

RAPPORT D'ÉTUDE

09/11/2010

N°DRC-10-90663-08255A

**Etude de la dynamique de persistance des
légionelles aérosolisées lors de leur dispersion
atmosphérique : approche expérimentale et
numérique**

INERIS

maîtriser le risque |
pour un développement durable |

**ETUDE DE LA DYNAMIQUE DE PERSISTANCE DES LEGIONELLES
AEROSOLISEES LORS DE LEUR DISPERSION ATMOSPHERIQUE : APPROCHE
EXPERIMENTALE ET NUMERIQUE.**

Verneuil-en-Halatte, Oise

Convention n°EST-2007-53/ROUIL

Programme Environnement-Santé-Travail-APR 2007

Client : AFSSET

Liste des personnes ayant participé à l'étude :

Thi Lan HA (CSTB), Enric ROBINE (CSTB), Sébastien RITOUX (CSTB), Christelle OLLIVIER (CSTB), Yannick MOREL (DGA), Cyrille TURMEAU (DGA), Florence DESCHAMPS (DGA), Laurence ROUIL (INERIS), Frédéric TOGNET (INERIS), Eric TARNAUD (INERIS)

PRÉAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

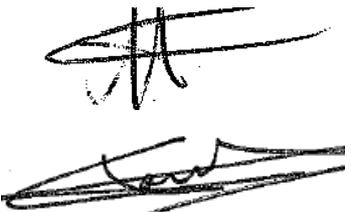
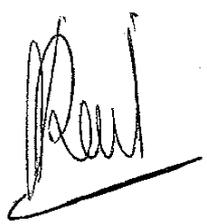
| | Rédaction | Vérification | Approbation |
|----------------|--|--|---|
| NOM | Eric TARNAUD Frédéric TOGNET | Bertrand BESSAGNET | Laurence ROUIL |
| Qualité | Ingénieur de l'unité TPPD Ingénieur de l'unité MOCA Direction des Risques Chroniques | Responsable de l'unité MOCA Direction des Risques Chroniques | Responsable du pôle DECI Direction des Risques Chroniques |
| Visa |  |  |  |

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|-----------|
| 1. RESUME | 11 |
| 2. CONTEXTE ET OBJET DE L'ETUDE | 12 |
| 3. DESCRIPTION ET CHOIX DES MODELES | 14 |
| 3.1 Description des modèles existants. | 14 |
| 3.2 Modèles testés par l'INERIS..... | 15 |
| 3.2.1 Généralités sur les modèles gaussiens : | 15 |
| 3.2.2 Généralités sur les modèles lagrangiens : | 15 |
| 3.2.3 Le modèle ADMS3..... | 16 |
| 3.2.4 Le modèle MSS | 16 |
| 3.2.5 Historique..... | 16 |
| 4. PRESENTATION DE L'APPROCHE EXPERIMENTALE | 18 |
| 4.1 Choix du modèle biologique. | 18 |
| 4.2 Simulation du terme source..... | 19 |
| 4.3 Collecte des aérosols bactériens..... | 20 |
| 4.3.1 Les impacteurs sur gélose | 20 |
| 4.3.2 Les impacteurs liquides | 21 |
| 4.4 Analyse des prélèvements | 22 |
| 5. RESULTATS DE LA CAMPAGNE DE DISPERSION DE JUIN 2009 | 23 |
| 5.1 Stratégie d'échantillonnage | 23 |
| 5.1.1 Instrumentation | 25 |
| 5.2 Procédure opératoire..... | 28 |
| 5.3 Approche numérique pour la modélisation des dispersion C, D et E avec le modèle MSS..... | 30 |
| 5.3.1 Module de dispersion de microorganismes : description des méthodologies de modélisation développées. | 30 |
| 5.3.2 Hypothèses retenues pour la modélisation avec le modèle lagrangien MSS..... | 30 |
| 5.4 Caractérisation expérimentale des aérosols bactériens produits lors de la dispersion..... | 31 |
| 5.4.1 Mesure de la concentration bactérienne aéroportée..... | 31 |
| 5.4.2 Comparaison des concentrations moyennes Mesures / Modèle..... | 32 |
| 5.4.3 Comparaison des concentrations maximales Modélisation / Mesure à 100 et 200 m..... | 34 |
| 5.4.4 Calcul des ratios de concentration Modèle / Mesure pour chaque type de collecteur | 36 |
| 5.5 Détermination de la granulométrie des spores aérosolisées..... | 37 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 5.6 | Suivi spatio-temporel de la concentration bactérienne aéroportée | 39 |
| 5.6.1 | Analyse des résultats..... | 40 |
| 6. | MODELISATION DU TRANSFERT ET DE LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE DES AEROSOLS BIOLOGIQUES EMIS PAR LA TAR. | 41 |
| 6.1 | Caractérisation expérimentale du terme source | 41 |
| 6.1.1 | Granulométrie des gouttelettes | 41 |
| 6.1.2 | Dispersion de BG à partir d'une TAR tertiaire | 45 |
| 6.2 | Implémentation d'un module biologique sur la modélisation de la dispersion | 46 |
| 7. | CONCLUSION | 49 |
| 8. | REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... | 51 |
| 9. | LISTE DES ANNEXES | 53 |

TABLE DES ILLUSTRATIONS

| | | |
|-------------|--|----|
| FIGURE 1 : | MOYENNE DES CONCENTRATIONS AU SOL EN AEROSOLS DE 5 μM ISSUS D'UNE TAR LORS DE L'EPISODE DE LENS. SIMULATION SUR 3 SEMAINES DE NOVEMBRE 2003. | 17 |
| FIGURE 2 : | OBSERVATIONS AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE DES CELLULES DE BACILLUS GLOBIGII (FORME SPORULEE). | 18 |
| FIGURE 3 : | OBSERVATION MACROSCOPIQUE DE COLONIES DE B. GLOBIGII SUR MILIEU TCS. | 19 |
| FIGURE 4 : | PHOTOGRAPHIES DU SYSTEME DE DISPERSION..... | 20 |
| FIGURE 5 : | PHOTOGRAPHIE DU SLIT SAMPLER (A GAUCHE) ET DE L'IMPACTEUR ANDERSEN A 6 ETAGES (AU CENTRE)..... | 21 |
| FIGURE 6 : | PHOTOGRAPHIE DU CYCLONE SOPRANO. FIGURE 7 : PHOTOGRAPHIE DU BIOSAMPLER. | 22 |
| FIGURE 8 : | MODELISATION DE LA DISPERSION POUR LE 23 JUIN 2009, CONCENTRATIONS MOYENNEES SUR 3 HEURES. ECHELLE EN NOMBRE D'AEROSOLS/ M^3 POUR UNE SOURCE THEORIQUE..... | 24 |
| FIGURE 9 : | PHOTOGRAPHIE DES SYSTEMES DE COLLECTE POSITIONNES SUR AUX POINTS 1 (50M), 7, 8, 9 (100M) ; 4, 5, 6 (200M) ET 13 (300M). LOCALISATION DU TERME SOURCE. LOCALISATION DES ANEMOMETRES SONIQUES..... | 27 |
| FIGURE 10 : | MAT METEOROLOGIQUE TELESCOPIQUE DE 30 METRES. | 28 |
| FIGURE 11 : | COLLECTEURS AU POINT 5 (200M) ET AU POINT 7 (100M). | 29 |
| FIGURE 12 : | COMPARAISON DES CONCENTRATIONS MOYENNES MESURES / MODELE EN B. GLOBIGII SELON LES POINTS D'ECHANTILLONNAGE POUR LA DISPERSION C. | 33 |
| FIGURE 13 : | COMPARAISON DES CONCENTRATIONS MOYENNES MESURES / MODELE EN B. GLOBIGII SELON LES POINTS D'ECHANTILLONNAGE POUR LA DISPERSION D. | 33 |
| FIGURE 14 : | COMPARAISON DES CONCENTRATIONS MOYENNES MESURES / MODELE EN B. GLOBIGII SELON LES POINTS D'ECHANTILLONNAGE POUR LA DISPERSION E. | 33 |
| FIGURE 15 : | COMPARAISON DES VALEURS MAXIMALES OBTENUES PAR SLIT SAMPLERS COMPAREES AUX VALEURS MAXIMALES OBTENUES PAR MODELISATION. | 35 |
| FIGURE 16 : | RAPPORT DES VALEURS MAXIMALES OBTENUES PAR SLIT SAMPLERS COMPAREES AUX VALEURS MAXIMALES OBTENUES PAR MODELISATION. | 35 |
| FIGURE 17 : | COMPARAISON DES VALEURS MOYENNES MODELE (N) / ECHANTILLONNEUR POUR CHACUNE DES DISPERSIONS..... | 36 |

| | |
|--|----|
| FIGURE 18 : PROFILS GRANULOMETRIQUES DE L'AEROSOL DE B. GLOBIGII, LORS DE LA DISPERSION C. | 37 |
| FIGURE 19 : PROFILS GRANULOMETRIQUES DE L'AEROSOL DE B. GLOBIGII, LORS DE LA DISPERSION E..... | 38 |
| FIGURE 20 : SUIVIS DE LA CONCENTRATION ATMOSPHERIQUE DE B. GLOBIGII DURANT LA DISPERSION C DU 23/06/2009 A 100 M. | 39 |
| FIGURE 21 : SUIVIS DE LA CONCENTRATION ATMOSPHERIQUE DE B. GLOBIGII DURANT LA DISPERSION C A 200 M. | 39 |
| FIGURE 22 : INSTRUMENTATION DE LA TAR A L'AIDE DES GRANULOMETRES LASER ET OPTIQUE..... | 42 |
| FIGURE 23 : PROFILS GRANULOMETRIQUES DES GOUTTELETTES EMISES PAR LA TAR, MESURES A 3 HAUTEURS Z DIFFERENTES PAR RAPPORT A LA SECTION DE SORTIE. | 43 |
| FIGURE 24 : PROFILS GRANULOMETRIQUES EN VOLUME ET NOMBRE DU PANACHE MESURE EN SORTIE DE TAR A Z = 94 CM (GRANULOMETRE LASER). | 44 |
| FIGURE 25 : PROFILS GRANULOMETRIQUES EN NOMBRE DETERMINES PAR GRANULOMETRE OPTIQUE..... | 44 |
| FIGURE 26 : PROFILS GRANULOMETRIQUES EN NOMBRE EN PRESENCE ET ABSENCE DE PARE-GOUTTELETTES (GRANULOMETRE OPTIQUE). | 45 |
| FIGURE 27 : DISPOSITIF D'ECHANTILLONNAGE DE LA DISPERSION DE BG A PARTIR DE LA TAR. | 45 |
| FIGURE 28: POURCENTAGE DE LEGIONELLES CULTIVABLES AUX POINTS 100, 200, 300 ET 400 M. | 47 |
| FIGURE 29 : POURCENTAGE DE LEGIONELLES CULTIVABLES AUX POINTS 100, 200, 300 ET 400 M. | 47 |
| | |
| TABLEAU 1 : SYNTHESE DES CONDITIONS OPERATOIRES DES DISPERSIONS REALISEES LE 23/06/2009. | 29 |
| TABLEAU 2 : REPARTITION DES SYSTEMES DE COLLECTE DEPLOYES DURANT LES ESSAIS. ... | 29 |
| TABLEAU 3: RESULTATS CONCERNANT LA DISPERSION DE SPORES DE BG A PARTIR DE LA TAR. | 46 |

TABLE DES ANNEXES

| | |
|---|----|
| ANNEXE 1 : RECAPITULATIF DES DONNEES OBTENUES LORS DES DISPERSIONS C, D ET E EN JUIN 2009..... | 55 |
| ANNEXE 2 : COMPARAISON DES CONCENTRATIONS MOYENNE MESURE/MODELE POUR LES DISPERSIONS D..... | 57 |
| ANNEXE 3 : SUIVIS DE LA CONCENTRATION ATMOSPHERIQUE DE B. GLOBIGII DURANT LA DISPERSION D ET E..... | 65 |
| ANNEXE 4 : DONNEES CONSTRUCTEUR DE LA TAR..... | 67 |
| ANNEXE 5 : MESURE DE LA GRANULOMETRIE EN SORTIE DE TAR..... | 69 |
| ANNEXE 6 : DONNEES DE SURVIE DES LEGIONELLES AEROSOLISEES..... | 73 |

NOTICE

TITRE : ETUDE DE LA DYNAMIQUE DE PERSISTANCE DES LEGIONELLES AEROSOLISES LORS DE LEUR DISPERSION ATMOSPHERIQUE : APPROCHE EXPERIMENTALE ET NUMERIQUE.

CONTRAT : Programme Environnement-Santé-Travail-APR 2007
Convention entre :
L'institut National de l'Environnement Industriel et des Risques
et
L'Agence Française de Sécurité Sanitaire de L'Environnement et du Travail

AUTEURS : Laurence ROUIL* (INERIS)
Thi Lan HA (CSTB)
Frédéric TOGNET (INERIS)
Enric ROBINE (CSTB)
Cyrille TURMEAU (DGA)
Eric TARNAUD (INERIS)

*Responsable projet

Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques

Pôle DECI

Parc Technologique Alata BP2 F-60550 Verneuil en Halatte

Tél. : 03.44.55.61.13 ; Fax : 03.44.55.68.99 ; mail : laurence.rouil@ineris.fr

1. RESUME

Le projet de recherche proposé dans le cadre de ce programme Environnement – Santé – Travail a pour objectif d'améliorer la gestion des crises sanitaires associées aux légionelles, en développant une stratégie de recherche de l'aérosol bactérien, selon une double approche numérique et expérimentale. La démarche consiste notamment à améliorer la connaissance de la dynamique des légionelles diffusées par les TAR, en fiabilisant les modèles existants, avec l'implémentation de nouvelles paramétrisations décrivant au mieux les processus physiques et biologiques régissant la dispersion des microorganismes et des constituants en eau d'un panache.

Dans le cadre de cette étude une campagne préliminaire de dispersion a été réalisée du 25 au 29 août 2008 permettant de confirmer la faisabilité du projet. Les premiers résultats obtenus à partir des données expérimentales seules ont permis de montrer que la dispersion de microorganismes s'avère propre au terme source considéré, en termes de granulométrie des aérosols¹ produits (rapport intermédiaire N° DRC-08-90663-16134A du 17/11/2008). Cette première étude a également permis d'assurer une première évaluation des modèles de dispersion et de tester la métrologie déployée. Les premières simulations réalisées avec le modèle ADMS ont montré que l'approche par modélisation était pertinente pour identifier les zones d'impact du panache émis par la source.

Une deuxième campagne de dispersion a été effectuée en juin 2009 à partir du brumisateur, système de dispersion proche de celui d'une tour aéroréfrigérante (TAR). Une simulation avec le modèle Micro Swift Spray (MSS) permettant de prendre en compte de manière réaliste l'aspect humide du panache et l'écoulement autour de bâti a été menée. Cette nouvelle campagne a permis :

- la comparaison des concentrations mesurées aux concentrations modélisées
- de caractériser les émissions générées par une tour aéroréfrigérante (TAR) « théorique »

Les mesures de terrain ont permis de montrer que les valeurs obtenues par modélisation étaient pertinentes.

La simulation de la dispersion atmosphérique de légionelles à partir d'une tour aéroréfrigérante « virtuelle » a également été réalisée en intégrant un module biologique au modèle de dispersion. Ces simulations ont pu être menées à partir des données acquises lors des dispersions de juin 2009 (données météorologiques collectées lors des campagnes de dispersions de *Bacillus Globigii*, caractérisation de la TAR en terme de granulométrie des aérosols, identification des débits en sortie de tour). Les résultats obtenus ont montré que la cultivabilité ainsi que la concentration en légionelles dans l'atmosphère diminuent de façon importante à 400 m de la source (chute à 40% de la cultivabilité).

¹ Le mot aérosol (Renoux et Boulaud, 2005) "désigne la suspension, dans un milieu gazeux, de particules liquides, solides ou les deux, présentant une vitesse limite de chute négligeable (inférieure ou égale à 25 cm/s). En toute rigueur, l'aérosol est un système diphasique formé par des particules et le gaz porteur. Mais dans beaucoup d'ouvrages scientifiques, « aérosol » est souvent synonyme de « particule ». La plupart du temps, l'aérosol est polydispersé, c'est-à-dire qu'il présente des particules de tailles très différentes, allant de quelques nanomètres à plusieurs dizaines de microns.

2. CONTEXTE ET OBJET DE L'ETUDE

Les épisodes de légionelloses survenues au cours de ces dernières années ont montré l'importance des tours aéroréfrigérantes (TAR) en tant que sources d'épidémies. Récemment encore, en septembre 2008, elles ont fait l'objet de suspicion suite à l'apparition de cas groupés de contamination à Paris. Malgré le périmètre d'investigation élargi à quarante et un sites aéroréfrigérants, l'origine de la contamination n'a pas été identifiée. Les moyens dont nous disposons aujourd'hui pour estimer la diffusion des légionelles émises par les TAR, ainsi que pour en évaluer l'impact sont limités, expliquant probablement la difficulté de relier des cas d'infection et des sources, même ciblées.

La dispersion des panaches émis par ces installations aérauliques est essentiellement appréhendée par l'approche numérique. Dans de nombreux cas leur description repose sur l'utilisation de modèles « locaux » ou gaussiens qui considèrent les dispersions localisées autour d'un site d'émission bien défini. L'estimation des concentrations atmosphériques par ces modèles s'avère généralement approximative, en raison de représentations très simplifiées des processus impliqués dans l'évolution des panaches. Leurs limites majeures résident dans leur difficulté à intégrer les paramètres relatifs à la topographie de l'environnement ambiant ainsi que les contraintes corrélées à la microphysique du panache. Les modèles lagrangiens ou eulériens permettent une représentation plus juste de la source et des conditions de dispersion de panache, notamment par la prise en compte de l'évolution des composantes gazeuses, aqueuses et solides à l'intérieur même du panache. L'application opérationnelle de ces outils, qui suppose des temps de calcul limités, nécessite néanmoins une optimisation préalable par la simplification des hypothèses météorologiques, tout en conservant les paramétrisations spécifiques aux obstacles et à la microphysique. Le terme source constitue aussi un élément clé dont la connaissance doit être améliorée, notamment par l'acquisition de données consistantes sur la nature et les caractéristiques des émissions produites. Par ailleurs, concernant l'émission de microorganismes, bien que certains modèles complètent leurs données paramétriques par l'introduction d'un module biologique (Peterson and Lighthart, 1977), leur validité souffre du manque de données sur la persistance des agents aéroportés. La problématique « Légionelle » est particulièrement concernée par ce champ d'investigation à approfondir.

Le projet de recherche proposé dans le cadre de ce programme Environnement – Santé – Travail a pour objectif d'améliorer la gestion des crises sanitaires associées aux légionelles, en développant une stratégie de recherche de l'aérosol bactérien, selon une double approche numérique et expérimentale. La démarche consiste notamment à améliorer la connaissance de la dynamique des légionelles diffusées par les TAR, en fiabilisant les modèles existants, avec l'implémentation de nouvelles paramétrisations décrivant au mieux les processus physiques et biologiques régissant la dispersion des microorganismes et des constituants en eau d'un panache.

Dans cette perspective, ce travail propose de traiter des points suivants :

- La caractérisation du terme source et des émissions produites au niveau d'une installation pilote simulant la diffusion atmosphérique d'aérosols biologiques.

- L'évaluation de la dispersion atmosphérique des microorganismes en couplant données prédictives de simulation numérique et mesures expérimentales sur site, en intégrant une information biologique aux modèles de dispersion.

Afin d'appréhender les processus de contamination atmosphérique des zones impactées par un panache contenant potentiellement des légionelles, la démarche a été la suivante :

- 1) Deux modèles de dispersion atmosphérique ont été mis en œuvre pour simuler la dispersion de microorganismes à partir de plusieurs points localisés sur le site du CSTB choisi comme site expérimental. Il s'agit des modèles ADMS² (modèle gaussien avec l'hypothèse prise que les aérosols potentiellement contaminés sont assimilés à des particules d'un diamètre donné) et MSS³ (modèle capable de prendre en compte l'interaction des gouttelettes entre elles afin d'évaluer la pertinence d'une modélisation fine du transport des gouttelettes et des microorganismes). Le choix de ces modèles a été effectué après une consultation de l'ensemble des modèles disponibles et des publications de validation correspondantes. Les résultats de simulations ont été comparés aux mesures et pour étudier la variabilité et le biais pour chacun des modèles.
- 2) Afin d'améliorer la qualité des modèles, les données prédictives sont confrontées à des mesures *in situ*. Ces mesures consistent à caractériser, à l'aide d'un germe traceur, l'émission de microorganismes proche de celle d'une TAR tertiaire. La comparaison des résultats obtenus par ces outils numériques avec les expérimentations terrains, permettra d'optimiser le volet métrologique et d'appréhender de manière plus performante la stratégie d'échantillonnage.
- 3) Un modèle de survie biologique des microorganismes, développé à partir de travaux du CSTB, a été associé au modèle MSS. Il permet d'intégrer l'effet des variables météorologiques qui régissent la survie des microorganismes. Ce couplage apporte une indication supplémentaire sur la dispersion des légionelles, notamment une projection de la distance à laquelle pourraient encore être isolées des bactéries « vivantes ». Ceci constitue un premier essai de couplage entre ces deux types de modèles (survie biologique et dispersion atmosphérique). Les résultats de simulations ont été comparés avec ceux de la théorie et ceux de la campagne de mesure permettant ainsi une première évaluation de modèles biodispersifs.

Le présent rapport s'articule de la façon suivante :

- le chapitre - décrit l'argumentation pour le choix des modèles de dispersion
- le chapitre 4 présente l'approche expérimentale
- le chapitre 5 présente les résultats de la campagne de dispersion de juin 2009
- le chapitre 6 présente la caractérisation du transfert des microorganismes d'une TAR vers l'atmosphère ainsi que la modélisation de la dispersion de légionelles à partir de cette TAR.

² Modèle développé par le CERC (Cambridge Environmental Research Consultants - www.cerc.co.uk) et commercialisé en France par la société NUMTECH (www.numtech.fr).

³ MSS : Micro Swift Spray modèle commercialisé par ARIA Technologies

3. DESCRIPTION ET CHOIX DES MODELES

Les travaux sur la modélisation de la dispersion des panaches humides et des microorganismes a été initiée à l'INERIS dans le cadre d'un programme d'appui et d'expertise réalisé pour le compte du Ministère en charge de l'Ecologie.

L'intérêt émergeant pour cette problématique fit suite à l'épidémie de légionellose de Lens en 2003 qui avait fait 86 victimes dont 18 morts survenus entre le 05/11/03 et le 22/01/04 sur une zone de 12 km autour du site émetteur. L'INERIS avait alors été saisi pour modéliser la dispersion d'un panache en eau potentiellement contaminée autour du site. Ces premières simulations avaient permis de révéler le manque de connaissance sur les hypothèses à retenir pour modéliser au mieux les panaches humides et le transport atmosphérique de microorganismes.

