

## **Maîtrise de la qualité microbiologique de l'air des bâtiments**

### **Travaux scientifiques et moyens expérimentaux**

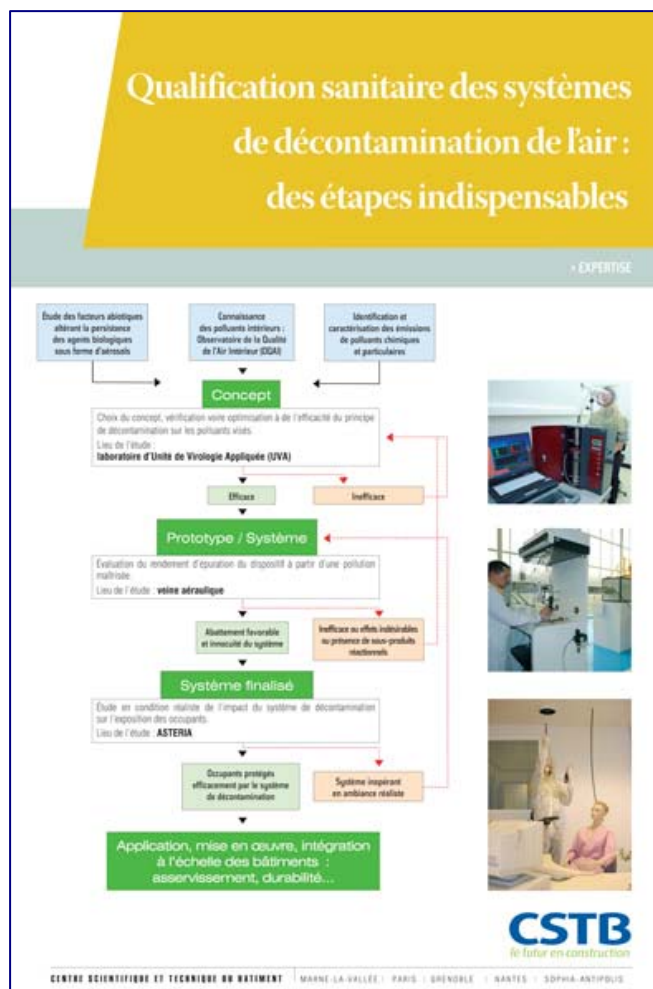
Nous passons 90% de notre temps dans des lieux clos - logements, lieux de travail, commerces, transports - qui sont le siège de la plupart des contaminations microbiennes. Afin que les environnements intérieurs ne soient pas préjudiciables à notre santé (allergies et troubles, intoxications par inhalation, infections), des innovations en gestion et en décontamination de l'air voient désormais le jour.

Le CSTB a engagé ces dernières années, avec le soutien des Pouvoirs publics, un ambitieux programme de recherche pour comprendre les modes de propagation et de survie des contaminations aéroportées bactériennes (dont les légionelles) et virales (VRS, grippe) et aider à la qualification de procédés innovants pour leur maîtrise dans les bâtiments.

En partenariat avec CIAT (premier fabricant français en climatisation centralisée et de traitement d'air), le CSTB a développé les équipements ASTERIA et "one-pass", outils d'étude pour estimer la pertinence des systèmes de traitement microbiologique de l'air.

# Maîtrise de la qualité microbiologique des espaces clos

Les bio-contaminants se dispersent dans l'environnement immédiat et empruntent éventuellement le système de ventilation pour se disséminer à grande échelle. Le CSTB mène depuis plusieurs années des recherches pour améliorer l'hygiène des espaces clos et prévenir les risques sanitaires d'origine microbiologique associés aux bâtiments. Point de départ de cette recherche : le développement de la connaissance de l'exposition des personnes aux bio-contaminants de l'air. Au programme : métrologie, inventaire, occurrence, déterminant des émissions et mise en œuvre d'outils opérationnels dédiés à la maîtrise de la qualité microbiologique de l'air des espaces clos. L'objectif est de comprendre les facteurs (biotiques et abiotiques) de l'environnement impliqués dans la dissémination, le transfert et la survie des microorganismes aéroportés dans les espaces clos.



