

L'ADN environnemental ne manque pas d'air

*(ou : L'ADN environnemental est dans le vent)*

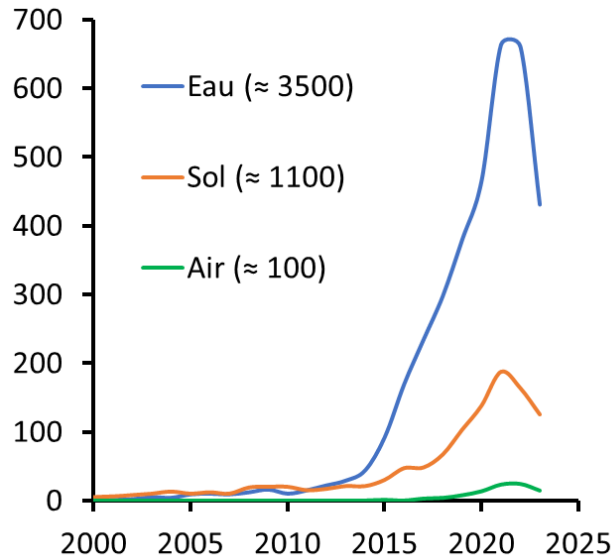
Yves Brunet

UMR1391 ISPA, INRAE Bordeaux



# ADNe aérien : un monde négligé ?

"environmental DNA" OR metabarcoding  
(WOS)



« *The scientific community [of environmental microbiologists] can be approximately divided between scientists working on **soil** and those working on **aquatic environments**. »*

Taberlet et al., 2012, *Mol. Ecol.*

Une revue sur l'« eDNA metabarcoding » : **2** références sur **209** portent sur l'air (pathogènes des plantes, pollen allergène)

Deiner et al., 2017, *Mol. Ecol.*

Une revue « systématique » sur l'« eDNA metabarcoding » : **6** références sur **203** portent sur l'air (suivi de la qualité de l'air : pollen, champignons)

« *Microbes and pollen can be easily collected from the air.* »

Ruppert et al., 2019, *Glob. Ecol. Conserv.*

# ADNe aérien : les bioaérosols

**Bioaérosols** : particules d'origine biologique en suspension dans l'air  
**Aérobiome** : ensemble des bioaérosols présents en un lieu et à un moment donnés

## Organismes vivants

- Bactéries, virus, microalgues, champignons unicellulaires

*Champ de recherche bien établi (surtout bactéries)*  
*Biodiversité, fonctionnement, maladies...*  
*Metabarcoding relativement courant*

## Propagules

- Pollen, spores

*Génétique (écologie, dispersion OGM)*  
*Pathologie végétale*  
*Allergies (pollen, moisissures...)*  
*Metabarcoding plus récent (identification, biodiversité)*

## Fragments

- Excrétions, cellules, fragments de tissus, peau, cheveux...