Suite au développement de cette thématique, deux axes de progrès ont été identifiés :

- l'amélioration des modèles existants avec l'implémentation de nouvelles paramétrisations décrivant au mieux les processus physiques et biologiques régissant la dispersion des microorganismes et des constituants en eau d'un panache : Le modèle idéal doit permettre une mise en œuvre rapide en temps de crise et atteindre un niveau avancé dans la description de la physique des phénomènes mis en jeu.
- L'évaluation des modèles avec la comparaison des résultats de simulation aux mesures effectuées sur le terrain (campagne de mesures).

3.1 DESCRIPTION DES MODELES EXISTANTS.

Il existe différents niveaux de précision pour la modélisation du transport de microorganismes que l'on peut classer comme suit :

Modélisation basique : Modèle basique⁴ (de type gaussien dans la plupart des cas) avec l'hypothèse que les aérosols potentiellement contaminés sont assimilés à des particules d'un diamètre donné. Dans le cas du transport atmosphérique de microorganismes, la taille de 5 µm est souvent sélectionnée (tailles des pores des dévésiculeurs des TAR). Cette approche avait été utilisée par l'INERIS durant la crise NOROXO en 2003-2004. Les limites de la méthode sont les limites connues liées à l'usage de modèles gaussiens : terrain peu accidenté, peu d'obstacles, pas de traitement satisfaisant des situations de vents faibles, incertitudes fortes à proximité de la source. Il faut également noter la non prise en compte des effets d'évaporation, ce qui aura pour effet de modifier les distances d'impact, ni des effets de coagulation se produisant généralement à l'éjection du panache. Leur intérêt est limité à l'évaluation d'une distance d'impact des retombées et à l'évaluation qualitative des zones géographiques devant être les plus touchées, sans prise en compte de l'écologie des microorganismes.

⁴ L'approche est alors similaire à ce qui se fait généralement dans les études d'impact de polluants classiques

Modélisation évoluée : Modèle équipé d'un module simple de microphysique. Le panache est modélisé sous la forme de deux quantités (eau liquide et eau gazeuse) qui interagissent entre elles avec prise en compte du changement de phases. L'interaction des gouttelettes entre elles n'est pas prise en compte. Cette approche permet une meilleure simulation de la physique du caractère diphasique du panache humide sans pour autant dépasser les limites identifiées pour la modélisation basique évoquée ci dessus.

Modélisation avancée : Modèle 3D dans lequel les interactions entre les gouttelettes issues de la source et l'atmosphère sont modélisées par les équations de la physique (coagulation, accréation, évaporation, condensation, etc...). Il s'agit certainement de l'approche la plus satisfaisante scientifiquement, mais elle ne permet pas de régler les questions relatives à l'écologie des microorganismes, et sa mise en œuvre peut nécessiter un temps de calcul relativement long.

3.2 MODELES TESTES PAR L'INERIS

Deux modèles de dispersion sont mis en œuvre dans le cadre de cette étude :

- Le modèle gaussien ADMS
- Le modèle lagrangien MSS

3.2.1 GENERALITES SUR LES MODELES GAUSSIENS :

Les modèles gaussiens sont les plus utilisés. La méthode gaussienne propose une solution analytique qui vérifie les équations de transport de manière approchée : les équations de transport ne sont pas résolues. Cette solution est basée sur la construction d'une formule mathématique, validée par des mesures in-situ (dans l'atmosphère). Le modèle gaussien est très utilisé car le calcul est direct. Les limitations de cette méthode apparaissent assez vite avec la complexité des situations (complexité du terrain, météorologie..). La validité de ce modèle n'est vérifiée que pour des situations que l'on peut qualifier de cas simples (sol plat ou peu accidenté, profil de vent constant ou bien connu).

Cependant les modèles gaussiens dits de seconde génération permettent une prise en compte plus fine de la météorologie grâce au développement de préprocesseurs météorologiques adaptés. Ils ont également acquis une meilleure représentation de l'écoulement du vent et donc de la dispersion pour les terrains à topographie variable, ceci avec l'intégration d'un module simplifié de calcul des écoulements atmosphérique à proximité du sol, enfin ils proposent un module de prise en compte des obstacles (bâti). Les temps de calcul pour une situation météorologique et un polluant donnés sont de l'ordre de la seconde.

3.2.2 GENERALITES SUR LES MODELES LAGRANGIENS :

Un modèle de dispersion lagrangien reproduit mathématiquement le déplacement dans l'atmosphère de volumes élémentaires (également appelés particules) du panache. Le déplacement lié à l'advection de ces particules est calculé grâce à la connaissance des champs de vents atmosphériques, leur déplacement diffusif étant

une fonction statistique liée à la turbulence du milieu. Le modèle lagrangien détermine les concentrations de polluants en compilant l'ensemble des trajectoires d'un grand nombre de particules du panache. L'utilisation des modèles lagrangiens est limitée par la connaissance difficile de la fonction statistique pour chacune des particules. Ce type de modèle permet en revanche une meilleure représentation de la physique du transport de polluant dans l'atmosphère que celle donnée par les modèles gaussiens. Leur utilisation requiert cependant davantage de temps de calcul pour chacune des situations météorologiques simulées.

3.2.3 LE MODELE ADMS3

L'INERIS dispose du modèle ADMS3, développé par le CERC (Cambridge Environmental Research Consultants - www.cerc.co.uk) et commercialisé en France par la société NUMTECH (www.numtech.fr). Il s'agit d'un modèle gaussien qui met en œuvre un préprocesseur météorologique capable de décrire de manière continue l'état de stratification de l'atmosphère, en opposition aux modèles gaussiens classiques utilisant une représentation discrète sous forme de classes de stabilité atmosphérique (classes de Pasquill). Le module de trajectoire du modèle ADMS permet le calcul de la trajectoire de la ligne moyenne du panache ainsi que la diffusion du panache à proximité de l'émission.

3.2.4 LE MODELE MSS

L'INERIS développe en partenariat avec ARIA technologies un module de transport des constituants en eau pour le modèle 3d lagrangien MSS (Micro Swift Spray) commercialisé par ARIA Technologies. Les modèles de type lagrangien ont la propriété de présenter un plus faible temps de calcul que les modèles de type eulérien. Ces modèles conservent une bonne représentation des phénomènes prépondérants au sens de la dispersion atmosphérique, ce qui a l'avantage de rendre possible la réalisation d'un grand nombre de simulations. Le module obstacle récemment développé dans MSS permet d'augmenter la précision des résultats dans le champ proche et en milieu urbain. MSS permet donc une modélisation avancée.

3.2.5 HISTORIQUE

Les premières simulations d'un épisode de contamination ont été effectuées en 2003 avec le modèle ADMS (Figure 1). L'hypothèse restrictive consistait à assimiler les aérosols de légionelles à des particules passives de 5 μ m de diamètre ayant la masse volumique de l'eau. Cette simulation ne prenait donc pas en compte l'aspect humide du panache, c'est à dire les constituants en eau rejetés par la source : en particulier les gouttelettes d'eau de différents diamètres entourant les légionelles ainsi que les changements de phases entre vapeur d'eau et eau liquide.

Les résultats ont montré que ces aérosols de 5 μ m assimilés à des gouttelettes d'eau potentiellement contaminées pouvaient impacter des zones s'étendant à 15km de la source.

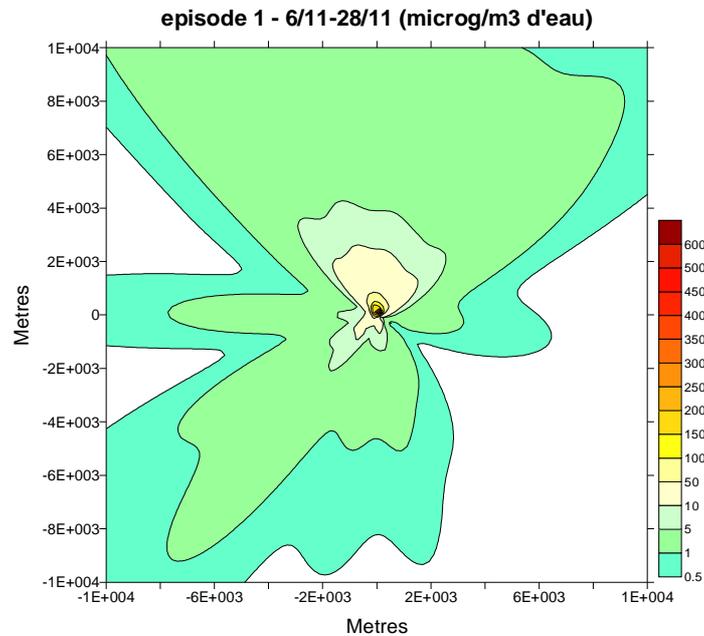


Figure 1 : Moyenne des concentrations au sol en aérosols de 5 µm issus d'une TAR lors de l'épisode de Lens. Simulation sur 3 semaines de Novembre 2003.

Dans le cadre du présent projet, l'utilisation d'un modèle lagrangien à particules (MSS) constitue une avancée pour la prise en compte des différents constituants en eau de l'atmosphère et des changements de phases associés.

Les informations, issues des simulations avec ces deux modèles, bien que différentes sont complémentaires :

- Le modèle ADMS est rapide à mettre en œuvre et permet notamment de simuler les distances d'impact maximales des aérosols passifs de 5µm issus d'une TAR (morceaux de biofilms, vésicules, microorganismes libres...), sans prendre en compte les processus d'évaporation de l'eau liquide.
- Le modèle MSS permet de décrire le transport des constituants en eaux rejetés par une TAR notamment de la phase liquide potentiellement contaminée par les microorganismes. Dans le cas présenté, Il permet de montrer que seuls des microorganismes "secs" ont pu être transportés dans l'atmosphère sur plusieurs kilomètres.

4. PRESENTATION DE L'APPROCHE EXPERIMENTALE

Afin d'améliorer la qualité des modèles, les données prédictives sont confrontées à des mesures *in situ*. Ces mesures consistent à caractériser, à l'aide d'un germe traceur, l'émission de microorganismes proche de celle d'une TAR tertiaire. La comparaison des résultats obtenus par ces outils numériques avec les expérimentations terrains, permettra d'optimiser le volet métrologique et d'appréhender de manière plus performante la stratégie d'échantillonnage.

4.1 CHOIX DU MODELE BIOLOGIQUE.

Le modèle biologique retenu pour la campagne est un microorganisme non pathogène. Il s'agit de *Bacillus atrophaeus* sous forme sporulée, communément dénommé *B. globigii* ou BG. Les spores de cette bactérie, couramment utilisés dans le domaine de la recherche militaire, mesurent approximativement de 0,6 à 0,7 μm de large et de 1,3 à 1,4 μm de long (Figure 2), ce domaine de taille étant comparable à celui des *Legionella*. L'aérosol formé à partir de ces spores est généralement attendu à 1,4 μm ($\pm 10\%$), en diamètre aérodynamique.

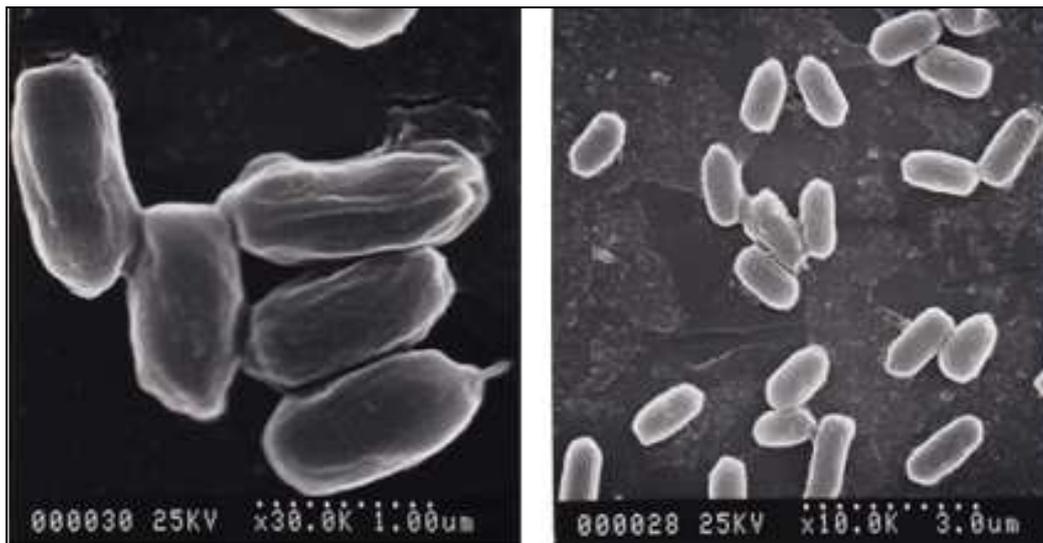


Figure 2 : Observations au microscope électronique à balayage des cellules de *Bacillus globigii* (forme sporulée).

Du fait de leur résistance, ces spores constituent de bons traceurs. En outre, leur détection par méthode culturale est rapide, moins de 24 heures à 37°C (limite le développement de microorganismes présents dans l'air), et les colonies cultivées se distinguent aisément par une pigmentation orangée spécifique (Figure 3).

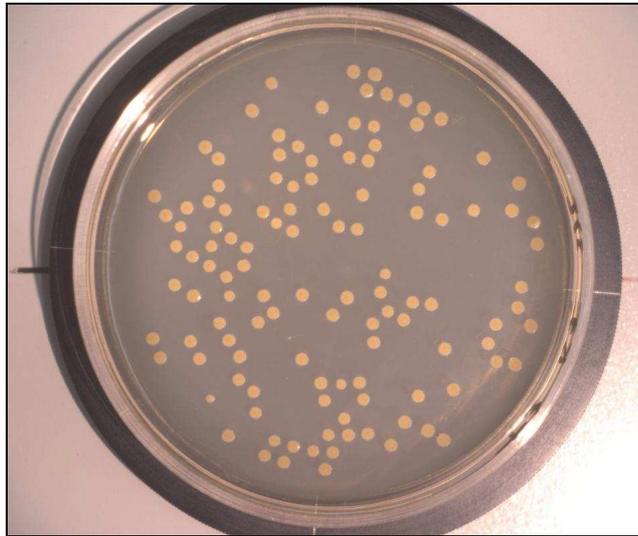


Figure 3 : Observation macroscopique de colonies de *B. globigii* sur milieu TCS.

4.2 SIMULATION DU TERME SOURCE

Après une campagne préliminaire en 2008, ayant permis d'appréhender la faisabilité des dispersions à partir de sources d'aérosols simplifiées, nous avons ensuite mis au point et déployé un dispositif de dispersion permettant de simuler une configuration émissive proche de celle d'une tour aéroréfrigérante tertiaire (Figure 4).

Caractéristiques du système de dispersion

Ainsi, l'émission de spores de BG est effectuée à environ 3 m du sol, à l'aide de 8 buses haute pression réparties sur un conduit vertical, lui-même monté sur un échafaudage mobile. Ces buses classiquement utilisées dans le domaine de la brumisation d'ambiance permettent de générer des gouttelettes dans un domaine de tailles de 1 à plus de 100 μm (diamètre moyen en volume de 30 μm). Le dispositif est alimenté par un réservoir contenant la suspension en spores de BG sur une durée maximale d'environ 30 minutes.



Figure 4 : Photographies du système de dispersion.

4.3 COLLECTE DES AEROSOLS BACTERIENS

Les prélèvements d'aérosol ont été réalisés à l'aide de plusieurs dispositifs de principe inertiel, reposant à la fois sur une collecte en milieu liquide (cyclone Soprano et BioSampler) et sur milieu gélosé (impacteurs à fente et à 6 étages). Ces dispositifs sont représentés sur les Figures 5, 6 et 7.

4.3.1 LES IMPACTEURS SUR GELOSE

Le *Slit Sampler* STA 203 de *New Brunswick* est un impacteur mono fente dont le débit d'aspiration est de 50 L/min ($\pm 4\%$). La surface de collecte consiste en une boîte de Pétri de 140 mm de diamètre, mise en rotation sous la fente d'impaction, à une vitesse réglable de 1 tr en 2 min à 1 tr en 99 min. Ce dispositif permet d'effectuer des prélèvements séquencés et d'avoir ainsi une vision temporelle de la flore aéroportée. Une tête de prélèvement omnidirectionnelle est montée sur l'appareil pour améliorer la prise d'aspiration.

L'impacteur Andersen à 6 étages (modèle TE-10-800, Tisch Environmental) se compose de six cribles superposés, comportant chacun 400 trous d'accélération. Les diamètres de ces orifices étant décroissants en changeant d'étage, la vitesse des particules augmente à chaque passage de crible, permettant de recueillir les particules de diamètres aérodynamiques les plus élevés sur les premiers niveaux et les plus faibles sur les derniers. La répartition granulométrique des aérosols bactériens est alors fonction des seuils de coupure établis respectivement à 7 ; 4,7 ; 3,3 ; 2,1 ; 1,1 et 0,65 μm pour les étages numérotés de 1 à 6. Le débit d'aspiration est de 28 L/min ($\pm 7\%$), et l'entrée d'air relevée de 65 cm, par l'ajout d'une tête de prélèvement similaire à celle appareillée sur le slit sampler (Figure 5).



Figure 5 : Photographie du slit sampler (à gauche) et de l'impacteur Andersen à 6 étages (au centre).

4.3.2 LES IMPACTEURS LIQUIDES

Le principe du prélèvement cyclonique (Figure 6) consiste à entraîner les particules aspirées dans un vortex, lesquelles selon leur inertie vont ensuite être impactées contre les parois du dispositif. Les particules ainsi impactées sont récupérées par un écoulement d'eau le long de ces parois. Le dispositif utilisé est le modèle Soprano (*Bertin Technologies*) qui fonctionne à un débit d'aspiration de 600 L/min ($\pm 7\%$) et présente une tête de prélèvement omnidirectionnelle. La récupération des aérosols se fait dans un volume liquide de 15 mL d'eau stérile (+ 0,9% de NaCl + 0,005% de Tween 20).

Le BioSampler (SKC Inc. Figure 7) consiste à impacter des particules à la surface du liquide de collecte, en accélérant l'air aspiré au travers de trois orifices critiques. Le débit du préleveur est de 12,5 L/min. Les particules sont recueillies dans un volume final de 20 mL d'eau stérile.



Figure 6 : Photographie du cyclone Soprano. Figure 7 : Photographie du BioSampler.

4.4 ANALYSE DES PRELEVEMENTS

Les prélèvements d'aérosols ont été analysés selon une proportion de spores cultivées. Les spores de BG sont ainsi dénombrées sur gélose trypticase soja (TCS), après une incubation de 16 à 20 heures à 37°C.

Sur les échantillons liquides, les bactéries sont d'abord concentrées sur un filtre, lequel est ensuite transféré sur le milieu nutritif.

Les résultats sont exprimés en unité formant colonie par volume d'air (UFC/m³).

5. RESULTATS DE LA CAMPAGNE DE DISPERSION DE JUIN 2009

5.1 STRATEGIE D'ECHANTILLONNAGE

La stratégie générale consiste à déterminer la zone de dispersion, en procédant à des mesures à l'émission, puis des concentrations atmosphériques en s'éloignant du terme source.

La génération des spores pour chacune des dispersions réalisées durait 25 minutes. Les dispersions effectuées devaient permettre d'obtenir 3 séries de mesures pour des conditions similaires (en termes de météo ou de génération).

Afin de mettre en place le dispositif expérimental et optimiser la position des impacteurs et de la source en fonction des conditions météorologiques, une prévision de la dispersion des aérosols a été réalisée un jour avant la campagne de mesure avec le modèle ADMS, plus simple et rapide à mettre en œuvre du fait de sa paramétrisation gaussienne.

Les prévisions météorologiques sont issues de l'analyse des sorties de plusieurs modèles météorologiques : le modèle GFS, modèle américain à l'échelle spatiale globale et les modèles WRF et MM5, modèles américains à l'échelle spatiale régionale mis en œuvre par l'INERIS. Les paramètres météorologiques prévus par ces modèles tels que la direction et l'intensité du vent, la température, l'humidité et les précipitations ont pu être utilisés en donnée d'entrée du modèle ADMS afin de prévoir la dispersion du panache le 23 juin après midi. Ces simulations ont permis l'installation des systèmes de mesures aux endroits optimums de retombée du panache et ceci plusieurs heures avant la dispersion. La cartographie des concentrations moyennées sur trois heures représentant l'impact du panache au sol est présentée ci-dessous (Figure 8).

Pour ces premières simulations, on a fait l'hypothèse simplifiée que les aérosols étaient de taille unique de 5 μ m de diamètre et qu'aucun changement de phase ne se produisait (Modélisation simplifiée cf. 3.1). Le sol est considéré comme plat et les bâtiments représentés dans le modèle ADMS par des parallélogrammes sont pris en compte dans la dispersion.

**Impact au sol du panache.
Prévision pour le 23 juin 2009 après midi.**

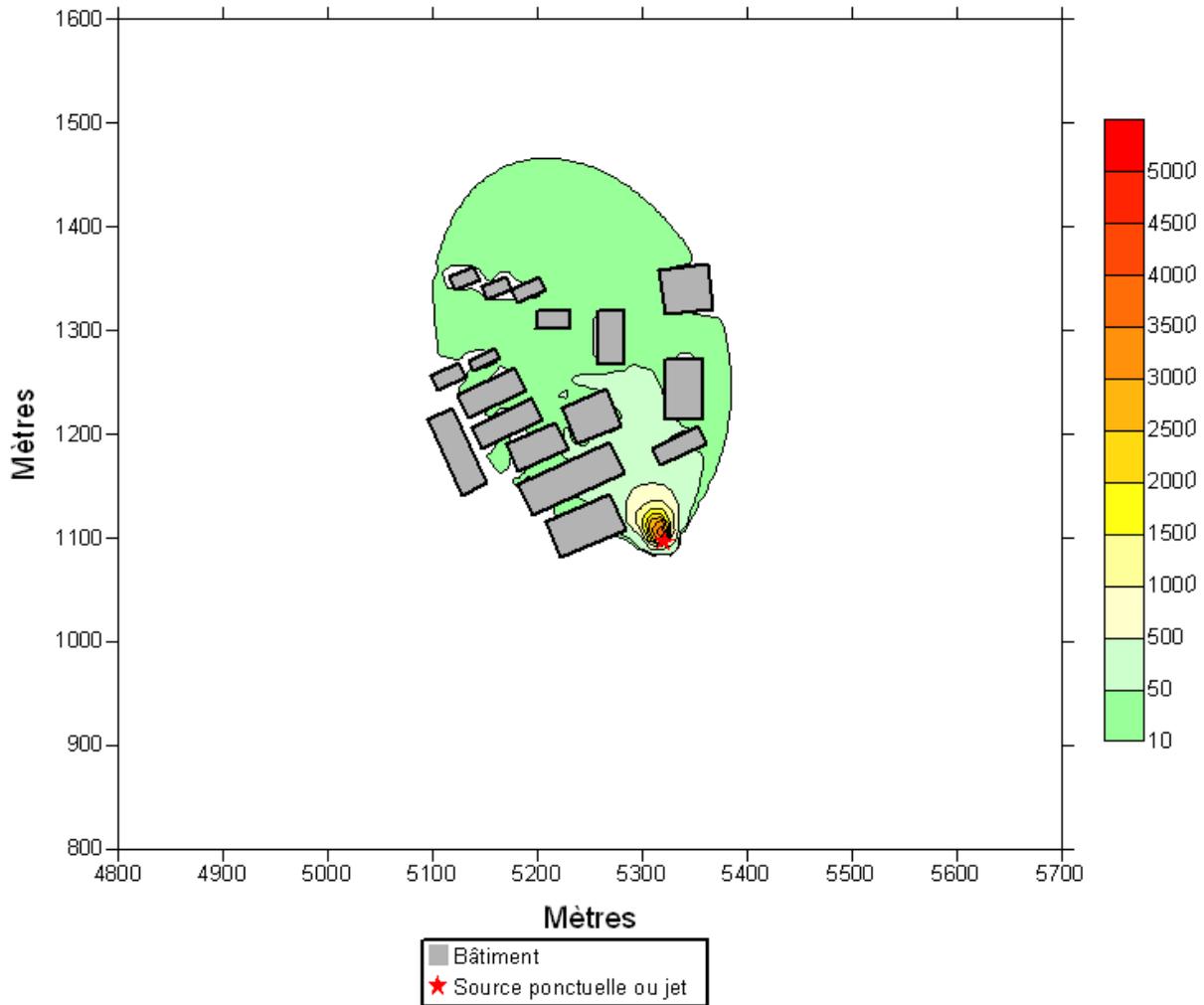


Figure 8: Modélisation de la dispersion pour le 23 juin 2009, Concentrations moyennées sur 3 heures. Echelle en nombre d'aérosols/ m^3 pour une source théorique.