# Principes et systèmes de décontamination

## Systèmes de décontamination de l'air


### Principes de dépollution

EXPERTISE

#### Inactivation du polluant

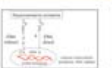
##### Émission de composés chimiques

1 - Émission et diffusion de composés bioactifs ou bioactifs (huiles essentielles, ozone, peroxy d'hydrogène...)  
2 - Oxydation du polluant



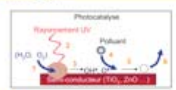
##### Photolyse

1 - Rayonnement de l'eau  
2 - Formation des radicaux libres  
3 - Oxydation  
4 - Action direct des UV




##### Photocatalyse hétérogène

1 - Adsorption d' $H_2O$  et  $O_2$   
2 - Formation d'un dipôle électronique par irradiation du semi-conducteur par un rayonnement électromagnétique  
3 - Formation de radicaux hydroxyles et d'ions superoxyde  
4 - Adsorption du polluant sur la surface  
5 - Oxydation du polluant  
6 - Desorption et diffusion des produits de réaction



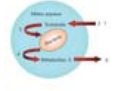
##### Plasma froid

1 - Activation par un champ électrique du gaz plasmogène ( $N_2$ ,  $O_2$ )  
2 - Formation de radicaux libres et émission de rayonnements UV  
3 - Action simultané des radicaux libres (oxydation) et action du rayonnement UV (induit (rupture de liaisons))



##### Biofiltration

1 - Diffusion de la molécule dans la phase gazeuse jusqu'à l'interface gaz-liquide  
2 - Transfert du polluant et de l'oxygène dans l'eau par absorption tubulaire et diffusion vers la bactérie  
3 - Dégradation du substrat par la bactérie qui produit alors des métabolites ou sous-produits de réaction  
4 - Transfert des métabolites et diffusion dans l'eau  
5 - Transfert des métabolites de l'eau vers l'air (desorption ou stripping)  
6 - Diffusion des métabolites dans la phase gazeuse



**CSTB**  
le futur est constructif

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT | MARNE-VALENTIN | PARIS | GRENoble | NANTES | SOPHIA-ANTIPOLIS

## Systèmes de décontamination de l'air

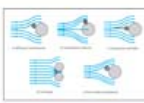
### Principes de dépollution

EXPERTISE

#### Transfert de la pollution sur un média

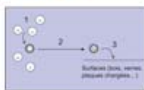
##### Filtration

Transfert des particules du fluide vecteur sur une fibre collectrice par différents mécanismes de capture.



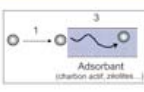
##### Ionisation et précipitation électrostatique

1 - Génération d'ions  
2 - Ionisation de la particule  
3 - Dépôt des particules chargées par attraction électrostatique




##### Adsorption

1 - Transport de la molécule de la phase gazeuse vers le solide  
2 - Adsorption en surface (physiosorption ou chimiosorption)  
3 - Diffusion dans les pores



##### Traitement par les plantes

1 - Adsorption du polluant (plante et terre)  
2 - Assimilation et oxydation du polluant (plante)  
*Vitesse d'élimination du Formaldéhyde par Nephrolepis exaltata et Bostoniensis » 1003 l/g.h<sup>2</sup>*



**CSTB**  
le futur est constructif

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT | MARNE-VALENTIN | PARIS | GRENoble | NANTES | SOPHIA-ANTIPOLIS

Les principaux concepts développés par les industriels et présents sur le marché pour améliorer la qualité microbologique de l'air sont étudiés. Procédés physiques, chimiques voie biologiques : filtration, précipitation électrostatique, ionisation et plasma froid, rayonnements, photocatalyse, ozone, bioprocédés, huiles essentielles.

## Evaluation du rendement des dispositifs de décontamination



Le banc "One-pass" permet de mesurer le rendement des dispositifs épurateurs en condition dynamique

» EQUIPEMENTS ET MOYENS

### Évaluer l'efficacité des épurateurs d'air

**Veine aérodynamique d'essais :**  
un système dynamique contrôlé et sécurisé

- 1 Aérodynamique de la veine d'essai**  
Wessels d'air, turbulences et hétérogénéité particulaire caractéristiques (NF X 10-101)
- 2 Gestion de la sécurité du système**  
Assurée par son étanchéité et son confinement (risque en dépression), les entrées et sorties d'air sont filtrées (filtres très haute efficacité HEPA)

**Une production d'aérosols microbiologiques maîtrisée**

- 1 Utilisation de différents modèles microbiologiques :**  
moisissures, bactéries et virus représentatifs des biocontaminants présents dans les environnements intérieurs.
- 2 Maîtrise du matériel biologique :**  
stabilité, granulométrie, concentration et survie de l'aérosol biologique produit