*Plus récent (plantes, animaux)*  
*En plein développement*

A  
É  
R  
O  
B  
I  
O  
L  
O  
G  
I  
E

## Aerobiologia

Depuis 1985, 39 volumes

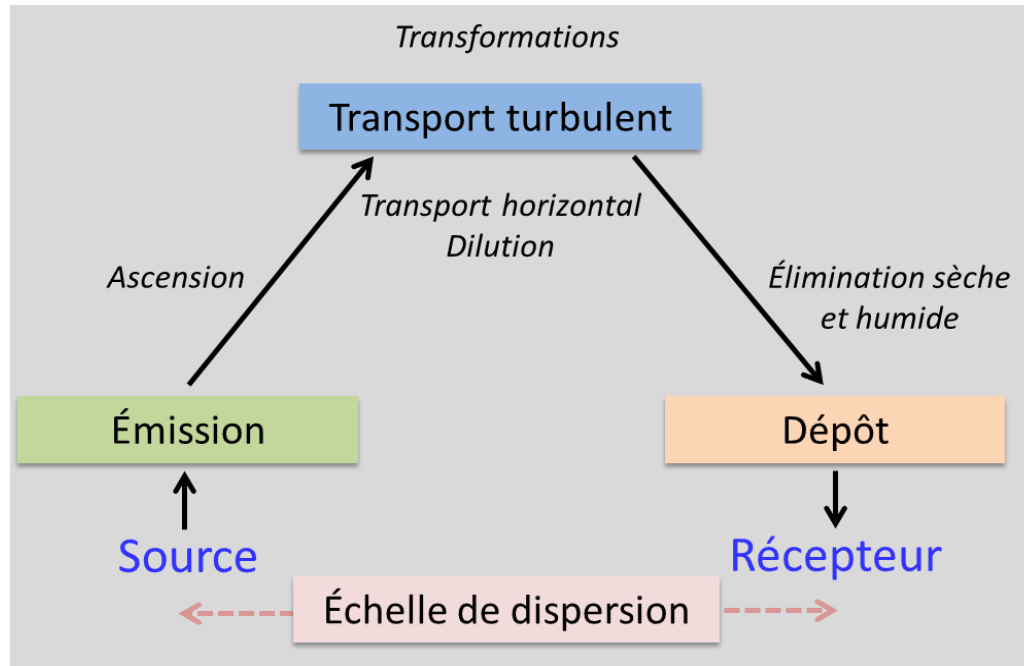


AEROBIOLOGIA  
9 (1993), 5-14

Louis Pasteur: the first experimental aerobiologist

ANNALISA ARIATTI, PAUL COMTOIS

# ADNe aérien : la vie des bioaérosols



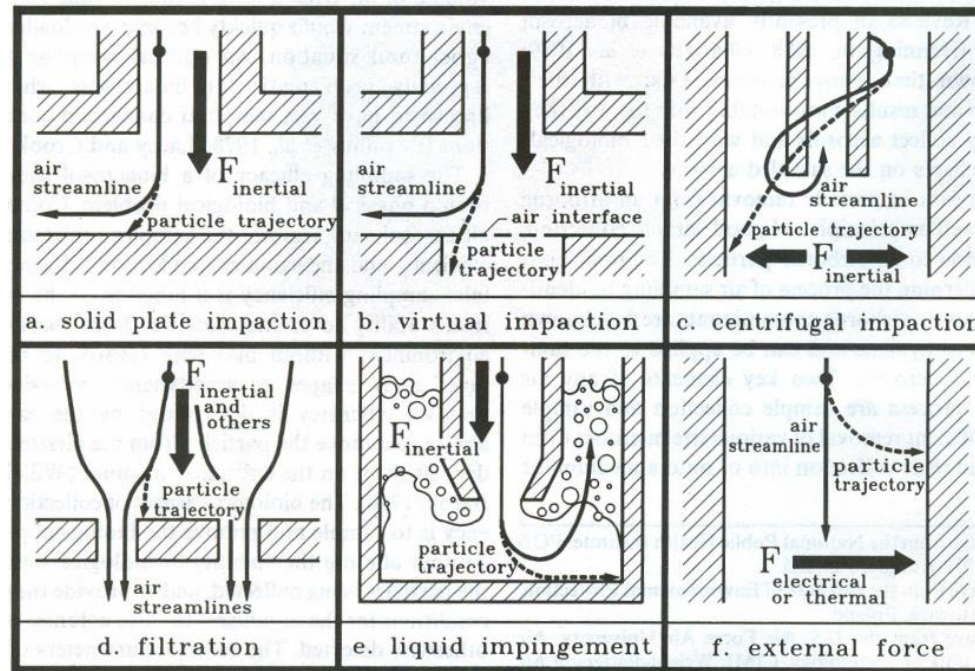
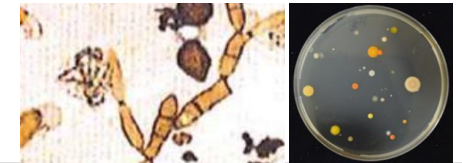
## Ex. : concentrations en bactéries

- Air :  $10^4 - 10^5 \text{ m}^{-3}$
- Feuille :  $10^8 \text{ g}^{-1}$
- Sol :  $10^7 - 10^9 \text{ g}^{-1}$
- Eau marine :  $10^5 - 10^7 \text{ cm}^{-3}$

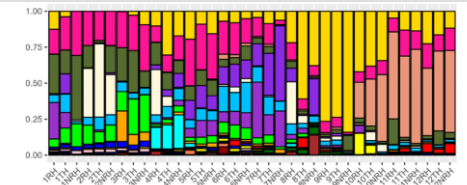
Burrows et al., 2009, *Atmos. Chem. Phys.*

- **Sources** : végétation, sol, eau, animaux, activités anthropiques (compostage, traitement des eaux, hôpitaux...)
- **Transport** : vent, mouvements turbulents, distances courtes (qq mètres), longues (km) ou très longues (1000 km...)
- **Transformation** : vieillissement, dessèchement, réactions physico-chimiques...
- **Dépôt** : gravité, impaction, lessivage...