Pour les expérimentations réalisées en juin 2009, la source était disposée au niveau du sol à l'une des extrémités du site du CSTB situé à Champs sur Marne (Figure 9).

Le champ de mesure a été instrumenté sur deux arcs de cercle de 30 degrés à 100 mètres et 200 mètres du générateur (pris comme origine du cône de dispersion), l'orientation de ce secteur de mesures étant fonction des résultats de la simulation avec ADMS.

Pour chaque distance de 100 ou 200 mètres, 6 zones de mesures ont été réparties afin de conserver une ouverture voisine de 5 degrés entre chaque zone. D'où une distance entre 2 zones de mesures successives de 10 m (pour le rayon 100 m) ou de 20 m (pour le rayon 200 m). Ce critère autorise une variation de $\pm 10^\circ$ sur la direction du vent sans risque de manquer le passage du "nuage" (en supposant un nuage avec un élargissement compris dans un angle de 10°).

Une zone de mesure à environ 50 mètres du générateur sera positionnée dans l'axe du vent juste avant l'essai.

Enfin, un biocollecteur autonome et mobile a permis d'accéder à une mesure à 300 mètres de la source.

5.1.1 INSTRUMENTATION

L'instrumentation biologique est constituée par :

- des biocollecteurs de type impacteur à fente sur gélose tournante (NBss), pour le suivi temporel de la concentration de l'air en *Bacillus atrophaeus* ;
- des biocollecteurs de type impacteur à 6 étages sur boîtes de Pétri (AND), pour la granulométrie moyenne de l'aérosol de *Bacillus atrophaeus* généré ;
- des biocollecteurs de type SKC,
- des biocollecteurs de type cyclone à paroi humide (CYC), mobiles et à titre indicatif.

Ces dispositifs ont été mis en place comme suit :

A 50 mètres (1 zone)

- 1 AND

A 100 mètres (6 zones)

- 3x 1 NBss (2 prélèvements successifs par zone)
- 1 AND (1 zone sur 2)
- 1 CYC (mobile, 1 zone sur 6)
- 3 SKC

A 200 mètres (6 zones)

- 3 NBss (1 par zone)
- 1 AND (1 zone sur 2)
- 1 CYC (mobile, 1 zone sur 6)
- 1 SKC

A 300 mètres (1 zone)

- 1 CYC (mobile et autonome)

L'instrumentation météorologique est constituée par :

- Un mât météorologique de 30 mètres équipé d'un anémomètre sonique échantillonné à 32 Hertz et implanté à une trentaine de mètres de la source sur la droite.
- Deux anémomètres soniques montés sur trépieds à une hauteur de 2 mètres et implantés au niveau de la source et sur le point central du premier arc instrumenté à 100 mètres de la source.
- Une sonde de température et une sonde hygrométrique mises sous abri ventilé à deux mètres et échantillonnées à 0.1 Hertz. Ces deux sondes ont été placées sur le point central du premier arc instrumenté à 100 mètres de la source.

Au total, seize bio-collecteurs répartis sur ces points de mesure ont été mis en œuvre. Les appareils sont disposés sur des portoirs, soit à une hauteur moyenne de 1 mètre du sol. Leur positionnement spatial a été défini à partir des prévisions météorologiques et des résultats des simulations préalables. Le placement définitif a été réajusté en début d'essai, selon les observations météorologiques locales. Ces indications sont recueillies en temps réel à l'aide du mât météorologique de 30 mètres (Figure 10) implanté près de la source. Les données météorologiques sont ainsi visualisées en direct sur un poste de travail délocalisé.

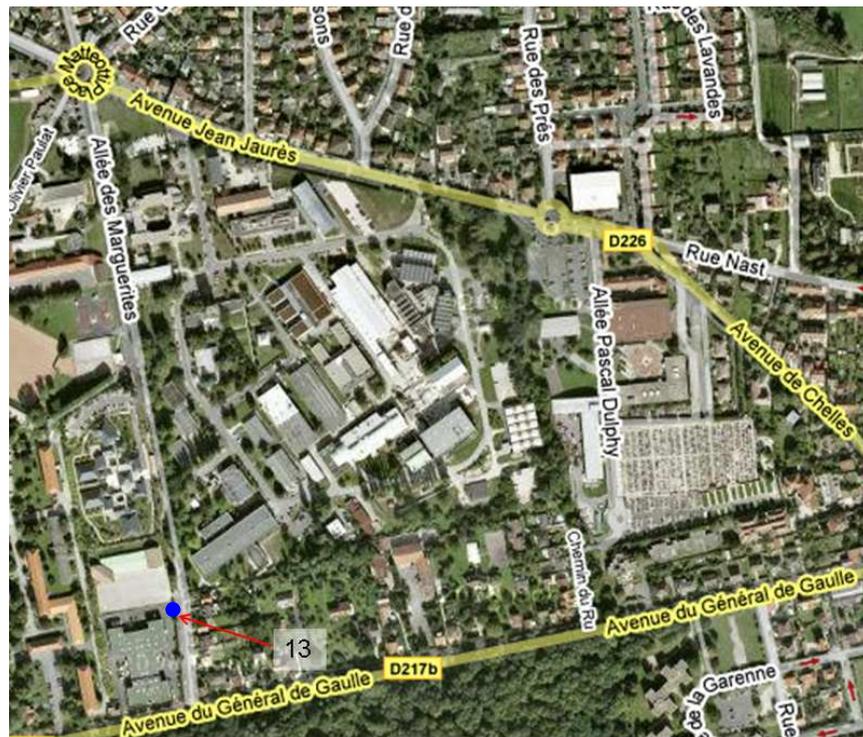
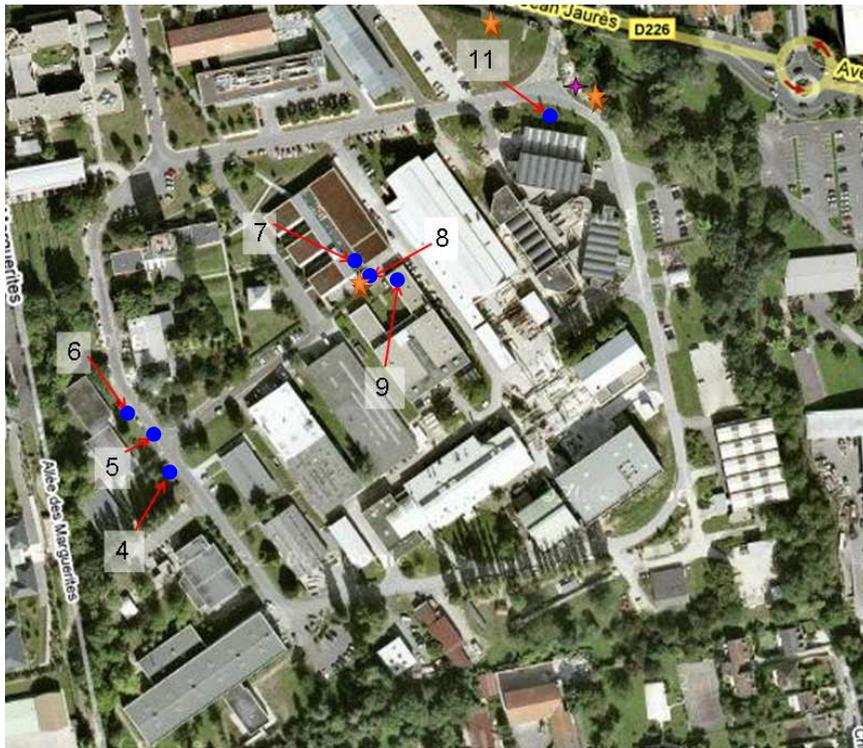


Figure 9 : Photographie des systèmes de collecte positionnés sur aux points 1 (50m), 7, 8, 9 (100m) ; 4, 5, 6 (200m) et 13 (300m).
 ✦ Localisation du terme source. ✦ Localisation des anémomètres soniques.



Figure 10 : Mât météorologique télescopique de 30 mètres.

5.2 PROCEDURE OPERATOIRE

Les dispersions de bactéries se sont déroulées le 23 juin 2009. Trois dispersions ont été effectuées : à 13h30 (dispersion C), à 15h00 (dispersion D) et à 16h30 (dispersion E). La concentration en spores lors de la dispersion E a été augmentée d'un facteur sept par rapport aux deux autres dispersions (C et D). Les conditions météorologiques locales ont été prises en compte pour établir la position définitive des points de l'expérimentation (émissions et prélèvements).

Les suspensions bactériennes utilisées pour les essais ont été préparées extemporanément à partir des aliquotes dilués dans un volume d'eau stérile de 10 L. Les suspensions ainsi obtenues sont préalablement numérotées, puis introduites dans les réservoirs alimentant les systèmes de génération.

Les biocollecteurs liquides ont été mis en fonctionnement simultanément et durant toute la durée de la dispersion (Figure 11). Les impacteurs Andersen ont démarré trois minutes après le début de la génération, tandis que les impacteurs mono fente ont débuté l'échantillonnage trois minutes avant, puis arrêtés trois minutes après, ce qui permet d'obtenir la distribution temporelle (en nombre par unité de temps) des bactéries contenues dans l'aérosol.

Une fois les collectes terminées, les échantillons sont récupérés immédiatement et analysés selon le protocole décrit précédemment. Une mise à blanc des appareils est alors effectuée avant le début de l'essai suivant. Enfin, afin de réajuster éventuellement les conditions de dispersion, les résultats de l'analyse culturelle des prélèvements ont été traités dès le lendemain matin.

Le Tableau 1 récapitule les données opératoires et le Tableau 2 présente la répartition des systèmes de collecte déployés durant les essais de cette phase de mesures.

| Dispersion | | Disp C | Disp D | Disp E |
|--------------|----------------|--|---------------|---------------|
| Générateur | Type | Brumisateur | Brumisateur | Brumisateur |
| | Sortie | 8 buses | 8 buses | 8 buses |
| | Volume | 6,4 L | 7 L | 7,6 L |
| | Durée | 22min20sec | 25min04sec | 24min57sec |
| Suspension | Type | Spores de Bacillus atrophaeus (FRBD Batr001) | | |
| | Concentration | 4,6E06 ufc/ml | 4,3E06 ufc/ml | 3,1E07 ufc/ml |
| | Dilution | Eau distillée | Eau distillée | Eau distillée |
| Météorologie | Température | 21 °C | 23 °C | 23 °C |
| | Pression | 1019 hPa | 1018 hPa | 1017 hPa |
| | Humidité | 35 % | 31 % | 31 % |
| | Direction vent | 59 degrés | 76 degrés | 54 degrés |
| | Vitesse vent | 2,5 m/s | 3,4 m/s | 2,8 m/s |

Tableau 1 : Synthèse des conditions opératoires des dispersions réalisées le 23/06/2009.

| Points de collecte | | 50 m (pt11) | 100 m (pt7) | 100 m (pt8) | 100 m (pt 9) | 200 m (pt 4) | 200 m (pt 5) | 200 m (pt 6) | 300 m (pt 13) |
|--------------------|---------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| Biocollecteurs | Slit Sampler (NBss) | | X | X | X | X | X | X | |
| | Andersen 6 étages | X | | X | | | X | | |
| | SKC | | X | X | X | | X | | |
| | Cyclone | | | X | | | X | | X |

Tableau 2 : Répartition des systèmes de collecte déployés durant les essais.

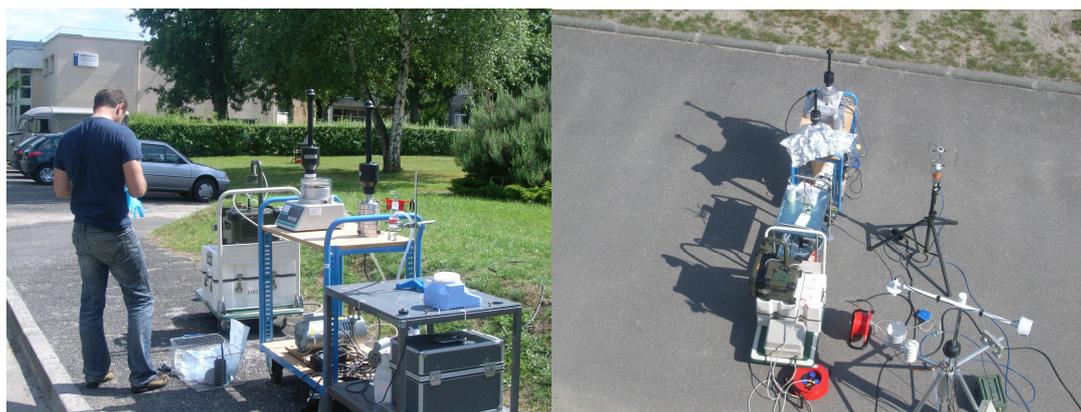


Figure 11 : Collecteurs au point 5 (200m) et au point 7 (100m).

5.3 APPROCHE NUMERIQUE POUR LA MODELISATION DES DISPERSION C, D ET E AVEC LE MODELE MSS.

5.3.1 MODULE DE DISPERSION DE MICROORGANISMES : DESCRIPTION DES METHODOLOGIES DE MODELISATION DEVELOPPEES.

Un module de dispersion de microorganismes a été spécifiquement développé au sein du modèle lagrangien de dispersion MSS. Les principes de base de ce module sont évoqués ici.

Les particules virtuelles émises par le modèle lagrangien représentent de l'eau liquide sous la forme d'un spectre de gouttes, de la vapeur d'eau et des microorganismes. Initialement les microorganismes sont contenus dans les gouttelettes d'eau.

Le débit de masse évaporé pour chaque goutte est calculé à l'aide du nombre de Sherwood et de la corrélation de Ranz et Marshall (1952 et 1953). L'évolution de la température des gouttes est traduite dans l'équation lagrangienne générique de (R.S. Miller et al ,1998).

La vapeur d'eau se diffuse dans l'air ambiant suivant une résolution eulérienne d'une grille permettant de calculer sa diffusivité à l'aide des formules de List (1963) et de Bolz and Tuve (1976). Enfin, l'évolution de la densité et de la température au sein du panache est résolue à l'aide des équations de Glandening (1984).

Les gouttelettes d'eau s'évaporent libérant les microorganismes qui se dispersent alors librement.

5.3.2 HYPOTHESES RETENUES POUR LA MODELISATION AVEC LE MODELE LAGRANGIEN MSS.

5.3.2.1 DOMAINE DE CALCUL

La grille du domaine est un cube de 716 m * 716m * 300m qui englobe tout le site du CSTB. La résolution de maille est de 4m. Le pas de temps pour la résolution de la dispersion est de 1 seconde.

5.3.2.2 TOPOGRAPHIE ET BATI

La topographie est issue des plans de construction du CSTB et complétée en dehors du site par des données USGS⁵. L'ensemble des données du bâti est issu des plans de masse du CSTB, les formes spécifiques du bâti sont fidèlement représentées dans le modèle.

5.3.2.3 METEOROLOGIE

Les paramètres météorologiques sont calculés par le préprocesseur Micro Swift qui permet la reconstruction d'un champ de vent moyen à l'aide des variables mesurées de température, humidité relative, directions et intensités du vent, nébulosité aux points de mesures indiqués au paragraphe 5.1.1. Le champ de vent final vérifiant la loi de conservation de la masse est diagnostiqué à l'aide de corrections analytiques induites par la présence d'obstacles, en considérant la topographie et les bâtiments.

⁵ United States Geological Survey, www.usgs.gov

Micro Swift est un module qui pronostique des champs météorologiques stationnaires. L'ensemble des données météorologiques observées a donc été moyenné sur une minute, ce qui permet de respecter cette contrainte en faisant l'hypothèse que le champ de vent varie peu pendant cette période.

5.3.2.4 MICROORGANISMES

On fait les hypothèses suivantes :

- Tous les microorganismes sont émis dans des gouttelettes d'eau aérosolisées.
- Les microorganismes modélisés survivent quelles que soient les conditions auxquelles ils sont exposés (pas d'utilisation du module de survie pour les dispersions C, D et E).

5.4 CARACTERISATION EXPERIMENTALE DES AEROSOLS BACTERIENS PRODUITS LORS DE LA DISPERSION

5.4.1 MESURE DE LA CONCENTRATION BACTERIENNE AEROPORTEE

La concentration en aérosols de spores de *B. globigii* dispersés a été évaluée à l'aide de *slit sampler* (NBss) positionnés en chacun des points de collecte.

Les concentrations rapportées sont intégrées sur la durée de fonctionnement du système de dispersion. Les résultats sont moyennés sur la durée de la dispersion. Tous les appareils mis en œuvre révèlent la présence des spores dans l'atmosphère.

Afin de faciliter la comparaison des valeurs mesurées / modélisées, nous avons pris un point référence, le point 5 situé à 200 m (point le plus instrumenté) et effectué un changement d'échelle en normalisant les valeurs mesurées et les valeurs du modèle : la concentration normalisée au point 5 est ainsi fixée à 10 UFC/m³. Le calcul des valeurs en chaque point se fait par rapport à ce point référence. Afin de permettre la comparaison, les valeurs maximales ne sont pas normalisées.

La mise en place de plusieurs indicateurs permet de comparer les différentes valeurs obtenues par échantillonnage et par modélisation :

- Indicateur des valeurs moyennes de concentrations aux points de mesures : La moyenne des concentrations mesurées sur les NBss est comparée à la moyenne des concentrations modélisée pour chaque point d'implantation d'un instrument NBss.
- Indicateur des valeurs maximales de concentrations aux points de mesures. La valeur maximale des concentrations mesurées sur les NBss est comparée à la valeur maximale des concentrations modélisées en chaque point d'implantation d'un instrument NBss.
- Ratios des valeurs maximales mesurées (NBss)/modélisées aux points d'implantation des NBss. Cet indicateur permet de rendre compte de la décroissance des concentrations observées/modélisées avec la distance à la source.
- Ratios des valeurs moyennes mesurées/modélisées par type d'instrument. Cet indicateur permet de comparer les résultats de chaque instrument par rapport à la modélisation.

- Série temporelle des concentrations mesurées (slit sampler)/modélisées. Les séries temporelles permettent de vérifier l'adéquation du modèle et des mesures au point considéré.

5.4.2 COMPARAISON DES CONCENTRATIONS MOYENNES MESURES / MODELE

Les Figure 12, Figure 13 et Figure 14 présentent les résultats des mesures de concentrations moyennes obtenues lors des dispersions C, D et E comparées aux résultats de modélisation. Pour la dispersion E, le slit sampler du point à 50 mètres étant saturé, aucune concentration en spores n'a pu être mesurée pour ce point.

Ces résultats sont également présentés sous la forme de cartographie en Annexe 1.

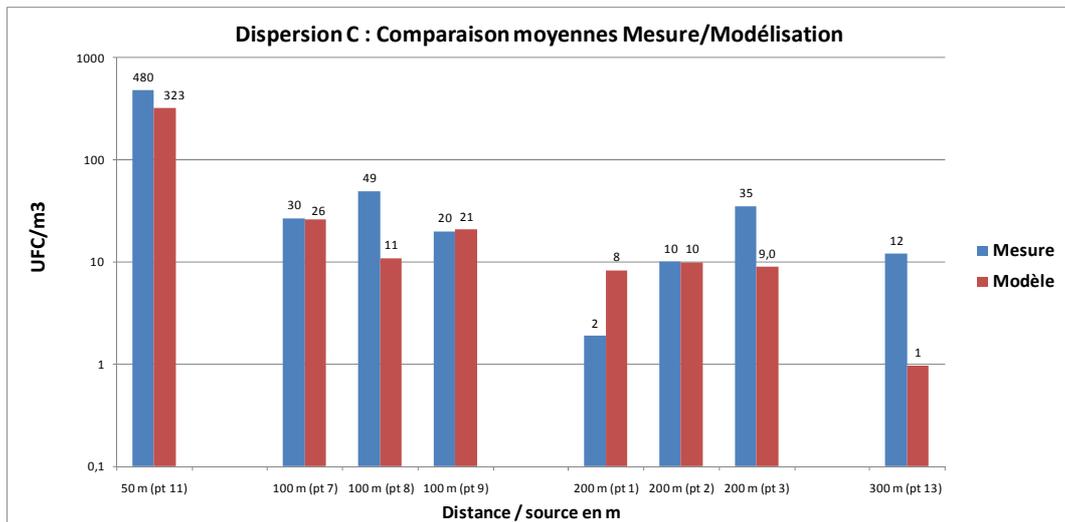


Figure 12 : Comparaison des concentrations moyennes Mesures / Modèle en *B. globigii* selon les points d'échantillonnage pour la dispersion C.

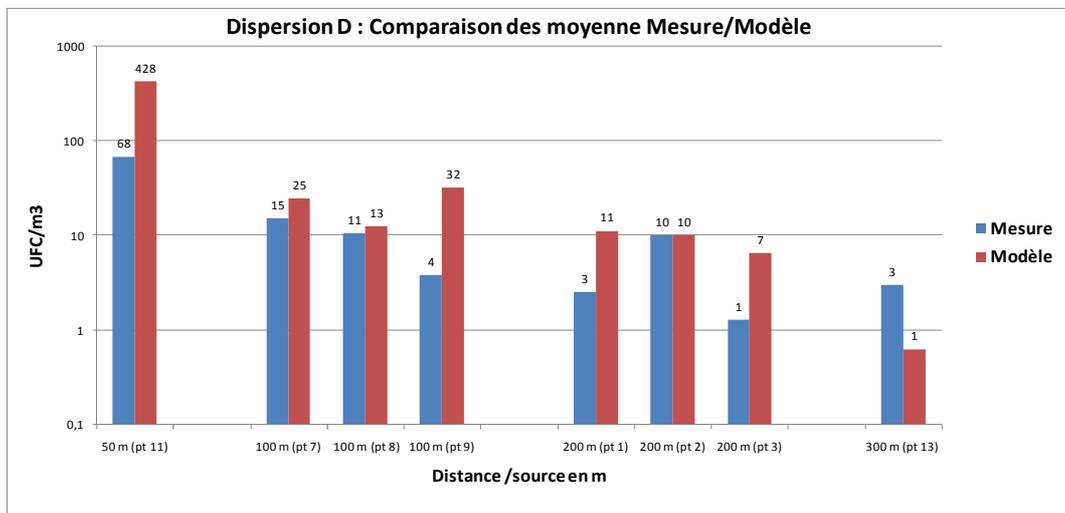


Figure 13 : Comparaison des concentrations moyennes Mesures / Modèle en *B. globigii* selon les points d'échantillonnage pour la dispersion D.