**La mesure du rendement d'épuration**

**Une mesure physique et biologique en amont et aval du système de décontamination :**

- 1 Une stratégie d'échantillonnage spécifique avec des prélèvements isocinétiques**
- 2 Compteurs optique et aérodynamique pour l'approche physique**
- 3 Inspection en milieu liquide et analyses microbiologiques pour l'approche biologique**

Centre de traitement d'air sur site



CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BÂTIMENT | MARNE-LA-VALLÉE | PARIS | BRUNOISE | NANTES | SOPHIA-ANTIPOLIS

Les industriels développent et commercialisent des dispositifs autonomes ou centralisés d'épuration d'air intérieur. Mais quelle est leur efficacité ? Leur utilisation est-elle d'ailleurs sans conséquence sur l'environnement ? Aujourd'hui, faute de méthodologie adaptée à la manipulation et à la génération contrôlée des principaux polluants représentatifs des environnements intérieurs (composés chimiques [COV, formaldéhyde...], particules y compris ultrafines et aérosols biologiques), les performances de ces systèmes ne sont généralement pas renseignées ou de façon impropre. Par ailleurs, l'innocuité de ces systèmes reste à démontrer. Des effets directs ou indirects peuvent se produire et des sous-produits réactionnels apparaître.

Deux bancs d'essai ont été développés, en collaboration avec CIAT, pour caractériser les systèmes épurateurs : en premier lieu, le banc "one-pass", veine aérodynamique pour étudier l'efficacité des systèmes centralisés de traitement microbologique de l'air. Un cocktail de polluants représentatifs de la "pollution intérieure" est injecté dans la veine. Le système épuratoire, souvent un simple filtre, doit faire son œuvre. Le rendement est estimé par des mesures du bioaérosol circulant dans la veine d'essais en amont et aval de l'épurateur. Les différents paramètres pouvant influencer les performances des équipements testés sont étudiés en considérant les facteurs inhérents à l'environnement de test et les variables liées au dispositif de purification.

Les dispositifs sont évalués à l'état neuf mais également après 300 heures de fonctionnement et avec un encrassement maîtrisé par un aérosol de poussières calibrées. Cet essai est indispensable pour mimer une utilisation plus réaliste des dispositifs. Dans un premier temps, on vérifie que le système ne dégrade pas la qualité de l'air intérieur puis qu'il atteint les propriétés escomptées. Les essais ont lieu, soit en milieu contrôlé, comme dans la veine "one-pass", puis si les premiers essais sont concluants en environnement réaliste, comme dans ASTERIA, le second banc d'essai réalisé en collaboration avec CIAT.

## Etudes en vraie grandeur : ASTERIA, en partenariat avec CIAT



> RECHERCHE

### ASTERIA, pour l'étude et la validation des systèmes de traitement d'air

Un outil unique, un environnement contrôlé échelle 1

**Objectifs**

- Étude des systèmes de traitement microbiologique de l'air
- Évaluation de l'exposition humaine aux risques microbiologiques
- Vérification de l'innocuité

**Dispositif**

- Volume de 200 m<sup>3</sup>
- Double enveloppe étanche et sas de sécurité
- Système de ventilation centralisée étanche

**Expérimentations**

- Simuler à l'échelle 1 différents environnements intérieurs: bureaux, écoles, crèches, blocs opératoires...
- Manipuler la plupart des micro-organismes aéroportés en toute sécurité
- Contrôler les conditions thermo aérauliques
- Modéliser les phénomènes




**CIAT** | **CSTB**  
le futur en construction

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BÂTIMENT | MARNE-LA-VALLÉE | PARIS | GRENOBLE | NANTES | SOPHIA-ANTIPOLIS



> RECHERCHE

### Asteria, des tests simulant la réalité pour différents scénarios de décontamination



**Objectifs**

- Déterminer l'efficacité globale des systèmes
- Connaître l'exposition d'un individu

**Modèles microbiologiques**

- Moisissures
- Bactéries
- Virus

**Étude des contaminants microbiologiques en deux phases**

- Analyse de leur diffusion dans les locaux
- Analyse de leur destruction grâce à :
  - > des systèmes d'épuration d'air
  - > des scénarios de décontamination

**CIAT** | **CSTB**  
le futur en construction

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BÂTIMENT | MARNE-LA-VALLÉE | PARIS | GRENOBLE | NANTES | SOPHIA-ANTIPOLIS

Les produits testés dans cet environnement ont déjà montré leur efficacité en terme de « rendement » épuratoire. L'approche *in situ* permet de simuler une ambiance de bureau selon toutes les configurations de ventilation : naturelle, simple et double flux. Du haut de la plateforme d'ASTERIA, un système de production de bioaérosol est injecté dans les circuits. Il simule la contamination (émissions rhinopharyngées). Dans le bureau récepteur, un mannequin, équipé de capteurs, mime l'exposition des individus aux aérosols.

