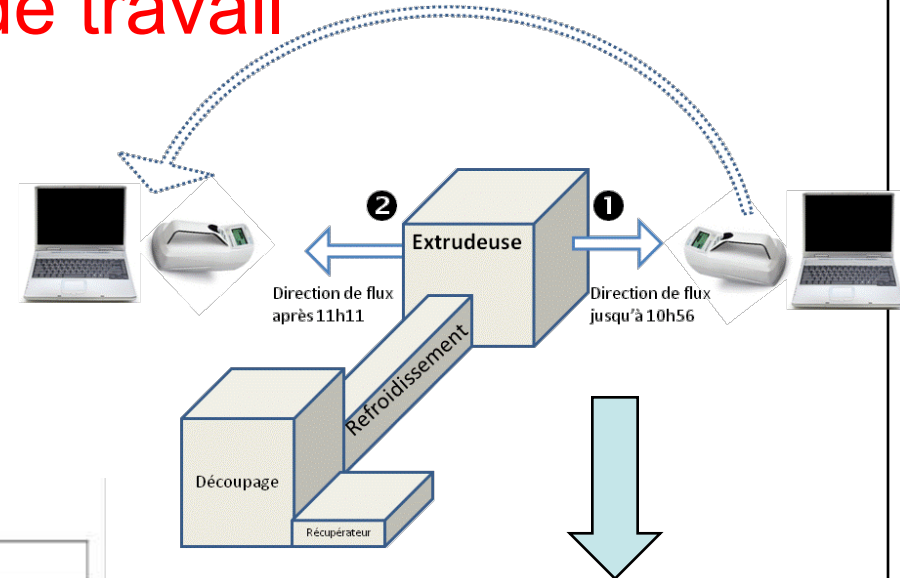
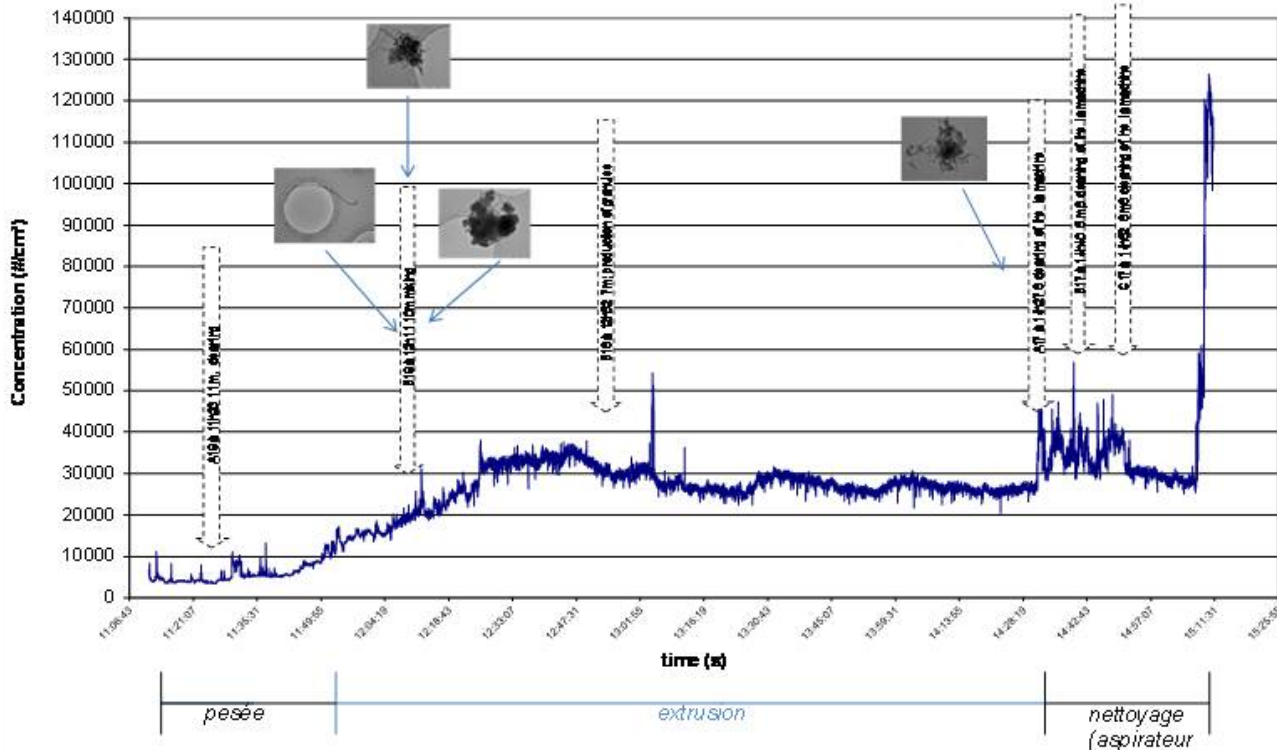