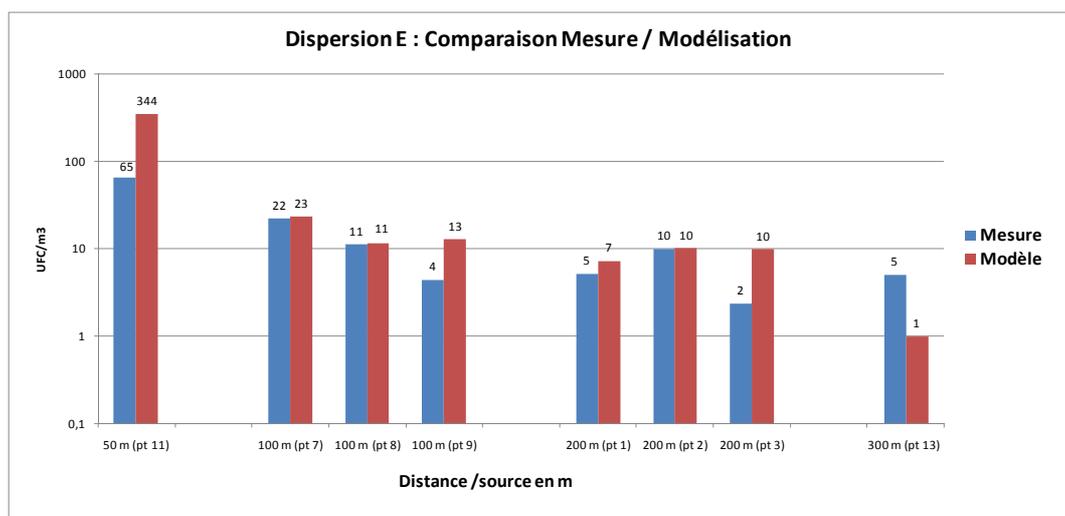


Figure 14 : Comparaison des concentrations moyennes Mesures / Modèle en *B. globigii* selon les points d'échantillonnage pour la dispersion E.

5.4.2.1 ANALYSE DES RESULTATS

Les résultats pour chacune des dispersions quantifient la décroissance des concentrations moyennes de spores observées et modélisées en fonction de la distance à la source.

Les différences observées peuvent être significatives pour le point à 50 mètres (point 11) notamment pour les dispersions D et E. Ceci peut s'expliquer par la proximité du point 11 à la source : les données météorologiques dont la direction du vent étant moyennées sur une minute pour le modèle, le panache réel peut tout à fait serpenter de part et d'autre du point 11 alors que le modèle voit passer le panache dans l'axe de ce point. Il en résulte alors une surestimation significative des concentrations par le modèle. Ces différences sont moins importantes lorsque l'on s'éloigne de la source, l'effet de la dilution devenant alors prépondérant.

Le point à 300 mètres pour la dispersion C montre pourtant un écart également significatif entre concentrations mesurée et modélisée. Les observations montrent que le point 13 voit le passage d'un nuage de concentrations élevées en spores qui n'est pas retranscrit par le modèle. Ce nuage de concentrations élevées a pu être créé par accumulation pendant un temps dans une zone de recirculation derrière un bâtiment puis s'être finalement détaché de l'obstacle pour venir impacter le point 13. Ceci ne peut pas être modélisé par le modèle de dispersion qui propose uniquement une suite de situations stationnaires pour un pas de temps d'une minute.

L'ensemble des autres résultats montrent une bonne cohérence des résultats du modèle par rapport aux observations.

5.4.3 COMPARAISON DES CONCENTRATIONS MAXIMALES MODELISATION / MESURE A 100 ET 200 M

Nous avons comparé les valeurs maximales obtenues par les slit samplers et par modélisation aux points à 100m et à 200m afin d'avoir une idée de la concentration en spores possiblement inhalées par un individu à des distances croissantes de la source. Les résultats sont résumés en Figure 15 et Figure 16 ci-après :

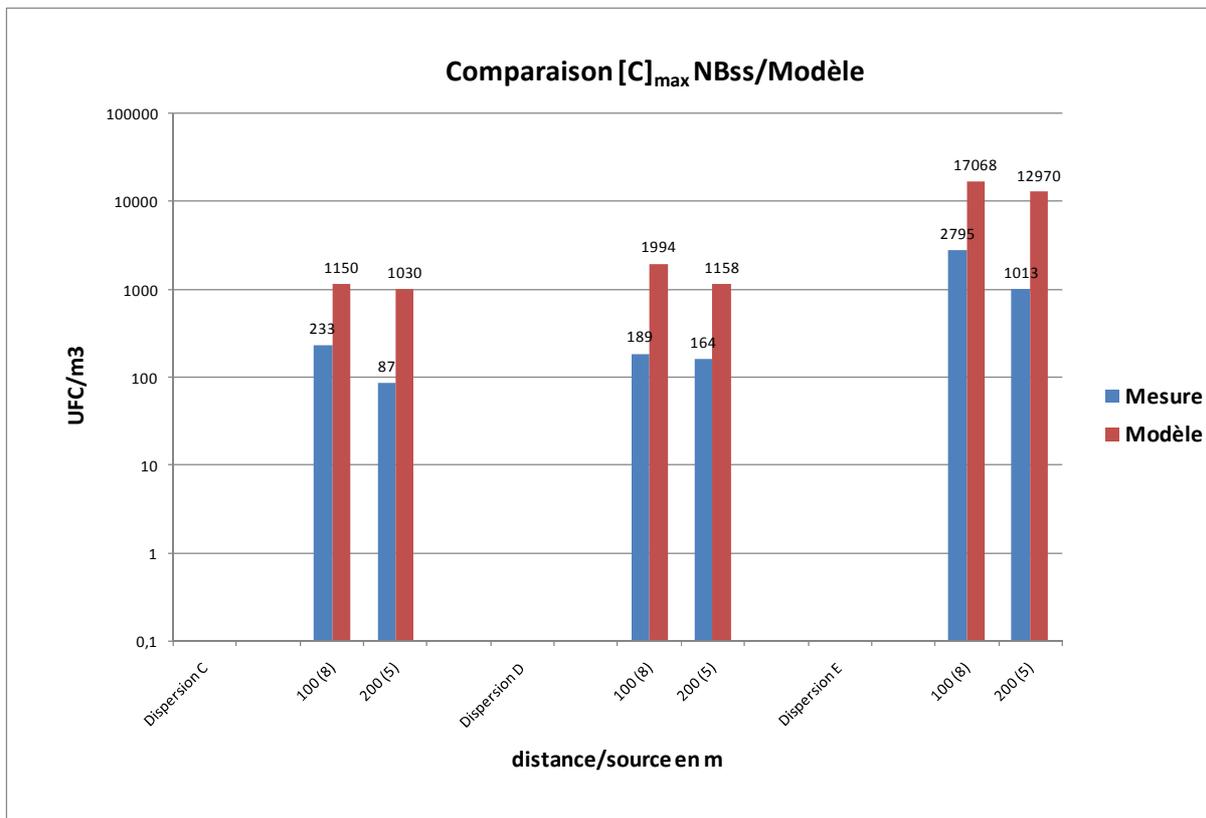


Figure 15 : Comparaison des valeurs maximales obtenues par slit samplers comparées aux valeurs maximales obtenues par modélisation.

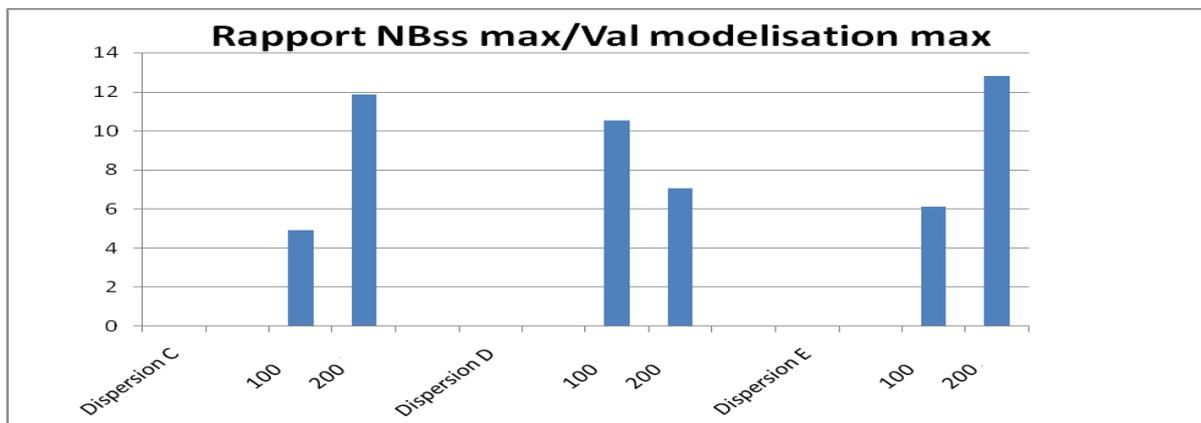


Figure 16 : Rapport des valeurs maximales obtenues par slit samplers comparées aux valeurs maximales obtenues par modélisation.

5.4.3.1 ANALYSE DES RESULTATS

Le rapport des valeurs des concentrations maximales obtenues par slit samplers et celles obtenues par modélisation se situe dans une fourchette de 4 à 12, ce qui montre que l'approche numérique n'est pas aberrante compte tenu des incertitudes sur la mesure. Les valeurs obtenues pour les dispersions D et E sont en *Annexe 2*.

5.4.4 CALCUL DES RATIOS DE CONCENTRATION MODELE / MESURE POUR CHAQUE TYPE DE COLLECTEUR

Afin d'étudier les limites du modèle par rapport à chaque type d'échantillonneur nous avons calculé le ratio valeur modèle / valeur collecteur pour chacune des distances. Les résultats obtenus sont résumés dans la Figure 17 ci-dessous :

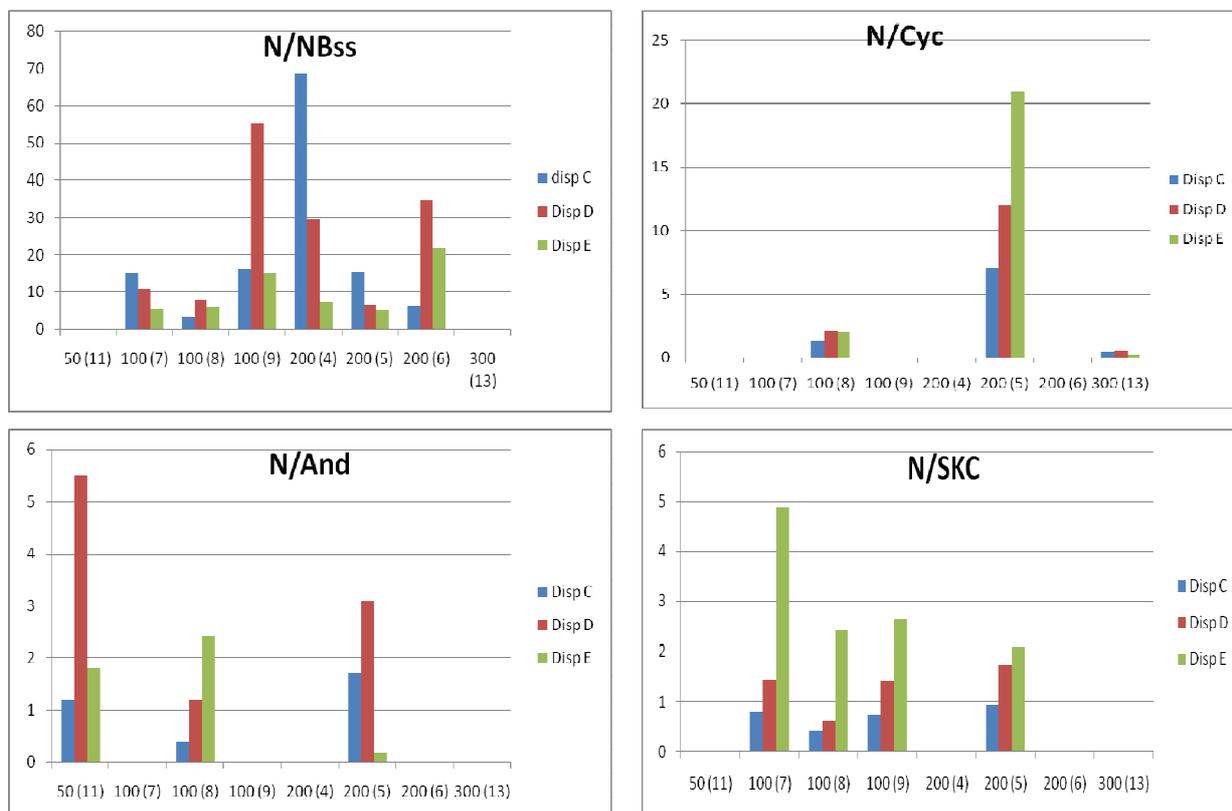


Figure 17 : Comparaison des valeurs moyennes Modèle (N) / Echantillonneur pour chacune des dispersions.

Les résultats montrent que lors de ces essais, **les valeurs obtenues par les collecteurs SKC ou de type Andersen se rapprochent le plus des valeurs obtenues par modélisation** (rapport de 1 à 6). Ceci est donc une indication quand au type de collecteur susceptible de donner les valeurs les plus corrélées à celles du modèle.

En valeurs non normalisées, des différences importantes sont apparues entre les concentrations mesurées par certains biocollecteurs et les valeurs issues de la simulation. Les rapports moyens de concentrations {modèle / biocollecteur} sont respectivement de 9 – 1,9 – 1,6 et 5 pour le NBss, l'AND, le SKC et le CYC. Si le modèle peut être mis en cause, un biais expérimental doit également être considéré de par l'existence d'un ratio de 1 à 6 entre chaque type de biocollecteur. De plus, l'obtention de ratios inférieurs à un facteur 1,3 entre le NBss et l'AND lorsqu'ils sont utilisés dans un environnement maîtrisé indique que le problème rencontré est spécifique à une métrologie en extérieur. Cela a été confirmé par des essais complémentaires pour lesquels le recouvrement du NBss par une toile aluminisée

nous a permis de supprimer la majeure partie de son écart avec l'AND. L'application de cette correction donne alors l'efficacité attendue pour le CYC par rapport au NBss.

Si les relations entre nos 4 types de biocollecteurs et avec le modèle MSS sont cohérentes en moyenne, la dispersion des ratios demeure nettement plus importante que dans un moyen d'essais maîtrisé. Ainsi, les rapports {modèle / biocollecteurs} sur ces essais s'étendent sur un ordre de grandeur et les écarts entre efficacités relatives de biocollecteurs atteignent un facteur 5 (moins de 1,5 en laboratoire). D'où des causes de dispersions qui se répartiraient de nouveau entre le modèle et le fait d'utiliser l'instrumentation en champ libre.

5.5 DETERMINATION DE LA GRANULOMETRIE DES SPORES AEROSOLISEES

La taille des aérosols produits lors de la dispersion a été caractérisée aux points des impacteurs Andersen. Les Figure 18 et Figure 19 montrent la granulométrie des particules générées à partir de la source lors de la dispersion C et de la dispersion E aux points de prélèvements à 50 mètres, 100 mètres et 200 mètres de la source. La comparaison des dispersions C et E permet de caractériser l'effet sur la granulométrie d'une concentration à l'émission 7 fois plus importante pour la dispersion E.

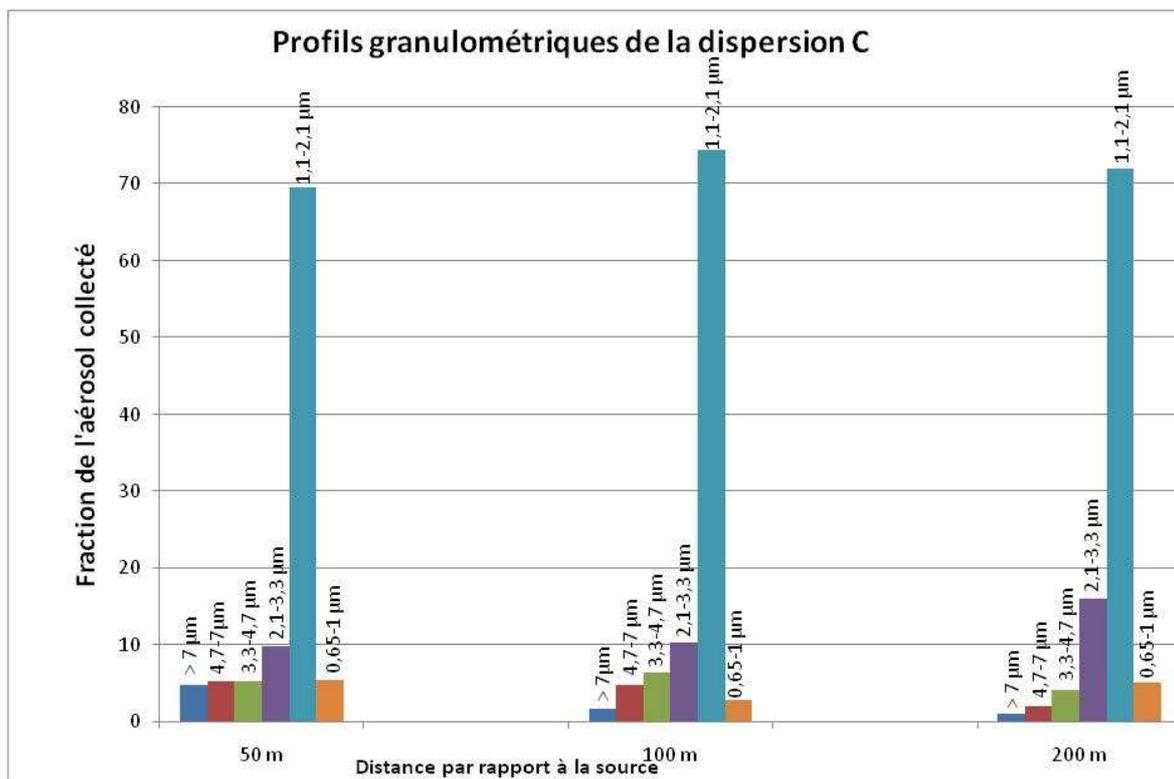


Figure 18 : Profils granulométriques de l'aérosol de *B. globigii*, lors de la dispersion C.

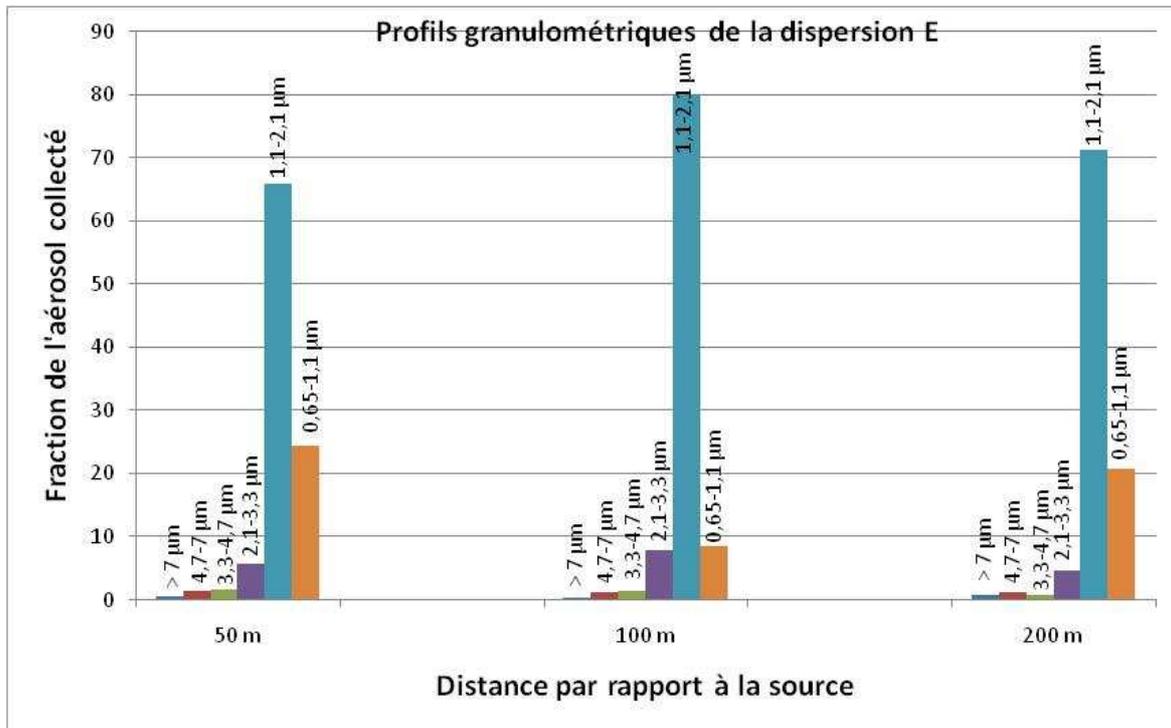


Figure 19 : Profils granulométriques de l'aérosol de *B. globigii*, lors de la dispersion E.

Pour chacune des dispersions, l'aérosol bactérien prélevé aux différents points de mesure présente la même distribution granulométrique, avec une majorité de particules bactériennes comprises entre 1,1 et 2,1 µm. Le diamètre aérodynamique de la spore de BG étant de 1,4 µm, ces profils granulométriques suggèrent que les spores collectées se présentent sous forme isolée et d'aérosols secs, les aérosols liquides ou gouttelettes formés à l'émission et contenant initialement le microorganisme étant a priori complètement évaporées. Par ailleurs, l'augmentation de la concentration de l'inoculum bactérien dans le cas de la dispersion E n'a pas eu pour effet la formation de clusters de spores (agglomérats) qui auraient pu par la suite biaiser la comparaison des résultats avec les données de simulation.

5.6 SUIVI SPATIO-TEMPOREL DE LA CONCENTRATION BACTERIENNE AEROPORTEE

A partir des prélèvements effectués par les slit sampler, nous avons établi les cinétiques des nuages bactériens dispersés expérimentalement 23 juin 2009. Ces visions temporelles de la flore aéroportée sont représentées Figure 20 et Figure 21 pour la dispersion C et comparées aux séries temporelles des concentrations modélisées aux mêmes points. Elles illustrent donc également la dynamique spatiale déterminée à partir des différents points de collecte. Afin de mieux étudier les variations spatio-temporelles des concentrations en spores, les résultats du modèle ont été normalisés par le maximum observé, le maximum entre observation et modélisation est donc identique. Les séries temporelles pour les dispersions D et E sont présentées en annexe.