Les épurateurs sont évalués selon différentes localisations :

- Au sol, au plus proche de l'individu pour privilégier l'impact du système sur l'individu
- Dans une zone morte, définie comme la situation la moins efficace.

## Virus respiratoire UVA (Unité de virologie appliquée)



Etude des moyens de lutte contre la contamination virale de l'air des bâtiments

ÉQUIPEMENTS ET MOYENS

### Virus respiratoires et hygiène des bâtiments

**Recherches**

- Caractérisation des émissions rhinopharyngées (taille, concentration et titre infectieux)
- Étude de la persistance de l'aérosol viral en fonction des facteurs abiotiques de l'environnement : humidité, température, rayonnements, polluants chimiques
- Développer des méthodologies de quantification de l'exposition aux virus respiratoires : application à la bronchiolite
- Mesures in situ de l'exposition des occupants aux virus aéroportés

**Domaines d'application**

- Aide à la gestion microbiologique de l'air des espaces clos (établissements de soins, crèches, écoles, transports...)
- Qualification des dispositifs d'élimination de l'aérosol viral par traitement de l'air :
  - systèmes centralisés,
  - autres concepts innovants.
- Mise en œuvre de ces solutions techniques dans les bâtiments (asservissement, positionnement, aspects énergétiques...)

**Outils disponibles**

Production multiple d'aérosols viraux et banc de caractérisation des émissions rhinopharyngées : système de confinement FL, nébulogé des aérosols 7 nm à 10 µm, culture cellulaire, mesure des virus par PCR...

Unité de Virologie Appliquée (UVA)

**CSTB**  
le futur est construit

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BÂTIMENT | MARNE LA VALLÉE | PARIS | GRENOBLE | NANTES | SOPHIA-ANTIPOLIS

Comment gérer l'environnement pour éviter de contracter des maladies issues des contaminants présents dans l'air ? L'équipement UVA est l'une des réponses apportées par le CSTB. Cet équipement unique en France permet de manipuler des virus respiratoires pathogènes sous forme aéroportée, afin d'étudier la persistance du virus dans l'air en fonction des facteurs de l'environnement (humidité, température, rayonnements, polluants...). Il a pour objectifs de :

- Caractériser les émissions rhinopharyngées (taille, concentration et titre infectieux) pour repérer les plus infectieux : la transmission des infections est principalement interhumaine et peut s'effectuer par contact direct ou par le biais d'aérosols produits par la toux ou les éternuements d'une personne contenant des particules infectieuses. Pour estimer l'exposition des individus, il est important de connaître la taille de ces bioaérosols.
- Mesurer dans l'air les virus à l'origine de maladies respiratoires - comme la bronchiolite du nourrisson - pour évaluer leur résistance en développant des méthodologies de quantification de l'exposition aux virus respiratoires.
- Valider les concepts d'épuration des virus aéroportés grâce à la mise en œuvre d'une évaluation sanitaire de ces systèmes de décontamination de l'air intérieur permettant d'objectiver la pertinence de ces dispositifs sur les virus respiratoires mais également sur les polluants majeurs : moisissures et mycotoxines, bactéries et endotoxines, COV, odeurs, particules, allergènes. Cette évaluation sanitaire comporte également un volet dédié à la vérification de l'innocuité des procédés de décontamination employés.




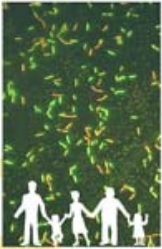
## Légionelles : de l'eau à l'air

Depuis 1997, les équipes de biologistes du CSTB consacrent en partie leurs recherches à une meilleure compréhension des modes de développement et de propagation de la légionelle, notamment dans les bâtiments.