Maîtrise des expositions au poste de travail

Objectifs :

- Identifier les phases à risques
- Analyse de risques qualitative/ quantitative
- Proposer des actions de mitigation

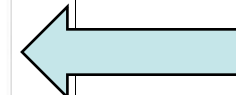
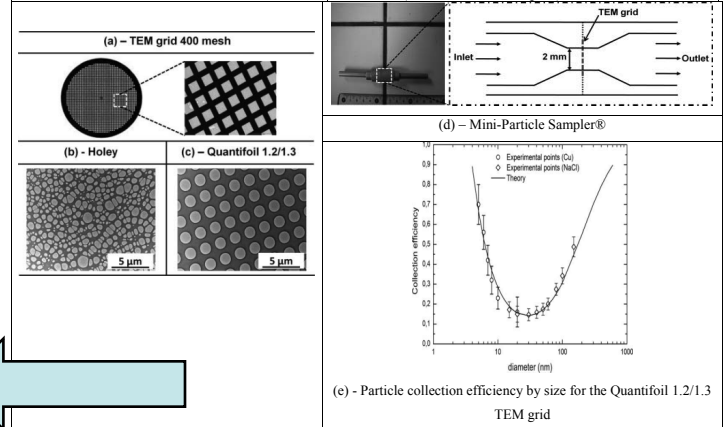
Guide (INERIS-INRS-CEA) + Compétences/ Moyens Caractérisation des Exposition aux postes de travail



CPC 3007 - TSI



MPS (mini-Particle Sampler) - ECOMESURE



Maîtrise des expositions au poste de travail

Connaître les performances des barrières
et vérifier les capacités de confinement

Traçages : gaz et nano-objets

→ Choix du traceur nano

→ Choix des scénarii d'usages



Catégorie	Confinement	Propreté de surface	Sécurité fonctionnelle	Type/Technologie (1)
C0	Extraction et filtration	N1	S1	Sorbonne ou PSM type I
C1	Extraction et flux dynamique	N1	S1	PSM type II
C2	extraction et double filtration	N2	S2	PSC
C3	système clos et filtration	N3	S3	Isolateur



Connaître les performances des moyens
de sécurité associés

→ Choix des automates de sécurité

→ performance et durabilité

→ rupture de confinement

→ gestion de la maintenance



Estimer l'impact dans l'environnement industriel

Objectifs

- Estimer l'imprégnation environnementale d'une unité de production ou d'intégration de nano-objets
Multi-milieux (air, dépôts surfacique, eau, sédiments)
Prendre en compte des scénarios accidentels
- Déterminer les éléments dimensionnant cette imprégnation

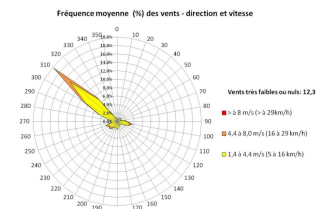
Méthodes

Revisiter/ adapter les méthodes de surveillance enviro.