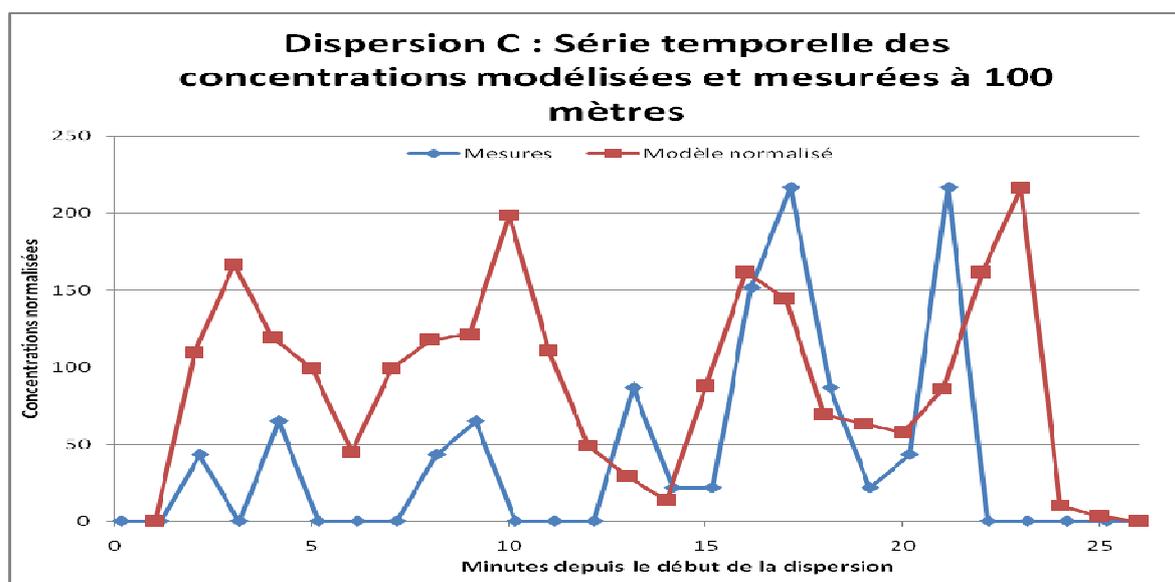


Figure 20 : Suivis de la concentration atmosphérique de *B. globigii* durant la dispersion C du 23/06/2009 à 100 m.

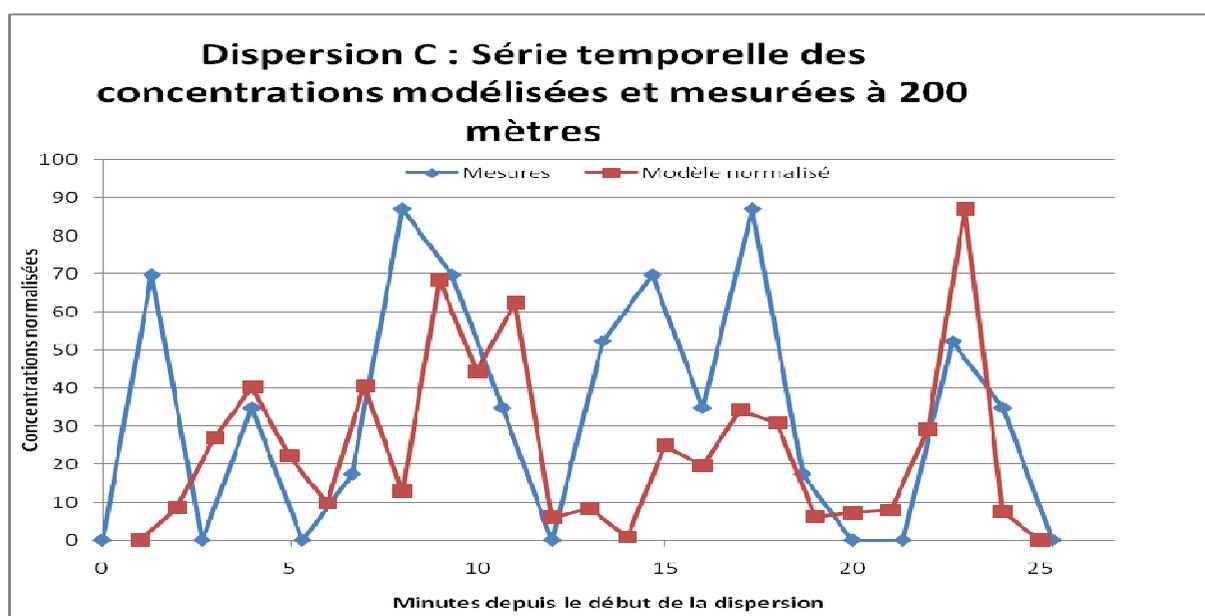


Figure 21 : Suivis de la concentration atmosphérique de *B. globigii* durant la dispersion C à 200 m.

5.6.1 ANALYSE DES RESULTATS

Les cinétiques montrent que les spores de BG sont détectées uniquement sur la plage de temps correspondant au fonctionnement des impacteurs.

La comparaison entre les résultats obtenus par modélisation et avec les *slit* samplers montre que la durée de passage du « nuage » de spores en chaque point (100 et 200 m) est équivalente.

On observe une corrélation entre l'évolution temporelle des concentrations mesurées/modélisées en chaque point pour la dispersion C.

Concernant les autres dispersions, la corrélation est moins marquée, cela peut s'expliquer du fait des conditions météorologiques différentes pour chacune des dispersions. Un diagnostic du champ de vent moyenné sur une minute peut ne pas être adapté pour chaque dispersion.

6. MODELISATION DU TRANSFERT ET DE LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE DES AEROSOLS BIOLOGIQUES EMIS PAR LA TAR.

Afin de transposer l'application des modèles au cas réel d'une dispersion par une TAR, une caractérisation du terme source « TAR » a été réalisée. Elle porte principalement sur la granulométrie des gouttelettes produites et le transfert de microorganismes lors de son fonctionnement.

Une TAR fonctionnelle de type tertiaire (Annexe 4) a été mise à disposition par la société Balticare et installée sur le site du CSTB. Ses caractéristiques de fonctionnement, accessibles par les données constructeur, ont été contrôlées par une instrumentation préalable du dispositif.

6.1 CARACTERISATION EXPERIMENTALE DU TERME SOURCE

6.1.1 GRANULOMETRIE DES GOUTTELETTES

La taille des gouttelettes produites par ce type de dispositif a été caractérisée à l'aide de granulomètres laser (Spraytec, Malvern) et optique (WELAS) positionnés selon un axe horizontal parallèle à la section de sortie du panache. Les mesures ont été répétées à 3 hauteurs différentes (Figure 22). En outre, deux configurations de fonctionnement en présence et absence de pare-gouttelettes ont été également testées.



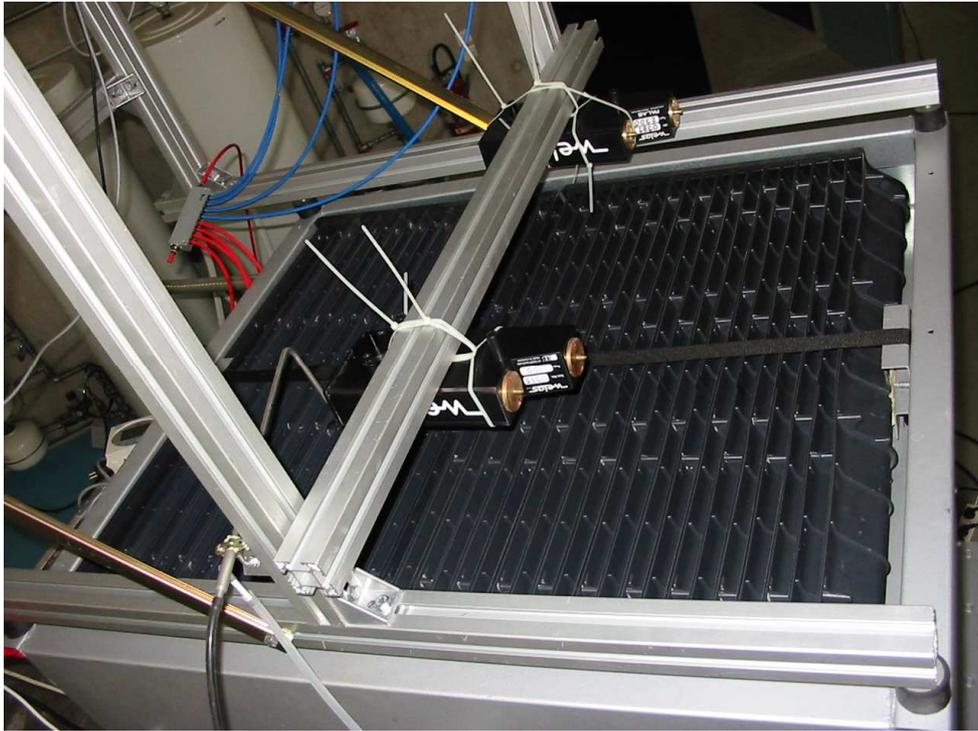
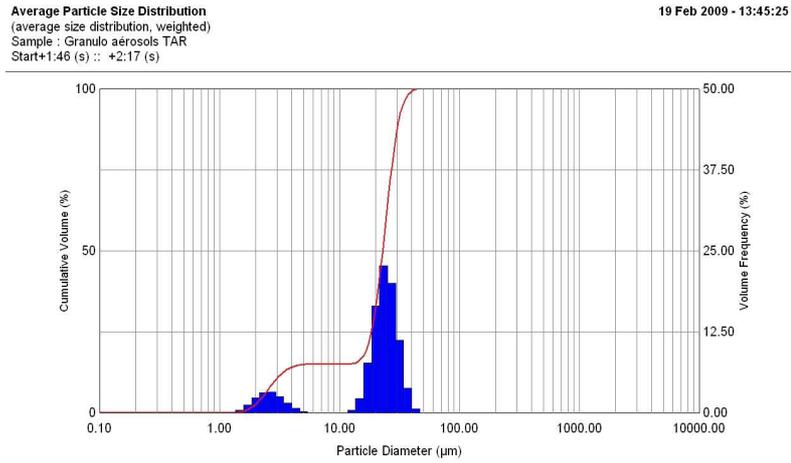


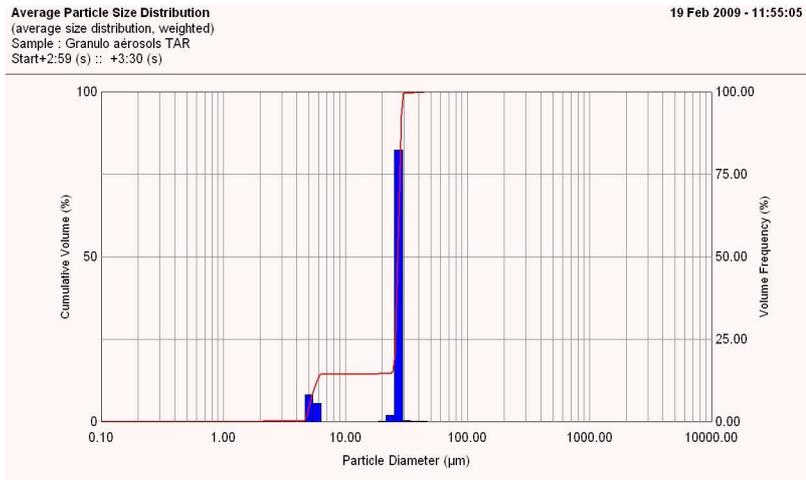
Figure 22 : Instrumentation de la TAR à l'aide des granulomètres laser et optique.

Les données obtenues à partir du granulomètre laser sont présentées ci-dessous. Il est observé une distribution bimodale avec un mode moyen autour de $3 \mu\text{m}$ puis le second vers $20 \mu\text{m}$. Si l'on analyse de plus près cette distribution, les concentrations rapportées en nombre indiquent que la majorité des gouttelettes produites à l'émission se situent dans la fraction des particules inférieures à $5 \mu\text{m}$ (Figure 24) et que celles supérieures sont alors négligeables. Les mesures optiques convergent également vers un mode principal à $2,5 - 3 \mu\text{m}$ (Figure 25). Quel que soit le point de mesure, les distributions sont relativement comparables, en dehors de variations de concentrations pouvant atteindre un facteur de 1,5. Ces variations peuvent être imputées à la géométrie du pare-gouttelettes et la répartition des buses de dispersion, qui entraînent une hétérogénéité du panache dans le plan de mesure.

z = 26 cm



z = 60 cm



z = 94 cm

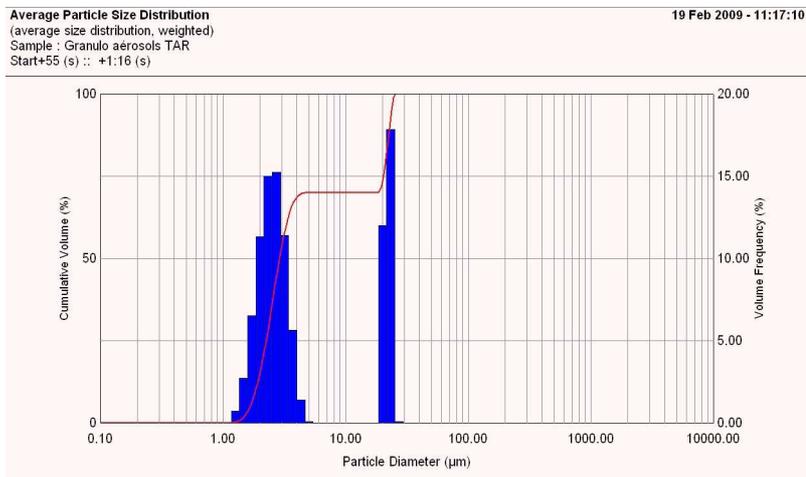


Figure 23 : Profils granulométriques des gouttelettes émises par la TAR, mesurés à 3 hauteurs z différentes par rapport à la section de sortie.

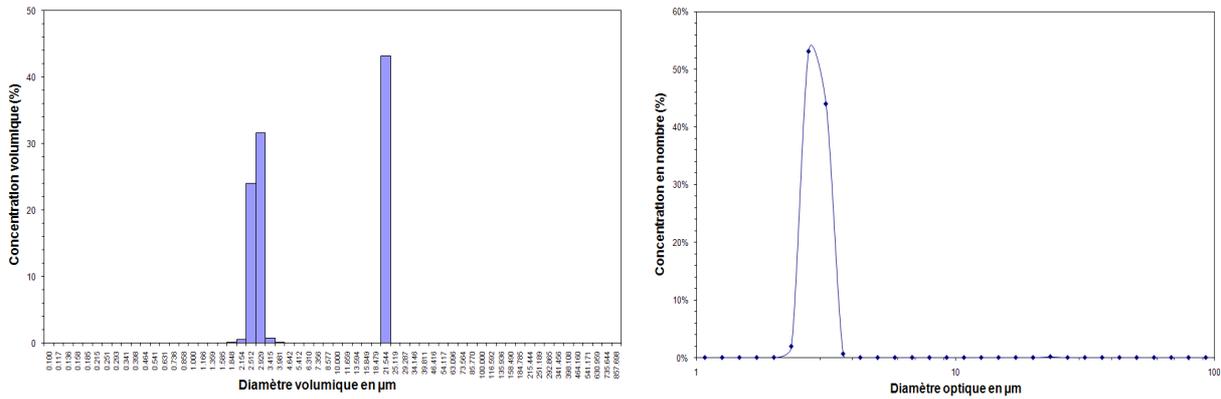


Figure 24 : Profils granulométriques en volume et nombre du panache mesuré en sortie de TAR à z = 94 cm (granulomètre laser).

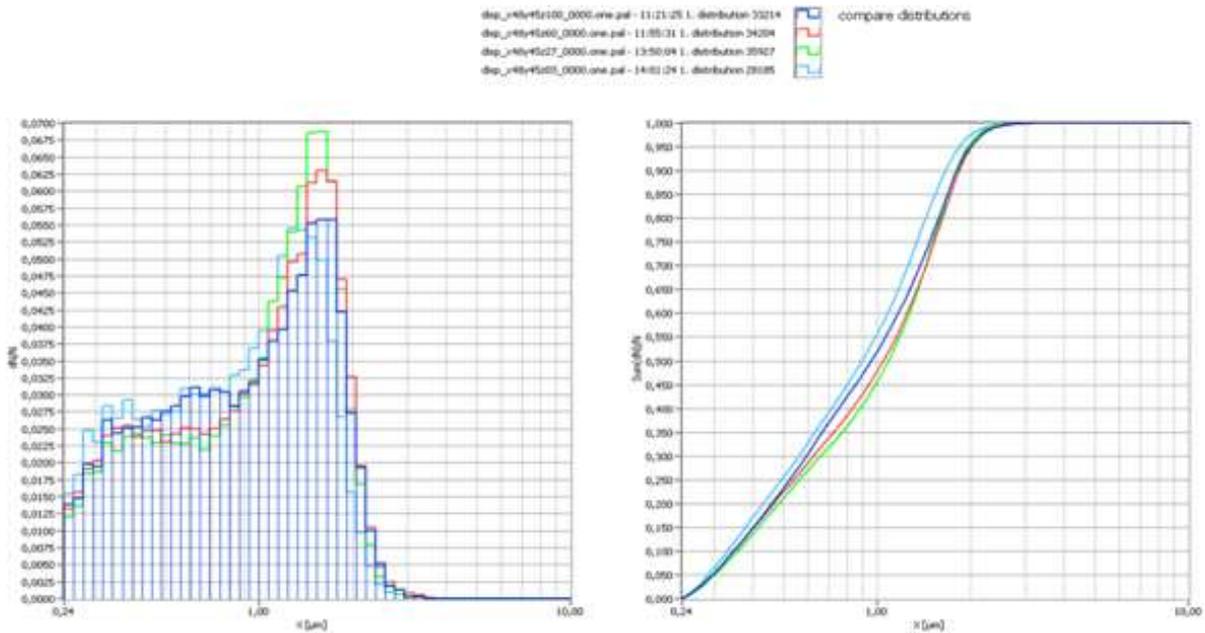


Figure 25 : Profils granulométriques en nombre déterminés par granulomètre optique.

Concernant l'effet du pare-gouttelettes, il se traduit principalement par une augmentation de la concentration d'un facteur 2 à 3. Bien que plus prononcé sur les particules supérieures à 1 µm, le phénomène existe également sur les particules submicroniques. Le profil moyen n'est pas modifié dans son ensemble, même si l'on peut toutefois noter une augmentation du diamètre du mode principal de 10 à 20%, en l'absence du pare-gouttelettes.

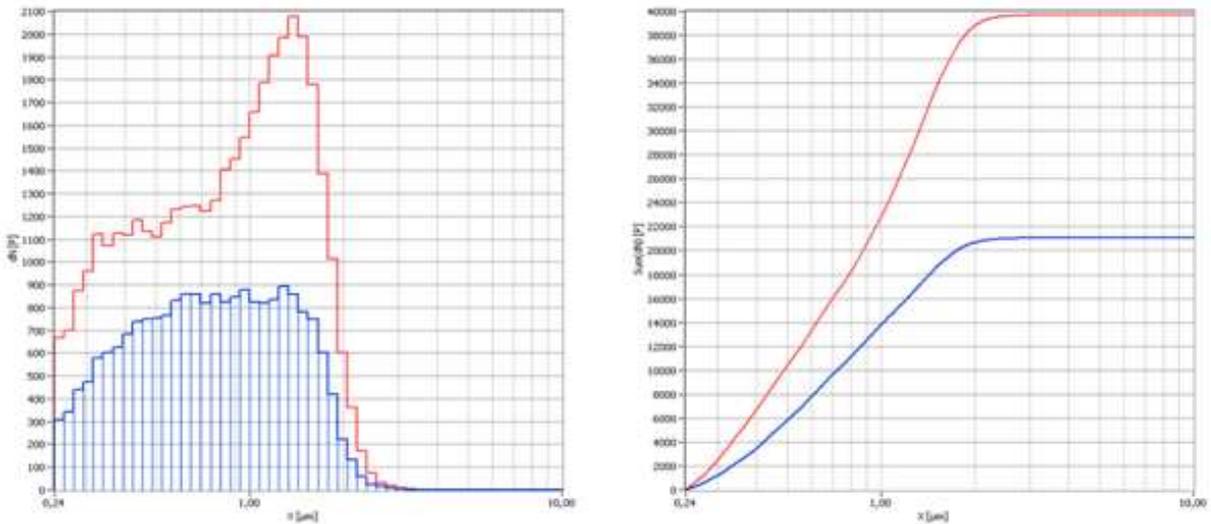


Figure 26 : Profils granulométriques en nombre en présence et absence de pare-gouttelettes (granulomètre optique).

6.1.2 DISPERSION DE BG A PARTIR D'UNE TAR TERTIAIRE

Afin d'évaluer le coefficient de transfert de bactéries contenues dans l'eau de circuit d'une TAR à l'atmosphère, nous avons procédé à la dispersion de BG à partir d'une TAR dont les paramètres sont bien caractérisés (cf. § 6.1). L'aérosol généré par la TAR a été canalisé et dirigé vers un impacteur liquide de type cyclone (cf. ci-dessous Figure 27).



Figure 27 : Dispositif d'échantillonnage de la dispersion de BG à partir de la TAR.

Deux essais de dispersion de BG ont été réalisés en faisant varier la concentration en BG dans l'eau de la TAR. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 3 ci-dessous :

| Paramètres de dispersion | Dispersion 1 | Dispersion 2 |
|--|---------------------|---------------------|
| Quantité de spores introduites dans l'eau de la TAR | 2,70E+08 | 2,90E+10 |
| Concentration en spores dans l'eau de la TAR (spores/L) | 3E+06 | 3,22E+8 |
| Durée de la dispersion (s) | 90 | 415 |
| Débit d'air TAR (m ³ /s) | 1,9 | 1,9 |
| Débit cyclone (m ³ /h) | 55 | 55 |
| Quantité de spores collectées | 70 | 29 574 |
| Quantité de spores aérosolisées durant la dispersion | 8,74E+03 | 3,68E+06 |
| Ratio spores aérosolisées / spores présentes dans l'eau de la TAR | 3,24E-05 | 1,27E-04 |

Tableau 3: Résultats concernant la dispersion de spores de BG à partir de la TAR.

Dans les conditions mises en œuvre, les résultats montrent que le ratio entre le nombre de spores présentes dans l'eau de la TAR et le nombre de spores aérosolisées est très faible (3,24E-05 à 1,27E-04), ce qui rejoint les résultats obtenus par la modélisation (§ 6.3) où l'on obtient un ratio de l'ordre de 5.E-03 en considérant que la concentration est homogène dans la TAR. Ces résultats donnent une première approximation du coefficient de transfert pouvant exister entre une concentration en microorganismes dans l'eau et une concentration dans l'air après dispersion pour un type de TAR donné, même s'ils doivent être affinés par une instrumentation plus fine des paramètres physiques de la TAR.