Résistant sans problème à des températures allant jusqu'à 50°C, la légionelle aime l'eau tiède, stagnante de préférence... et devient dangereuse lorsqu'elle est aérosolisée. Les tours aéroréfrigérées et les réseaux d'eau représentent leurs résidences préférées. Les légionelles sont des bactéries fréquentes dans l'environnement. Elles se montrent le plus souvent inoffensives. *Legionella pneumophila* est à l'origine de deux types de maladies observables chez l'homme : la fièvre de Pontiac, bénigne et de guérison spontanée, et la maladie des légionnaires, maladie à déclaration obligatoire pouvant se révéler mortelle. De 20 à 40 % des légionelles nosocomiales sont mortelles, de 10 à 15% des malades décèdent. En 2005, 1 527 cas ont été déclarés en France. Plusieurs facteurs entrent en jeu pour déclarer une maladie : la souche de la bactérie, sa virulence, sa concentration et l'état de santé de la personne contaminée. Les malades immunodéprimés sont particulièrement sensibles.

Conscient de cet enjeu, le CSTB s'est intéressé à son développement dans l'eau et à sa survie dans l'air. Objectif : mieux connaître la *Legionella pneumophila* pour la maîtriser et tester, d'après une méthode fiable et validée, les procédés développés par les industriels.

### Légionellose : de l'eau à l'air

- 1. Prolifération à partir de nombreux réservoirs hydriques**
  - Étude de l'écologie des légionelles dans les circuits d'eau
  - Conception hygiénique des circuits d'eau
  - Étude des procédés de désinfection
- 2. Production d'aérosols de légionelles**
- 3. Transfert, dispersion atmosphérique et persistance du bioaérosol**
  - Étude de la fonction de transfert eau / air
  - Persistance de l'agent biologique en suspension dans l'air avec étude des facteurs biologiques et abiotiques affectant la survie des aérosols de légionelles
  - Modélisation de la dispersion
- 4. Individus exposés aux aérosols de légionelles**
  - Évaluation des efficacités physique et biologique des locallecteurs
  - Mise en place d'outils de mesures de l'exposition et de stratégies d'échantillonnages
  - Recherche des sources d'émission en situation épidémiologique

**CSTB**  
le futur en construction

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT | MARNE-LA-VALLÉE | PARIS | GRENOBLE | NANTES | SOPHIA-ANTIPOLIS



## Persistence de l'aérosol de *Legionella* en laboratoire



Maîtrise pertinente de la qualité microbiologique des espaces clos

EXPERTISE

### Persistence de l'aérosol de *Legionella* en laboratoire

**Objectif :** Connaître la persistance des agents biologiques aérosolisés et les principaux facteurs de l'environnement altérant leur viabilité.

La souche épérotique de *Legionella pneumophila* est particulièrement résistante.

Le schéma de synthèse des phénomènes appliqués dans l'éclosion de la souche de l'aérosol de *L. pneumophila*.

REPRODUCTION

ÉTAPE 1 : ÉTAPE 2 : ÉTAPE 3 : ÉTAPE 4 :

HR T, survie 4

HR T, survie 1

HR T, survie 4

**Résultats scientifiques :**

- Maîtrise de la production et de la conservation des aérosols biologiques pathogènes (Zone PB).
- Étude de la fonction de transfert eau/air.
- Persistance des agents biologiques aéroportés en fonction des facteurs biotiques et abiotiques de l'environnement et intégration de cette fonction dans les modèles de dispersion atmosphérique.

**CSTB**  
le futur en construction

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BÂTIMENT | MARS-LA-VALLÉE | PARIS | BRENOBE | NANTES | SOPHIA-ANTIPOLIS

Les recherches menées en laboratoire sur la *Legionella* visent à caractériser la dispersion des légionelles dans l'air. Cela implique la prise en compte des critères de survie des agents pathogènes dans l'air pour expliquer la dissémination des germes sur de vastes périmètres.

L'air étant le vecteur exclusif de transmission de la légionelle chez l'homme, l'étude de la dispersion de la bactérie fait partie de programmes de recherche menés par le CSTB. Objectif : trouver le moyen de mesurer la concentration de l'agent pathogène dans les aérosols, afin de posséder une vision bien plus réaliste et bien plus fiable de l'exposition au risque encouru que celle obtenue par la simple détermination de la présence du germe dans les réservoirs hydriques. Un biocollecteur a été mis au point. Il permet de prélever *in situ* de gros volumes d'air et de calculer des mesures plus représentatives que celles issues des protocoles classiques. Les données issues de cette approche expérimentale peuvent être intégrées dans des modélisations de dispersion atmosphérique des légionelles, en tenant compte des principaux facteurs de létalité bactérienne : l'étape d'aérosolisation et l'exposition de l'aérosol aux différents facteurs de l'environnement. Sans oublier que certains autres paramètres, tels que l'âge et le type de souche de *Legionella pneumophila* influent également sur la survie de la bactérie.