Approche méthodologique :

- Fondée sur méthode « classique » de surveillance enviro.
estimation des flux, Prédiction retombées, définition des zones
- Par couplage entre 30j, 24h et mesures instantanées
- Par couplage entre données de masse/taille/forme

→ Faisabilité démontrée sur sites industriels



L'INERIS :

Des compétences et des outils

pour une innovation maîtrisée et sécurisée



Des questions

Substances à l'état nano
Produits nanostructurés
Procédés, postes de travail
Site industriel/ Production,
Stockage, Transport ...
L'environnement
Les consommateurs
Le cycle de vie, la fin de vie

Nos compétences

Caractérisation des dangers
Maîtrise des expositions
Evaluation des impacts
Maîtrise des risques &
Management des risques
(travailleurs, procédés, sites)
L'analyse socio-economique

Nos services

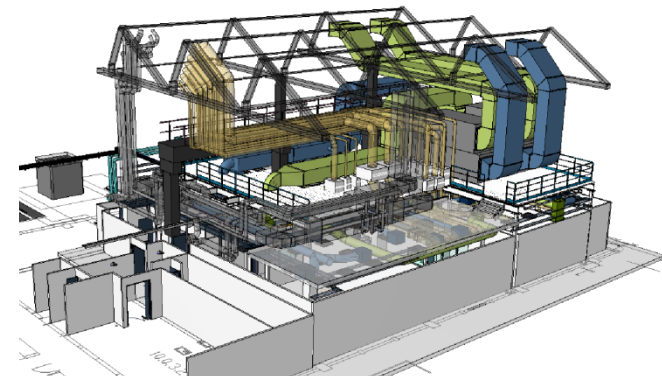
Caractérisation phys-chim
Mesures de terrain,
Essais sur produits
Audit sur site
Analyses de risques
Formation / Certification
Recherche partenariale

Des plateformes technologiques dédiées

Une plateforme nano-sécurisée (S-NANO) :

→ Moyen structurant de connaissance des dangers

- ✓ Moyens de mesures de terrain, caractérisation des substances
- ✓ Caractérisation des dangers physiques : explosivité, inflammation
- ✓ Caractérisation des produits : électrostatique, pulvérulence, dispersion
- ✓ Etude du cycle de vie : émissivité en usage, incinération...



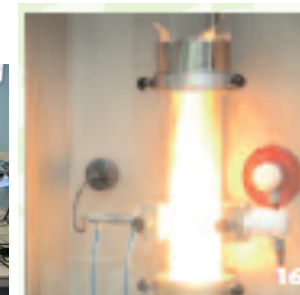
Une plateforme nationale en science du vivant (ANIMEX) :

→ Système unique d'étude de la toxicité/ nano

- ✓ Pour des études de toxicité pulmonaire sous BPL
- ✓ nano-poudres (sèches, dispersées en solution...)

Qui peut être utilisée en neurotox, tox alimentaire ...