6.2 IMPLEMENTATION D'UN MODULE BIOLOGIQUE SUR LA MODELISATION DE LA DISPERSION

Sur la base des travaux du CSTB concernant la survie des légionelles en aérosol selon l'hygrométrie ambiante (T.L. Ha, 2005), il a été défini deux coefficients α de perte de cultivabilité : l'un tenant compte de la perte de cultivabilité (stress) au moment de la dispersion ($\alpha = 0,006$), l'autre ne prenant en compte que de la perte de cultivabilité après la dispersion ($\alpha = 0,002$) (Annexe 6).

A partir des paramètres physiques de la TAR, des données de granulométries (§ 6-1), des données météorologiques mesurées lors de la dispersion E et en intégrant ce module de décroissance des légionelles, nous avons simulé une dispersion à partir de la TAR en situant celle-ci au niveau de la source étudiée précédemment. Pour la concentration en légionelles dans la TAR nous avons pris la concentration réglementaire (10^5 UFC/L) au-delà de laquelle la TAR doit être arrêtée.

Les résultats obtenus sont résumés dans la Figure 28 et la Figure 29 ci-dessous.

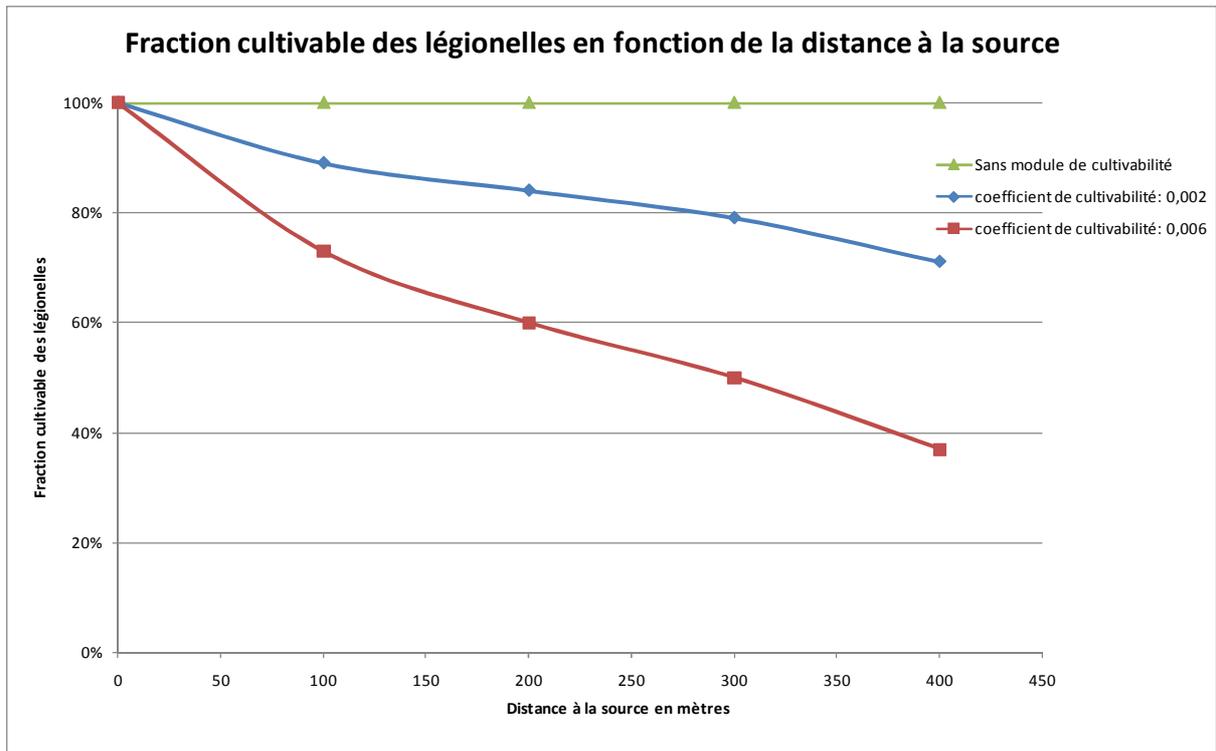


Figure 28: Pourcentage de légionelles cultivables aux points 100, 200, 300 et 400 m.

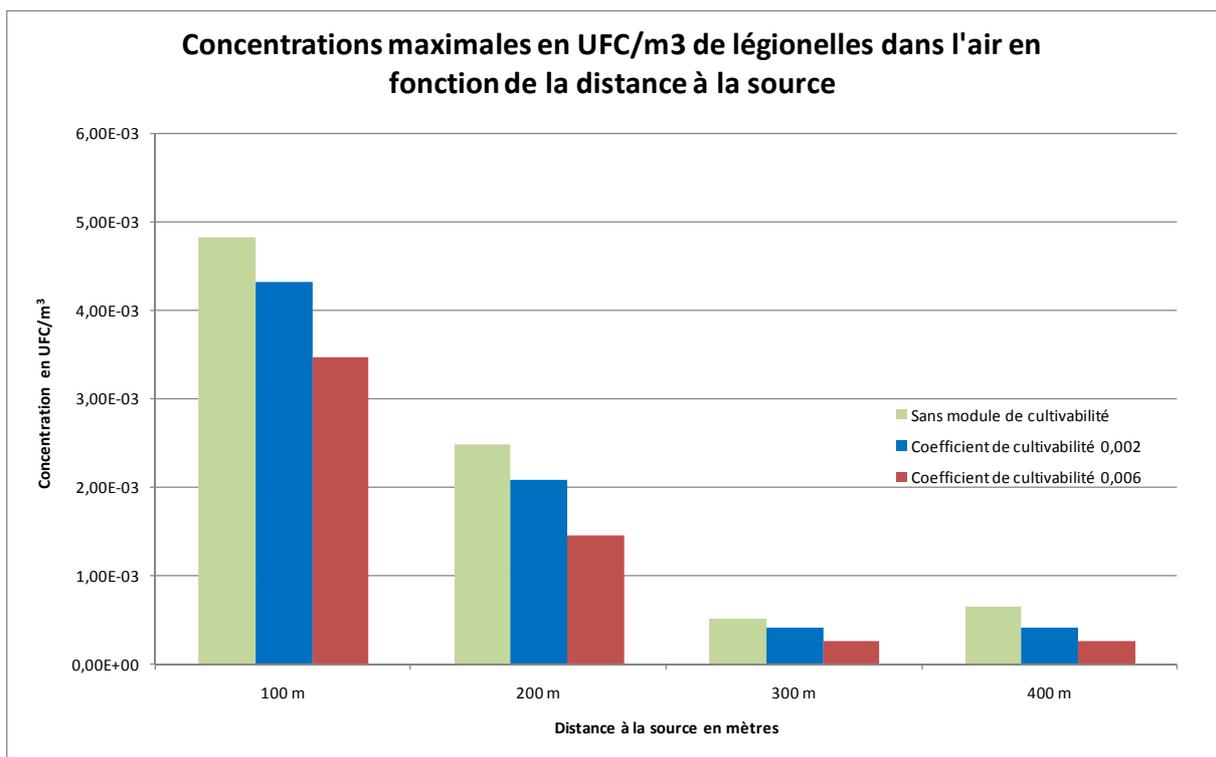


Figure 29 : Pourcentage de légionelles cultivables aux points 100, 200, 300 et 400 m.

Ces résultats montrent que la cultivabilité des légionelles décroît rapidement et qu'à distance de 400 mètres, seules 40% d'entre elles sont encore cultivables avec un coefficient α de 0,006 et 70 % pour $\alpha = 0,002$.

D'autre part la concentration en légionelles par m³ d'air décroît elle aussi rapidement, en effet à 400 m la concentration maximale n'est plus comprise qu'entre 3.10⁻⁴ UFC/m³ ($\alpha = 0,006$) et 6.10⁻⁴ UFC/m³ ($\alpha = 0,002$). Considérant ces valeurs, une personne d'une capacité respiratoire moyenne de 1.2 m³ par heure devrait alors rester exposée en moyenne 58 jours pour inhaler l'équivalent d'une légionelle.

7. CONCLUSION

Les campagnes de dispersions réalisées août 2008 et juin 2009 ont permis d'établir une corrélation entre les données expérimentales et numériques. A partir des données expérimentales seules, nous pouvons d'ores et déjà souligner que la dispersion de microorganismes, s'avère caractéristique au terme source considéré, en termes de granulométrie des aérosols produits et de la concentration microbienne susceptible d'être produite.

Les premières simulations ont montré que l'approche par la modélisation était pertinente pour identifier les zones d'impact du panache émis par la source puisque des bactéries ont été collectées sur chacun des échantillonneurs.

Les résultats obtenus lors de ces campagnes de mesures des bio aérosols atmosphériques ont permis de voir que la modélisation était pertinente pour décrire les phénomènes mis en jeu. On obtient des concentrations du même ordre pour la modélisation et les échantillonneurs compte tenu des incertitudes sur les mesures et de celles inhérentes à la modélisation.

L'intégration d'un modèle biologique décrivant les conditions de survie et de cultivabilité de la légionelle au modèle de dispersion est un apport important sur la connaissance des distances d'impact de cette bactérie. Il montre qu'en simulant une contamination de 10^5 UFC/L en légionelles à l'intérieur d'une tour aérorefrigérante, les concentrations atmosphériques maximales se situent dans les 400 premiers mètres sous le vent de la tour. Ces valeurs sont très faibles et montrent qu'une contamination par des bactéries isolées semble peu probable compte tenu des caractéristiques de la TAR étudiée et la concentration initiale retenue (concentration homogène dans l'eau de la TAR de 10^5 UFC/l).

Des essais pour la détermination d'un coefficient de transfert eau/air des bactéries ont été menés, ils permettent une première approximation de ce coefficient, des études complémentaires s'avèrent cependant nécessaires.

Enfin la modélisation et les mesures terrains ont montré que lorsque la source de dispersion est placée sur un bâtiment, les concentrations en spores mesurées au pied de ce même bâtiment sont relativement importantes. De même un échantillonnage (capteur cyclone) à l'intérieur du bâtiment a montré que lors d'une dispersion (source à 100 m), les phénomènes de « courant d'air » peuvent contaminer l'intérieur des bâtiments.

Il a été constaté lors de cette étude que la différence des résultats obtenus par les différents biocollecteurs est trois fois plus grande sur ces essais en champ libre qu'en environnement maîtrisé. L'amélioration de la métrologie reste donc une voie importante d'amélioration dans l'optique de valider des modèles numériques. Une modélisation de type eulérienne permettant le diagnostic d'un champ de vent instationnaire utilisable en entrée du code MSS permettra cependant une meilleure corrélation des concentrations entre modèle et mesure.

Des études complémentaires sur la dispersion de microorganismes à partir d'une tour aérorefrigérante permettrait d'évaluer le module biologique développé dans MSS, d'améliorer l'efficacité des échantillonnages des bio aérosols et d'affiner le choix des biocollecteurs les plus pertinents.

Au-delà de l'intérêt relatif au plan de lutte contre la légionellose, les moyens expérimentaux développés dans le cadre ce projet pourront être appliqués à d'autres axes stratégiques. L'approche proposée au travers de cette étude pourrait s'ouvrir à la caractérisation et la modélisation d'autres sources de diffusion, à savoir le l'émission d'aérosols biologiques au niveau de stations d'épuration ou de compostage, lors de l'épandage de boues, ou encore par le brassage des lagunages extérieurs.

8. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

André RENOUX - Denis BOULAUD. Physique des aérosols - Techniques de l'Ingénieur. AF3-612.

Ha T.L. (2005). Etude de l'aérosol de *Legionella pneumophila*. Rapport de thèse, Université Paris 12.

Rapport CSTB/DGS (2007) « Etude expérimentale du risque de propagation de légionelles à partir des dispositifs de brumisation ».

Peterson E.W. and Lighthart B., (1977). Estimation of downwind viable airborne microbes from a wet cooling tower – including settling. *Microbial Ecology*, 4: 67-79.

Rouïl L. (2004), Evaluation de la dispersion atmosphérique d'aérosols potentiellement contaminés dans la région de Lens, Rapport de la mission d'appui pour la préfecture du Pas-de-Calais.

Tognet F. (2006), Modélisation : diffusion dans l'atmosphère et identification d'une source de légionelles, Rapport programme 181 pour le Ministère de l'écologie et du développement durable, DRC-06-76476 MECO / Fto n°117.

9. LISTE DES ANNEXES

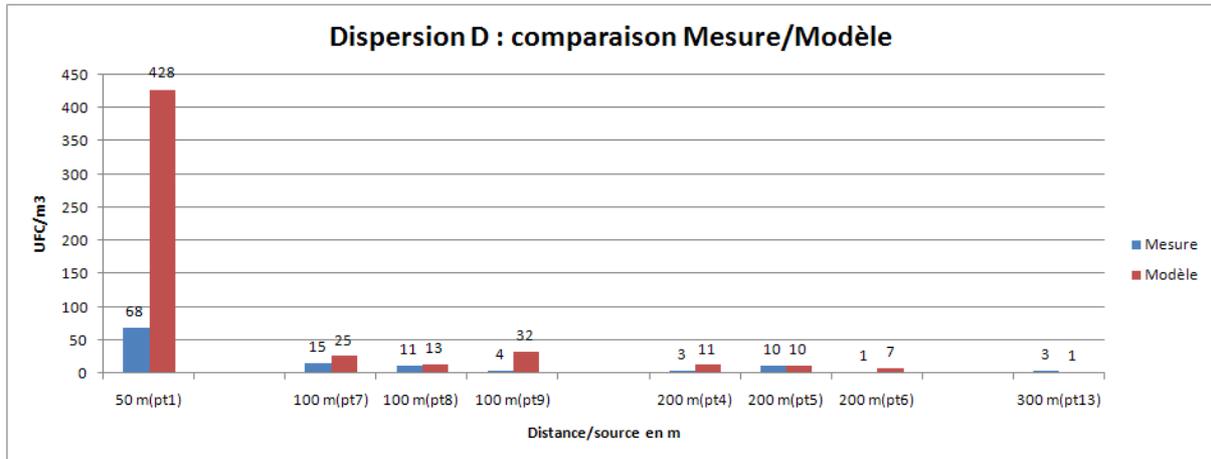
| Repère | Désignation | Nombre de pages |
|---------------|---|------------------------|
| Annexe 1 | Récapitulatif des données obtenues lors des dispersions C, D et E en Juin 2009 | 2 A4 |
| Annexe 2 | Comparaison des concentrations moyenne Mesure/modèle pour les dispersions D | 7 A4 |
| Annexe 3 | Suivis de la concentration atmosphérique de B. globigii durant la dispersion D et E | 2 A4 |
| Annexe 4 | Données constructeur de la TAR | 2 A4 |
| Annexe 5 | Mesure de la granulométrie en sortie de TAR | 3 A4 |
| Annexe 6 | Données de survie des légionelles aérosolisées | 1 A4 |

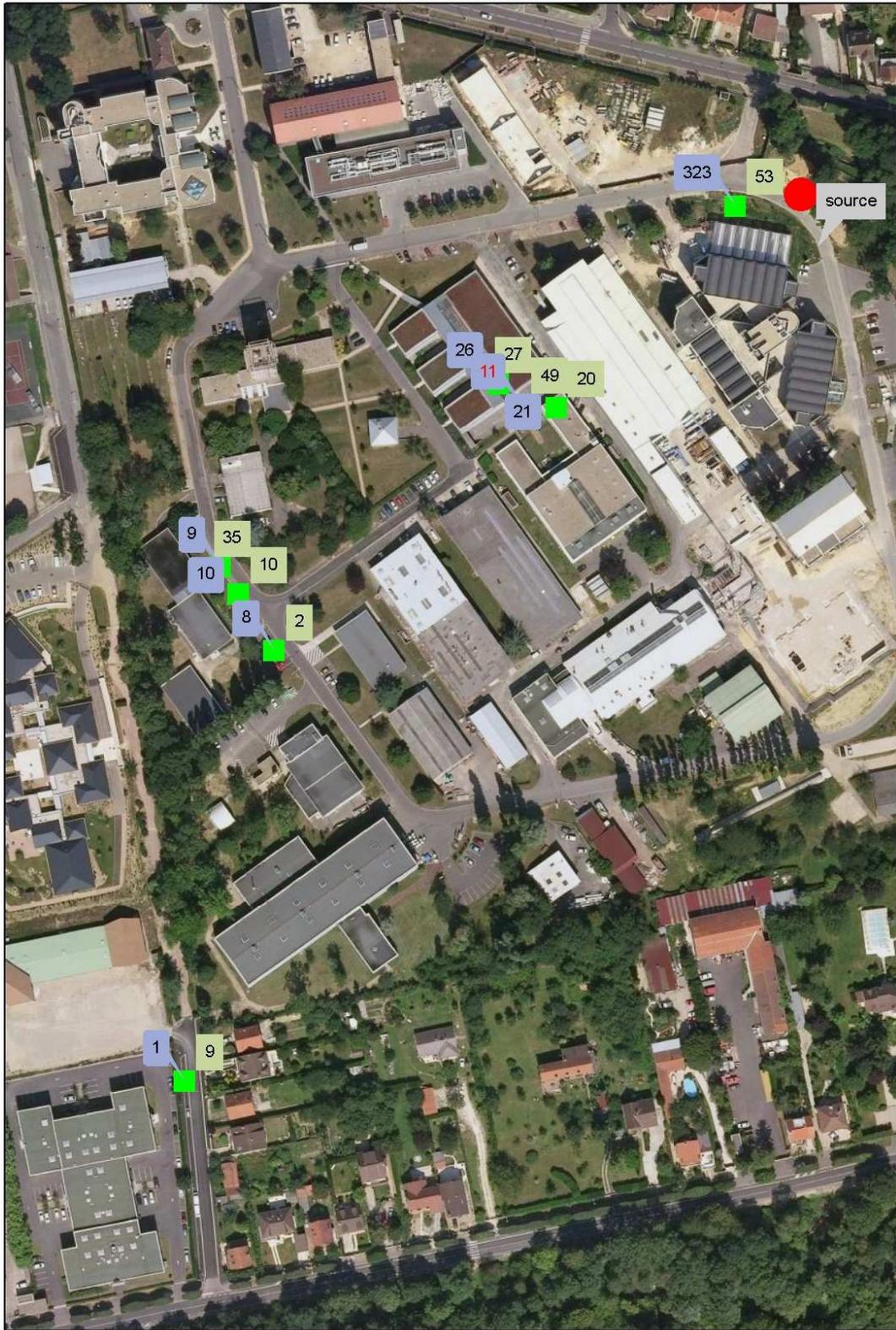
Annexe 1 : Récapitulatif des données obtenues lors des dispersions C, D et E en Juin 2009

| | | Disp C | Disp D | Disp E |
|--|--------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Générateur | Type | Brumisateur | Brumisateur | Brumisateur |
| | Sortie | 8 buses | 8 buses | 8 buses |
| | Volume | 6,4 L | 7 L | 7,6 L |
| | Durée | 22min20sec | 25min04sec | 24min57sec |
| Suspension | Type | | | |
| | Concentration | 4,6E06 ufc/ml | 4,3E06 ufc/ml | 3,1E07 ufc/ml |
| | Dilution | Eau distillée | Eau distillée | Eau distillée |
| Météo | Température | 21 °C | 23 °C | 23 °C |
| | Pression | 1019 hPa | 1018 hPa | 1017 hPa |
| | Humidité | 35 % | 31 % | 31 % |
| | Direction vent | 59 degrés | 76 degrés | 54 degrés |
| | Vitesse vent | 2,5 m/s | 3,4 m/s | 2,8 m/s |
| Biocollecteurs sur géloses (NMAD en µm Conc en # / m³) | NMAD-50m | 1,7 | 1,7 | 1,5 |
| | NMAD-100m | 1,7 | 1,7 | 1,5 |
| | NMAD-200m | 1,7 | 1,7 | 1,5 |
| | C25mn AND-50 | 6672 | 2016 | 51296 |
| | C25mn AND-100 | 687 | 277 | 35994 |
| | C25mn AND-200 | 144 | 85 | 15712 |
| | Cmax NBss-50 | - | - | - |
| | Cmax NBss-100 | 233 | 189 | 2795 |
| | Cmax NBss-200 | 87 | 164 | 1013 |
| | C25mn NBss-50 | - | - | - |
| | C25mn NBss-100-P1 | 43 | 59 | 1148 |
| | C25mn NBss-100-P2 | 79 | 41 | 584 |
| | C25mn NBss-100-P3 | 32 | 15 | 230 |
| | C25mn NBss-200-P1 | 3 | 10 | 268 |
| | C25mn NBss-200-P2 | 16 | 39 | 520 |
| | C25mn NBss-200-P3 | 35 | 5 | 122 |
| | C10mn AirT-100-P1 | 238 | 272 | > 400 |
| | C10mn AirT-100-P2 | 395 | 386 | > 400 |
| | C10mn AirT-100-P3 | 1 | 216 | > 400 |
| | C10mn AirT-200-P2 | 104 | 108 | > 400 |
| C10mn NBss-100-P1 | 26 | 97 | 1260 | |
| C10mn NBss-100-P2 | 78 | 46 | 563 | |
| C10mn NBss-100-P3 | 45 | 19 | 152 | |
| C10mn NBss-200-P2 | 18 | 40 | 494 | |