Un outil de validation original des biocollecteurs

ÉQUIPEMENTS ET MOYENS

### L'aérobiotest, pour qualifier des dispositifs de mesure des bioaérosols

**Constat :** Aucune information pertinente sur l'efficacité des dispositifs commercialisés.  
**Objectif :** Valider des outils d'alerte biologique ou d'étude de l'exposition aux aérosols microbiologiques.

1 Zone amont d'injection des aérosols biologiques

2 Zone intermédiaire d'homogénéisation

3 Zone aval destinée à l'évaluation des dispositifs de biocollecteur

Votre d'essai en double sera réalisé avec des souches de *Serratia marcescens* et *Candida albicans* (F1) avec 2 biocollecteurs (type F1) et 1-SP14.

Performances évaluées : la stabilité de l'écoulement, la charge de volume et de turbulence caractéristiques.

**CSTB**  
le futur en construction

CENTRE RECHERCHES ET TECHNIQUE DU BÂTIMENT | MAINE-ET-LOIRE | PARIS | GRENOBLE | NANTES | SOPHIA-ANTIPOLIS

Légionelloses, méningites, infections, allergies et toxi-infections liées aux moisissures...posent de manière aiguë la question de la dissémination des micro-organismes dans les locaux.

Pour appréhender les effets sanitaires des microorganismes aéroportés chez les travailleurs ou le public, il est important d'évaluer la concentration et la composition de l'aérosol en microorganismes. Il existe de nombreux dispositifs commercialisés dans ce but mais la connaissance de leur efficacité est très incomplète. C'est pourquoi le CSTB a développé l'aérobiotest. Avec un objectif : valider des outils d'alerte biologique ou d'étude de l'exposition aux aérosols microbiologiques.

La définition des critères de performances biologiques des biocollecteurs et la standardisation de protocoles d'essais sont nécessaires pour harmoniser les méthodes d'étude des bioaérosols et améliorer les comparaisons entre études. L'efficacité biologique d'un échantillonneur peut être définie comme la capacité de ce dernier à préserver la viabilité des microorganismes qu'il collecte. L'utilisation d'aérosols expérimentaux est une approche de plus en plus privilégiée dans la littérature. Elle consiste à générer un aérosol dans le but d'évaluer les performances des appareils dans des conditions les plus stables et homogènes possibles.

## Laboratoire mobile de microbiologie

Une unité mobile autonome pour collecter et analyser sur site les légionelles aéroportées

» EQUIPEMENTS et MOYENS

### Laboratoire mobile de microbiologie

**Sites investigués**

- » Installations industrielles : tours aéro-réfrigérantes, lagunages aérés...
- » Espaces clos : crèches, écoles, bureaux, établissement de soins...

**Principales missions**

- » Recherche et qualification des sources d'émissions avec possibilité d'étude de la dispersion des aérosols microbiologiques
- » Évaluation de l'exposition des personnes aux aérosols microbiologiques

**Moyens d'analyse**

- 2 modes d'analyse microbiologiques permettant l'obtention des micro-organismes cultivables avec mise en culture et incubation des prélèvements directement dans l'unité mobile
- Prélèvement des échantillons avant analyse, congélation possible des échantillons
- Recherche d'agents microbiologiques spécifiques par méthodes moléculaires : PCR, FISH, microscopie et système d'analyse d'images embarqué

**Une unité de collecte autonome**

- Laboratoire autonome (eau, gaz, électricité)
- Station météo embarquée avec localisation par GPS
- Dispositifs de collecte adaptés à l'extérieur (1 m<sup>3</sup>/min)
- 10 capteurs individuels
- Caractérisation dynamique des aérosols (bulle, concentration)

**CSTB**  
le futur est construction

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BÂTIMENT | MARNE-LA-VALLÉE | PARIS | GRENOBLE | NANTES | SOPHIA-ANTIPOLIS

Un camion laboratoire doté de tous les instruments de mesure est prêt à intervenir sur site à la moindre alerte de légionellose. L'équipe de microbiologistes se déplace à la demande des DDASS, des DRIRE ou des entreprises potentiellement impliquées dans une épidémie de légionelle. Un service encore unique en France.

Cette nouvelle métrologie permet de détecter les légionelles par un échantillonnage de grand volume, directement dans le milieu aérien, ce qui apporte une information plus proche du mode de contamination de l'homme qui respire cette bactérie. Les prélèvements sont analysés au laboratoire. La technique employée permet de délivrer les résultats plus rapidement que par la méthode conventionnelle.