Qui peut servir à la validation de modèles in-vitro, in-silico



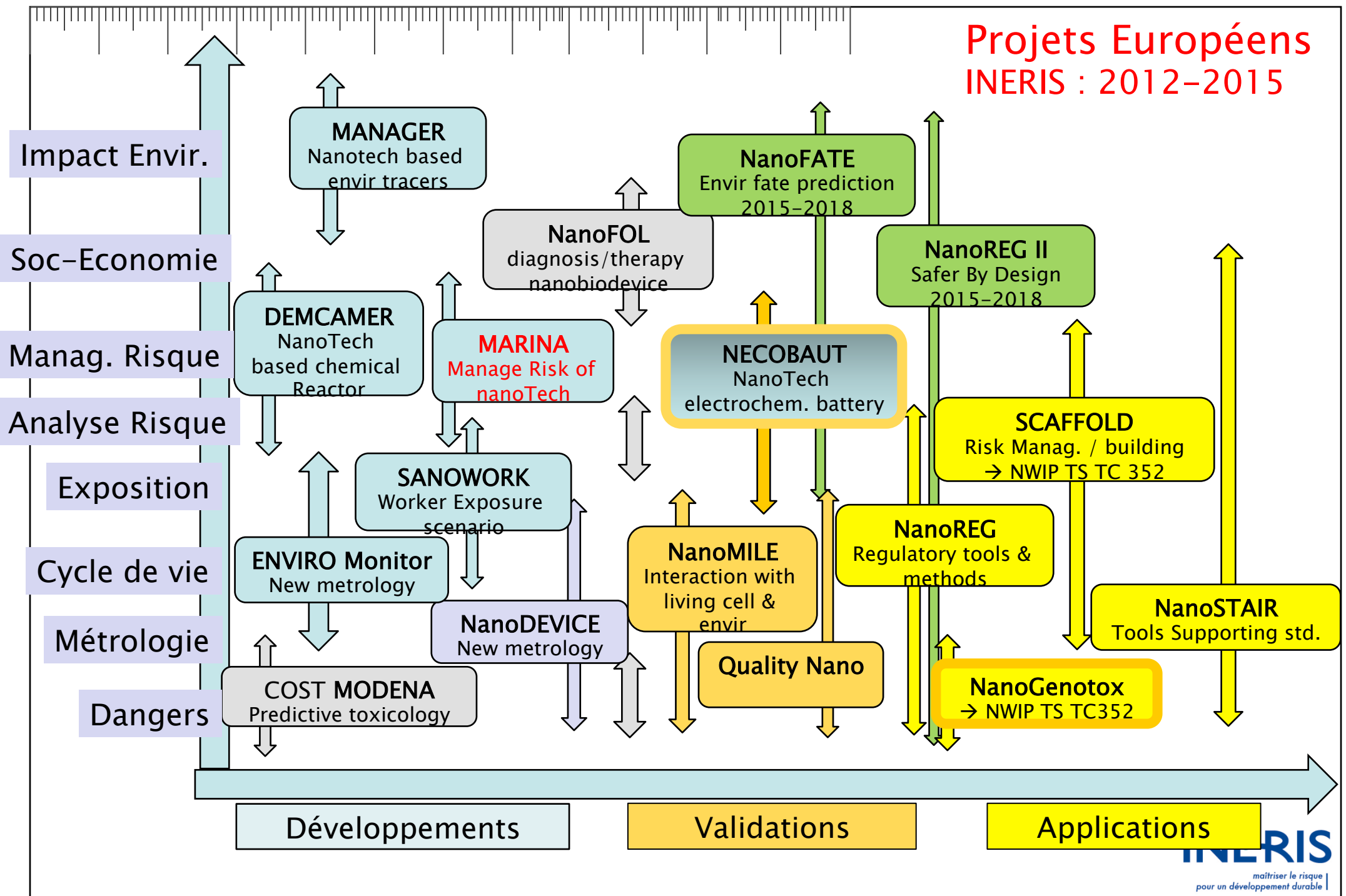
Une plateforme d'étude des déchets (ARDEVIE)

→ Centre commun INERIS-CNRS/CEREGE :

- ✓ Vieillessement/altération de nanomatériaux
- ✓ Modélisation géochimie/transport. (sol, nappe)
- ✓ Plate-forme extérieure/ condition env. réelle