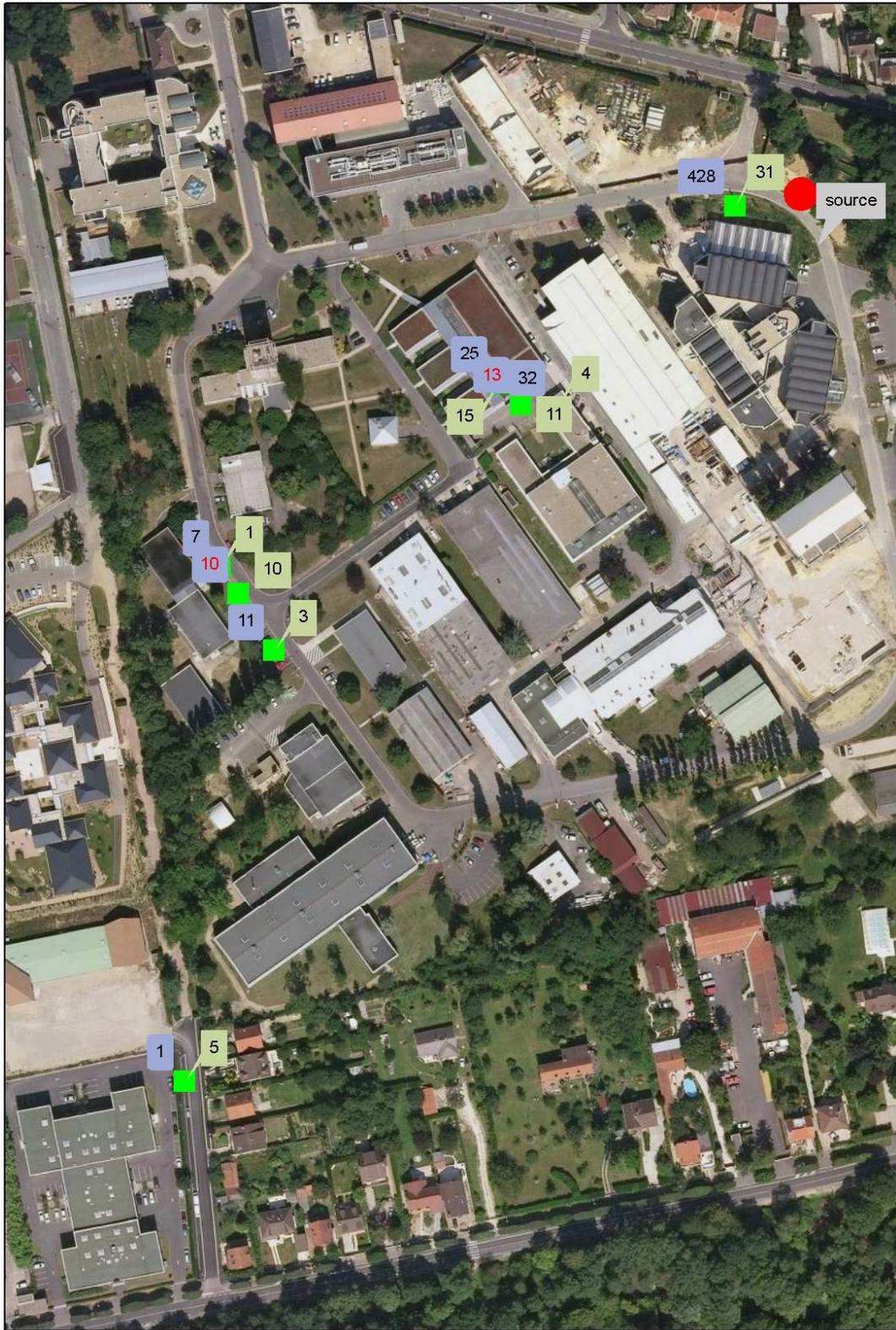
| | | | | | |
|---|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|
| Biocollecteurs en liquide (Concentration en ufc / m³) | C25mn CYC-100 | 201 | 156 | 1550 | |
| | C25mn CYC-200 | 35 | 22 | 131 | |
| | C25mn CYC-300 | 56 | 31 | 717 | |
| | C25mn SKC-100-P1 | 835 | 449 | > 1300 | |
| | C25mn SKC-100-P2 | 662 | 535 | > 1300 | |
| | C25mn SKC-100-P3 | 691 | 592 | > 1300 | |
| | C25mn SKC-200-P2 | 266 | 150 | > 1300 | |
| Comparaison biocollecteurs en 100-P2 sur 25 min | NBss / AND | 0,115 | 0,148 | And saturé | NBss / CYC 0,38 |
| | CYC / AND | 0,293 | 0,563 | And saturé | |
| | SKC / AND | 0,964 | 1,930 | And et SKC saturés | |
| | AirT / AND | 0,582 | 1,242 | And et AirT saturés | |
| Comparaison biocollecteurs en 200-P2 sur 25 min | NBss / AND | 0,111 | 0,459 | And saturé | NBss / CYC 3,97 |
| | CYC / AND | 0,243 | 0,259 | And saturé | |
| | SKC / AND | 1,844 | 1,762 | And saturé | |
| | AirT / AND | 0,642 | 1,239 | And et AirT saturés | |
| Comparaison NBss / SKC sur 25 min | 100-P1 | 0,051 | 0,131 | SKC saturé | |
| | 100-P2 | 0,119 | 0,077 | SKC saturé | |
| | 100-P3 | 0,046 | 0,025 | SKC saturé | |
| | 200-P2 | 0,060 | 0,260 | SKC saturé | |
| Comparaison NBss / AirT sur 10 min | 100-P1 | 0,109 | 0,357 | AirT saturé | |
| | 100-P2 | 0,197 | 0,119 | AirT saturé | |
| | 100-P3 | 45,000 | 0,088 | AirT saturé | |
| | 200-P2 | 0,173 | 0,370 | AirT saturé | |
| Ratios 50/100/200/300 en P2 sur 25 min | AND | 9,71 / 1 / 0,210 / - | 7,28 / 1 / 0,307 / - | And saturé | |
| | NBss | - / 1 / 0,203 / - | - / 1 / 0,951 / - | - / 1 / 0,890 / - | |
| | AirT (10min) | - / 1 / 0,263 / - | - / 1 / 0,280 / - | AirT saturé | |
| | SKC | - / 1 / 0,401 / - | - / 1 / 0,280 / - | SKC saturé | |
| | CYC | - / 1 / 0,174 / 0,279 | - / 1 / 0,141 / 0,199 | - / 1 / 0,085 / 0,463 | |
| Ratios P1/P2/P3 à 100 m sur 25 min | NBss | 0,544 / 1 / 0,405 | 1,439 / 1 / 0,366 | 1,966 / 1 / 0,394 | |
| | SKC | 1,261 / 1 / 1,043 | 0,841 / 1 / 1,108 | SKC saturé | |
| Ratios P1/P2/P3 à 200 m sur 25 min | NBss | 0,188 / 1 / 2,188 | 0,256 / 1 / 0,128 | 0,515 / 1 / 0,235 | |
| | | | | | |
| Pb mise en œuvre instrumentation | | | | | |
| Valeurs estimées ou approximatives | | | | | |

Annexe 2 : Comparaison des concentrations moyenne Mesure/modèle pour les dispersions D

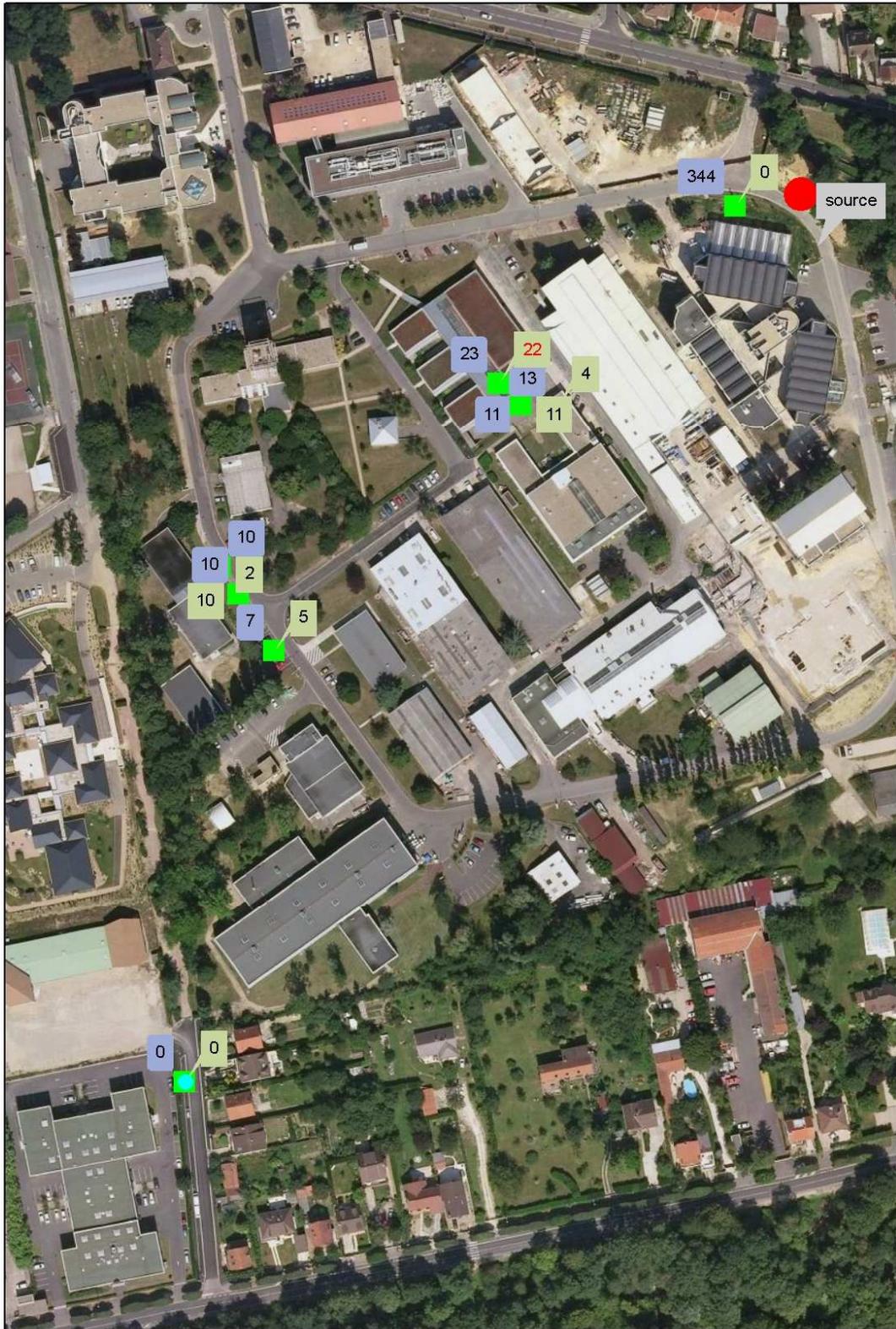




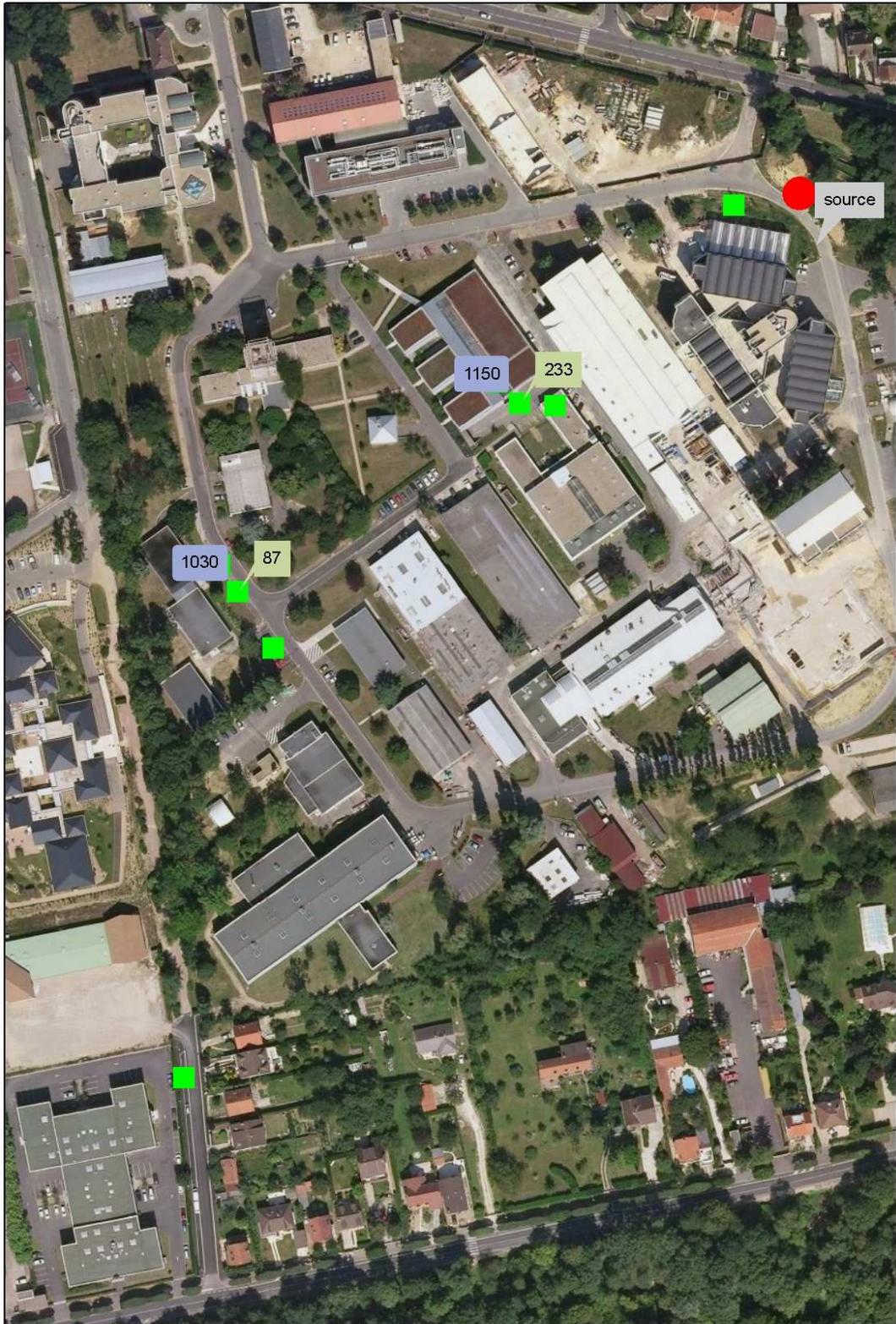
Concentrations mesurées (bleu) / modélisées (vert) pour la dispersion C (les points verts clairs représentent les points d'échantillonnage)



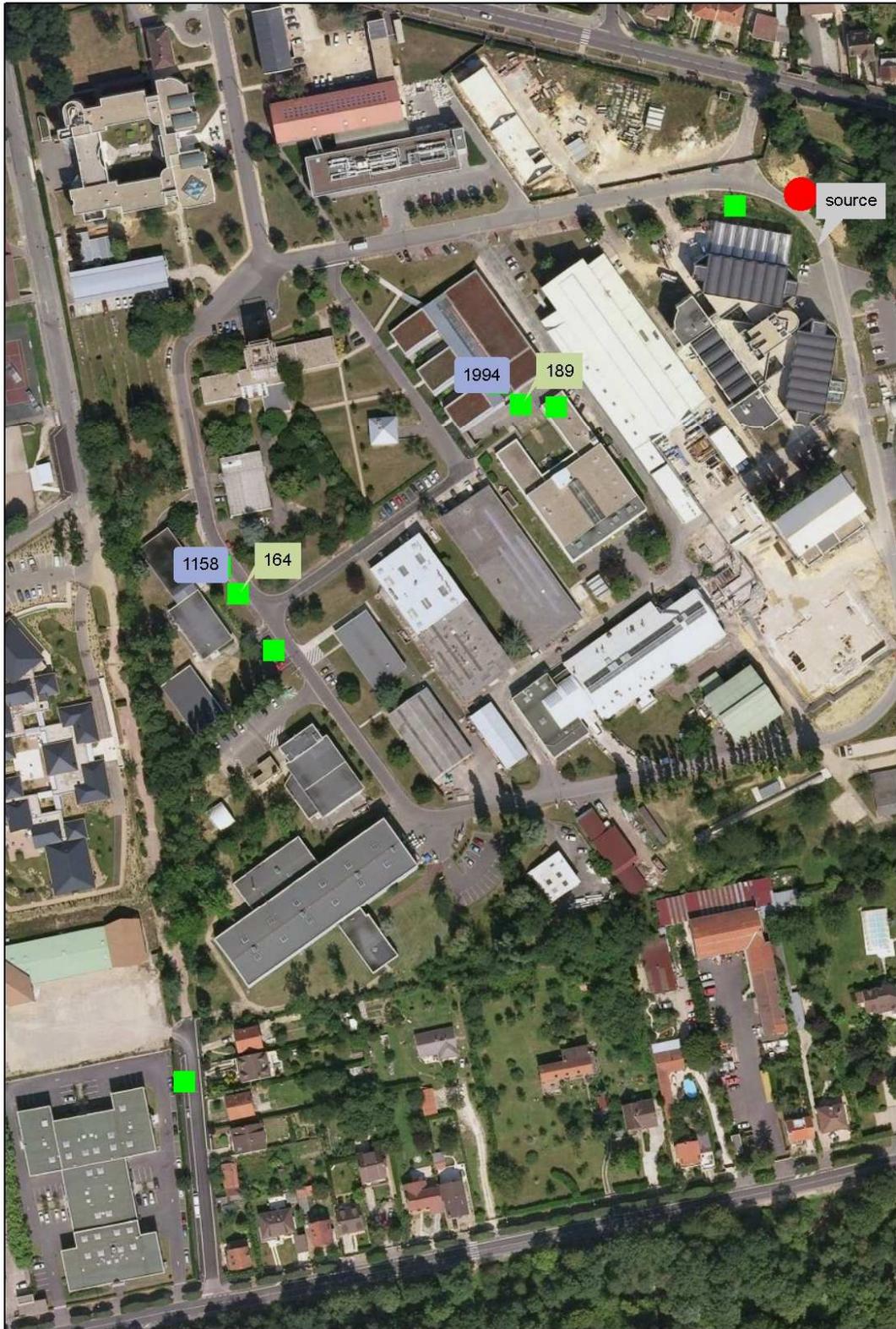
Concentrations mesurées (bleu) / modélisées (vert) pour la dispersion D (les points verts clairs représentent les points d'échantillonnage)



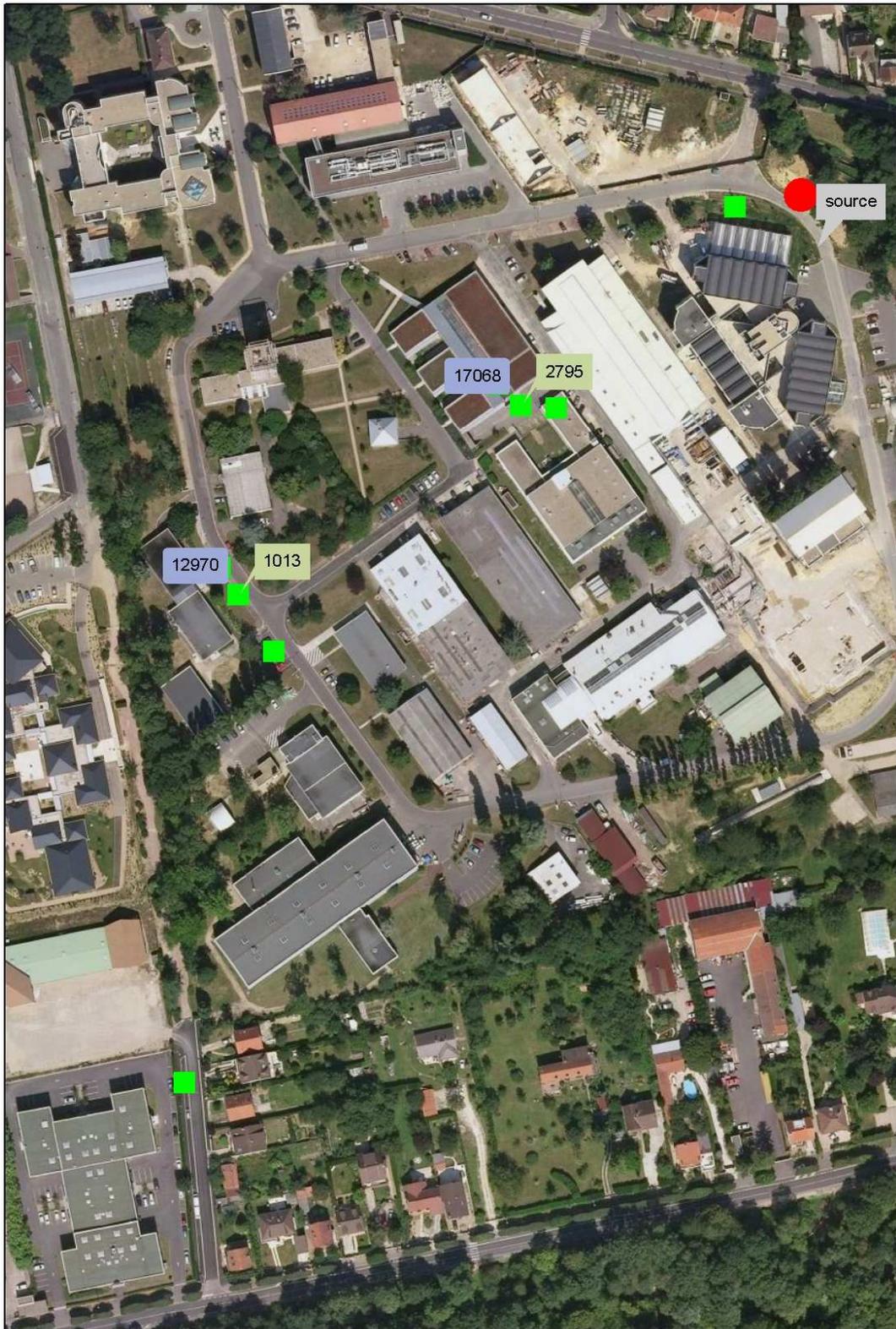
Concentrations mesurées (bleu) / modélisées (vert) pour la dispersion E (les points verts clairs représentent les points d'échantillonnage)



Dispersion C, concentration maximale en spores aux point 100 et 200 m (en bleu les valeurs obtenues par modélisation ; en vert pâle les valeurs mesurées)