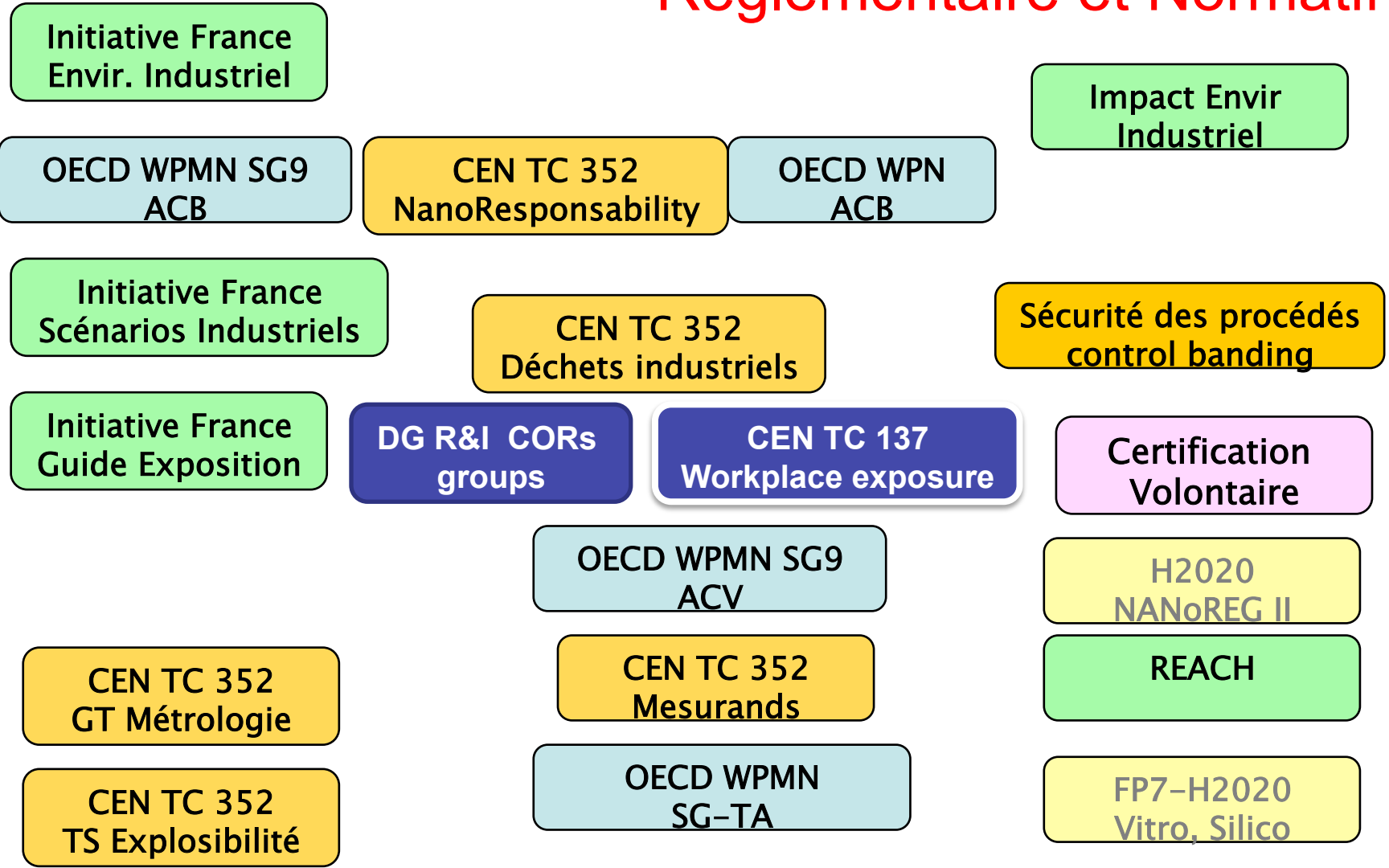


Projets Européens INERIS : 2012-2015

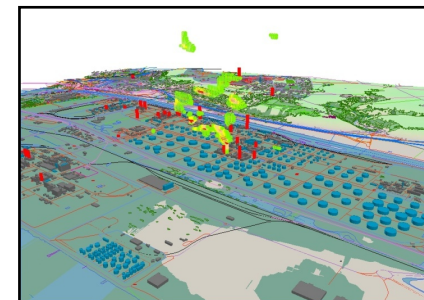
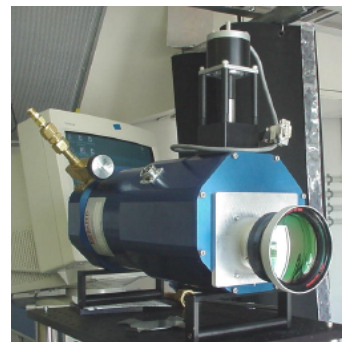


Réglementaire et Normatif

Impact Envir.
Soc-Economie
Manag. Risque
Exposition
Cycle de vie
Métrologie
Dangers



Coordonner Contribuer Transférer



Merci de votre attention
emerik.frejafon@ineris.fr

Contributeurs :
 Christophe Dutouquet
 Tanguy Amodeo
 Olivier Le-Bihan
 François Gautier
 Sylvain Geffroy
 Clotilde Moppert
 Guillaume Gallou
 Badr R'Mili
 Benoit Faye