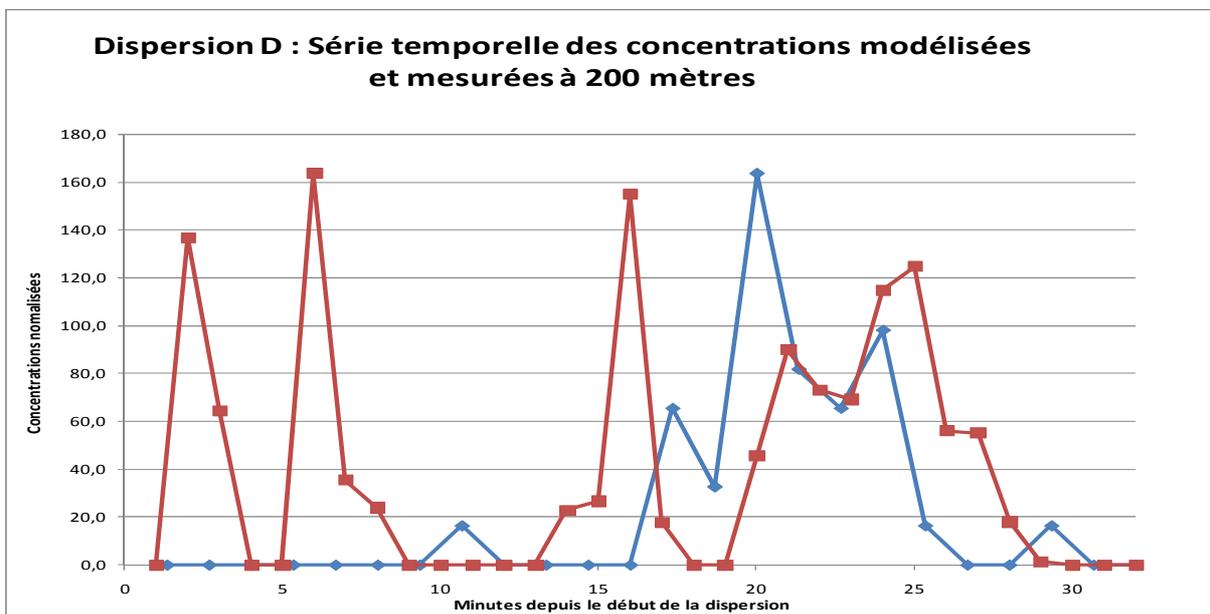
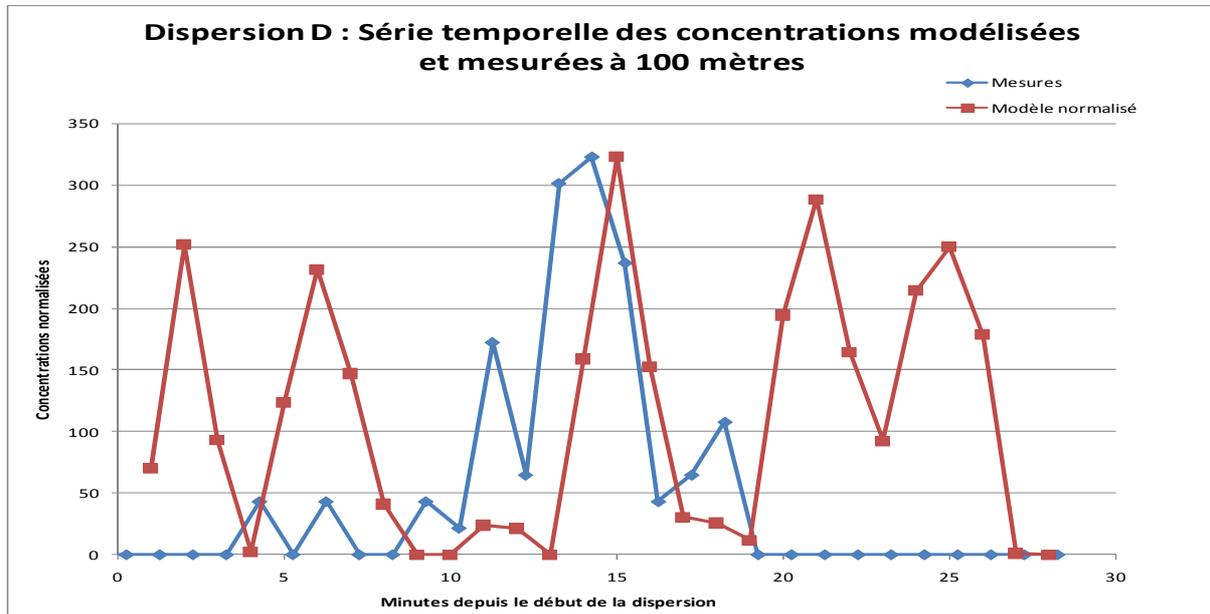


Dispersion D, concentration maximale en spores aux point 100 et 200 m (en bleu les valeurs obtenues par modélisation ; en vert pâle les valeurs mesurées)

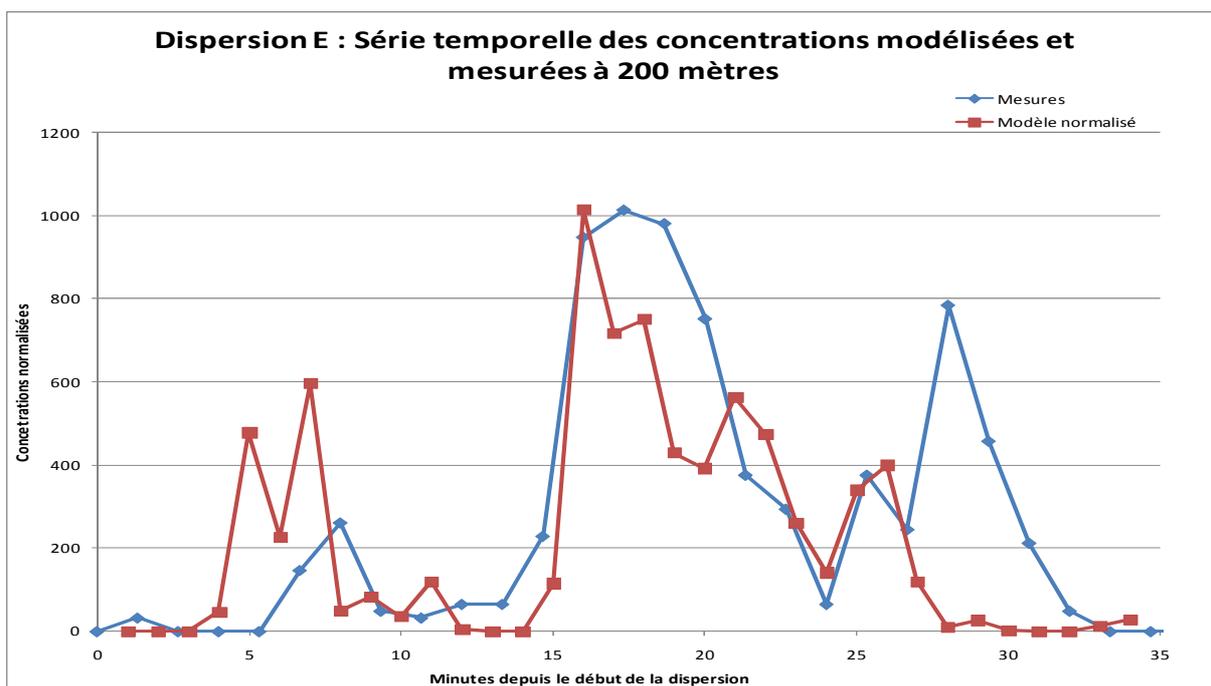
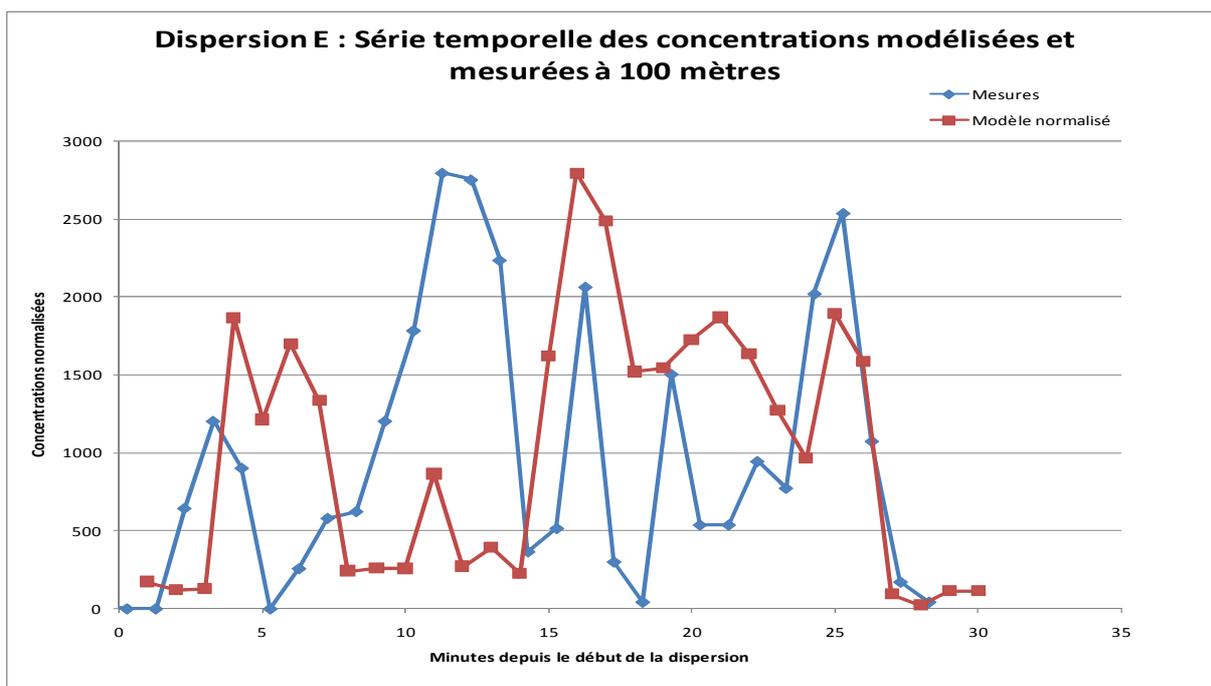


Dispersion E, concentration maximale en spores aux point 100 et 200 m (en bleu les valeurs obtenues par modélisation ; en vert pâle les valeurs mesurées)

Annexe 3 : Suivis de la concentration atmosphérique de *B. globigii* durant la dispersion D et E



Suivis de la concentration atmosphérique de *B. globigii* durant la dispersion D du 26/06/2009 à 100 et 200 m



Suivis de la concentration atmosphérique de B. globigii durant la dispersion E du 26/06/2009 à 100 et 200 m

Annexe 4 : Données constructeur de la TAR

Données techniques pour 1 VXT 015

Accessoires Principaux :

DONNEES THERMIQUES

| | |
|---|---------------|
| Puissance calorif. à évac. (globale/unit.) (@ 100% TPM)..... | 77 / 77 kW |
| Puissance calorif. à évac. max. (globale/unit.) (@ 100% TPM)..... | 77 / 77 kW |
| Fluide..... | H2O |
| Débit de fluide (global/unitaire)..... | 3.7 / 3.7 l/s |
| Débit de fluide max. (global/unitaire)..... | 3.7 / 3.7 l/s |
| Température de l'air au bulbe humide..... | 21.0°C |
| Température de l'air au bulbe sec..... | 31.0 °C |
| Température d'entrée du fluide..... | 32.0 °C |
| Température de sortie du fluide..... | 27.0 °C |
| Operating Mode..... | Wet |

DONNEES PHYSIQUES (accessoires inclus) (UNITAIRE)

| | |
|--|------------------------|
| Longueur (globale)..... | 914 mm |
| Unité standard..... | 914 mm |
| Largeur (globale)..... | 1207 mm |
| Unité standard..... | 1207 mm |
| Hauteur (globale)..... | 2036 mm |
| Unité standard..... | 2036 mm |
| Poids à vide / en opération..... | 330 / 410 kg |
| Unité standard..... | 330 / 410 kg |
| Poids de l'élément le plus lourd..... | 330 kg |
| Diamètre d'entrée..... | (1x)ND 80 mm |
| Diamètre de sortie..... | (1x)ND 80 mm |
| Diamètre du trop plein..... | (1x)ND 50 mm |
| Diamètre d'eau d'appoint..... | (1x)ND 25 mm |
| Diamètre de la vidange..... | (1x)ND 50 mm |
| Diamètre de la connexion d'égalisation..... | ~txtEqualizingDiam~ mm |
| Diamètre de la purge de déconcentration..... | ~txtExtraConnDiam~ mm |

DONNEES AERODYNAMIQUES (UNITAIRE)

| | |
|---------------------------------------|---------------|
| Débit d'air (100% TPM /100% TPM)..... | 1.9 /1.9 m3/s |
| Moteur ventilateur (quantité)..... | 1 |
| Type de ventilateur..... | Centrifugal |

Vitesse du ventilateur.....667.0 TPM

DONNEES HYDRAULIQUES

Perte de charge totale (@3.7 / 3.7 l/s)8 / 8 kPa

Unité standard.....8 / 8 kPa

Evaporation max.0,03 / 0,03 l/s

Volume de bassin en opération.....45 l

Volume de bassin jusqu'au trop plein.....100 l

MESURES avec le GRANULOMETRE WELAS

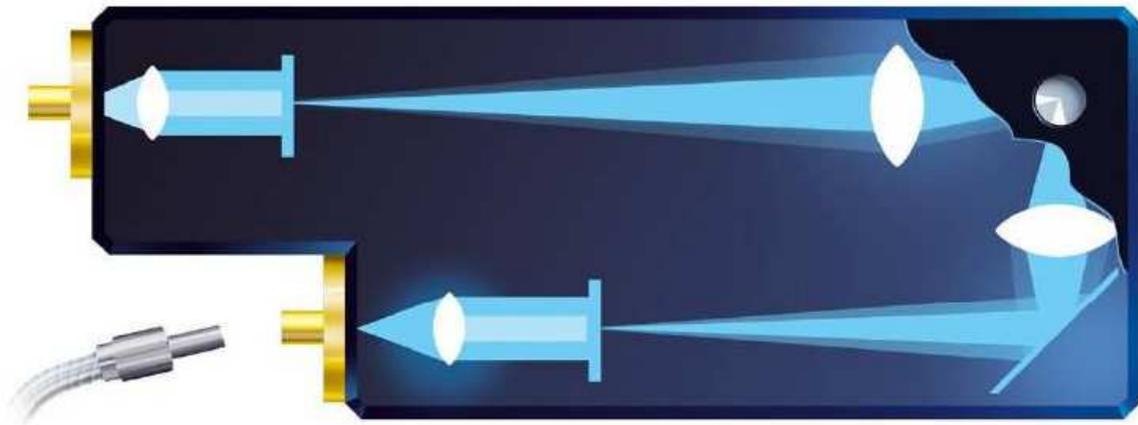
Présentation du granulomètre WELAS



Boîtier d'analyse et tête de mesure (déportable)



Tête de mesure (avec fibres optiques pour transmettre les données de mesures)



Tête de mesure (écorché)

Principe de mesure

Eclairage des particules par une lumière blanche puis mesure de l'intensité lumineuse émise par ces mêmes particules sous un angle de 90 degrés.

D'après la théorie de Mie, l'utilisation d'une source poly chromatique permet une relation univoque entre la puissance diffusée et la taille des particules (pour un indice de réfraction et une morphologie donnés).

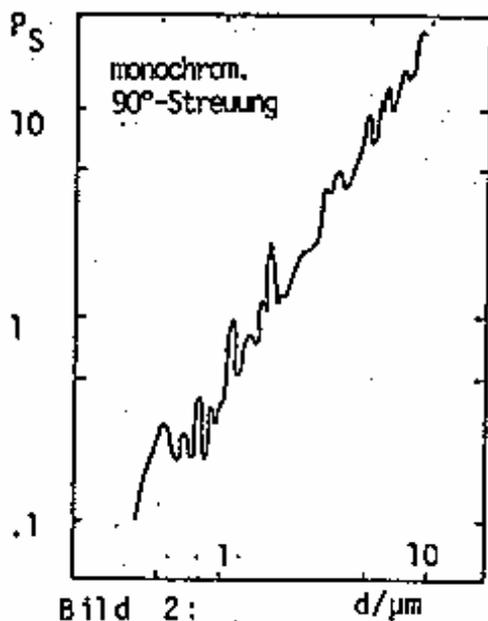


Bild 2:
nach /15/

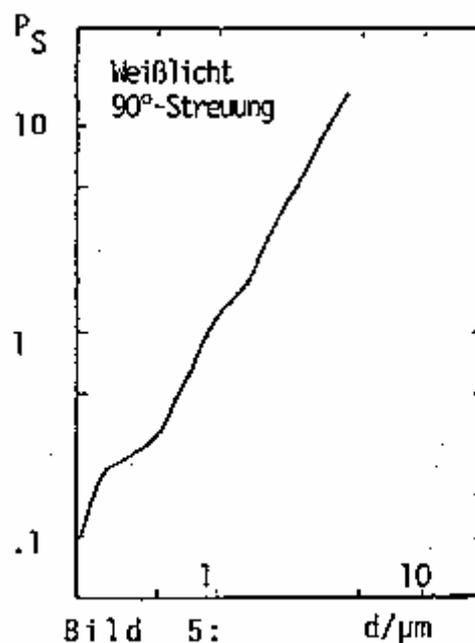
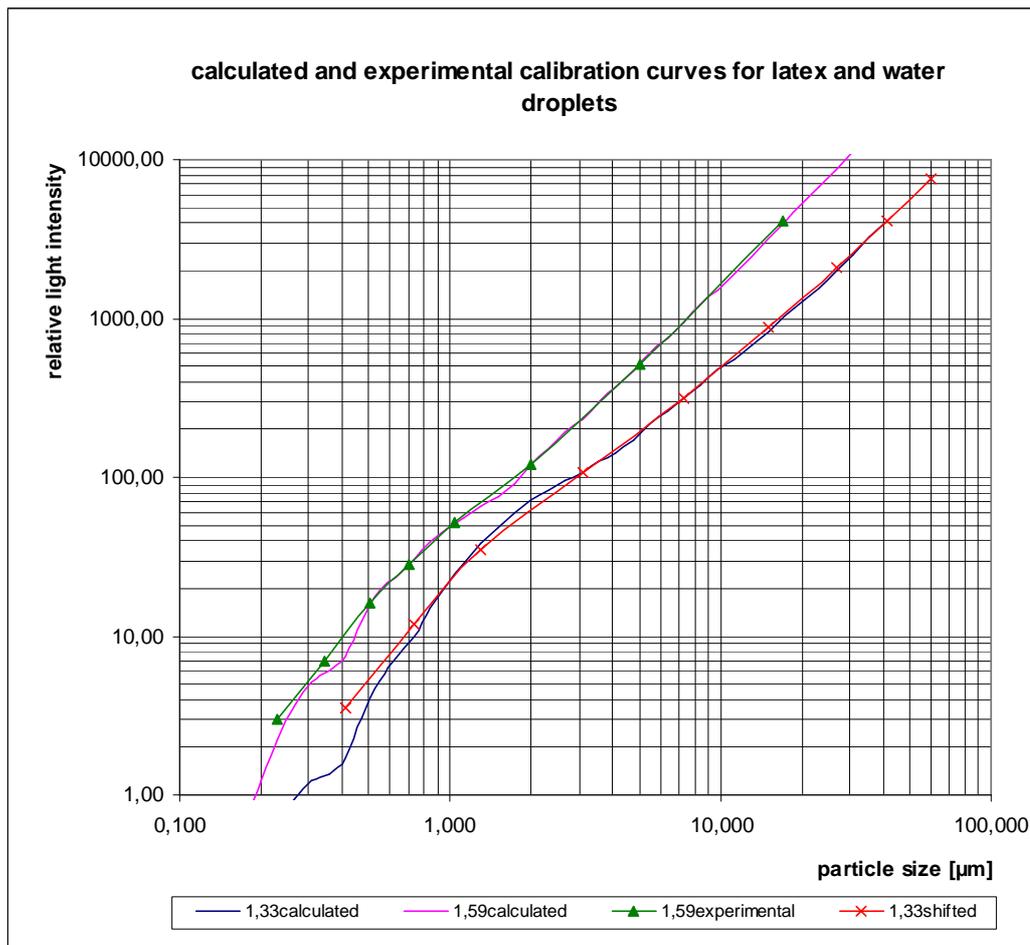


Bild 5:
nach /15/

Un étalonnage réalisé en usine permet de relier une puissance lumineuse mesurée au diamètre de billes de latex (d'indice de réfraction 1,59).

Lors d'une mesure de particules quelconque, les dimensions obtenues sont donc des diamètres équivalents "optique". Plus précisément, il s'agit du diamètre d'une bille d'indice de réfraction 1,59 qui fournirait la même puissance diffusée que la particule analysée.

Dans le cas de particules sphériques (telles que des gouttes d'eau, si leur vitesse est suffisamment faible pour négliger d'éventuelles déformations), il est possible



d'effectuer une correction d'indice de réfraction pour revenir à un diamètre "vrai".

Caractéristiques principales

Débit d'air aspiré : 5 L/min

Vitesse de l'air capté : 4,2 m/s

Débit d'air analysé : 1,5 mL/min

Analyse individuelle des particules : données de base en "nombre", transformable en "surface" et en volume (particules supposées sphériques) ou en "masse" (densité à fournir).

Dimensions approximatives d'une tête de mesure : 5 x 10 x 25 cm

Gamme (en diamètre équivalent "latex") : 0,2 à 40 µm (32 canaux par décades)

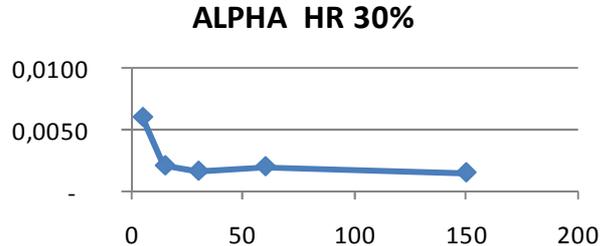
Annexe 6 : Données de survie des légionelles aérosolisées

Survie de l'aérosol de légionelles en fonction de l'hygrométrie à T=20°C - Résultats normés à partir du t=0.

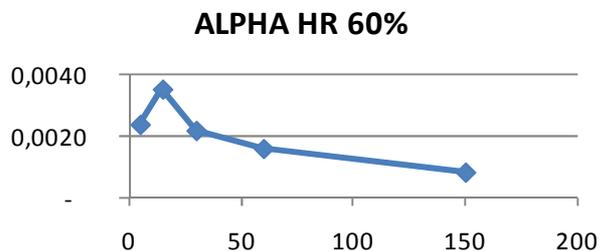
| | Temps (min) | Légionelles cultivables |
|---------------|-------------|-------------------------|
| HR=30% | 0 | 100,0% |
| | 5 | 15,9% |
| | 15 | 15,0% |
| | 30 | 5,0% |
| | 60 | 0,1% |
| | 150 | 0,0% |
| HR=60% | 0 | 100,0% |
| | 5 | 48,7% |
| | 15 | 4,1% |
| | 30 | 1,9% |
| | 60 | 0,3% |
| | 150 | 0,1% |
| HR=95% | 0 | 100,0% |
| | 5 | 36,5% |
| | 15 | 8,8% |
| | 30 | 13,4% |
| | 60 | 0,9% |
| | 150 | 1,0% |

| | Temps (h) | Légionelles viables | ET |
|---------------|---------------|---------------------|--------|
| HR=30% | 0 | 100,0% | 15,4% |
| | 2 | 95,2% | 10,6% |
| | 4 | 99,3% | 19,1% |
| | 17 | — | — |
| | 70 | 113,2% | 8,9% |
| | 96 | — | — |
| | HR=60% | 0 | 100,0% |
| 2 | | — | — |
| 4 | | 74,8% | 11,1% |
| 17 | | 81,5% | 7,5% |
| 70 | | 83,5% | 5,3% |
| 96 | | 87,5% | 10,2% |
| HR=95% | 0 | 100,0% | 5,1% |
| | 2 | 89,2% | 9,2% |
| | 4 | 91,8% | 8,9% |
| | 17 | 30,1% | 10,9% |
| | 70 | 14,2% | 9,6% |
| | 96 | — | — |

| HR30% | Minute | ALPHA HR 30% |
|-------|--------|--------------|
| | 5 | 0,0061 |
| | 15 | 0,0021 |
| | 30 | 0,0017 |
| | 60 | 0,0020 |
| | 150 | 0,0015 |



| HR60% | Minute | ALPHA HR 60% |
|-------|--------|--------------|
| | 5 | 0,0024 |
| | 15 | 0,0036 |
| | 30 | 0,0022 |
| | 60 | 0,0016 |
| | 150 | 0,0008 |



| HR95% | Minute | ALPHA HR 95% |
|-------|--------|--------------|
| | 5 | 0,0034 |
| | 15 | 0,0027 |
| | 30 | 0,0011 |
| | 60 | 0,0013 |
| | 150 | 0,0005 |