# ADNe aérien : capture des bioaérosols



- Méthodes naturalistes (microscopie, comptage...)
- PCR, séquençage
- Nouvelles techniques, metabarcoding, NGS...



- Une grande variété de techniques
- Filtre, gel, liquide
- $De \approx < 1 \text{ L/min à } > 1000 \text{ L/min}$

# ADNe aérien : des progrès rapides pour la biodiversité

## Pollen aéroporté

- évaluation précise de la composition spécifique des échantillons, évaluation correcte des genres d'espèces herbacées

Kraaijeveld et al., 2019, *Mol. Ecol. Resour.*

## Plantes à pollinisation entomophile

- détection de matériel génétique de plantes non anémophiles (pas de panache de pollen, mais fragments végétaux)

Johnson et al., 2019, *PLoS ONE*

## Comparaison entre relevés traditionnels et metabarcoding

- DNAe plus efficace : plus grand nombre d'espèces, plus d'espèces invasives, plus rapide et meilleur échantillonnage

Johnson et al., 2021, *BMC Ecol.*

## Nombre d'espèces identifiées

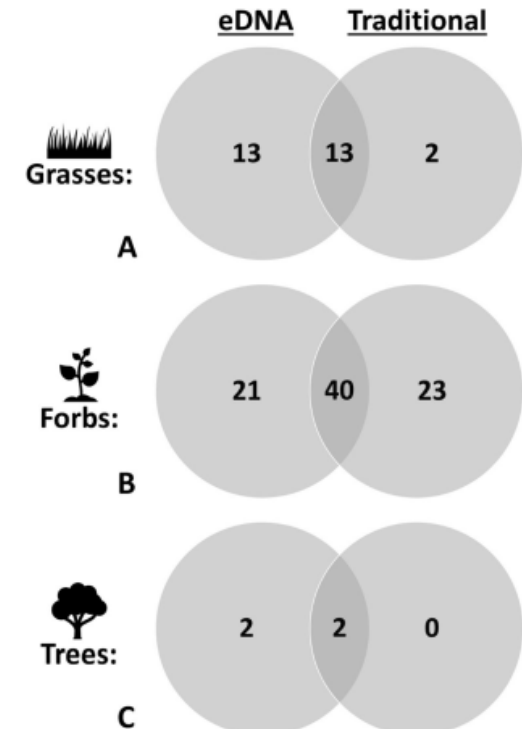


Fig. 5 Venn diagram displaying the number of A grasses, B forbs, C and trees that were found by the eDNA and traditional methods alone and together

# ADNe aérien : des progrès rapides pour la biodiversité

## Diversité des plantes et communautés microbiennes

Effet saison, météo, occupation du sol, urbain/rural, proximité de sources, groupes de co-occurrence...

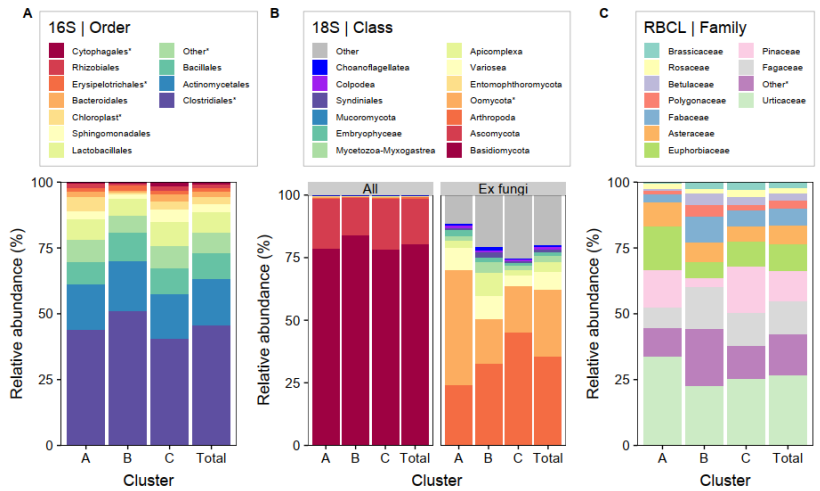
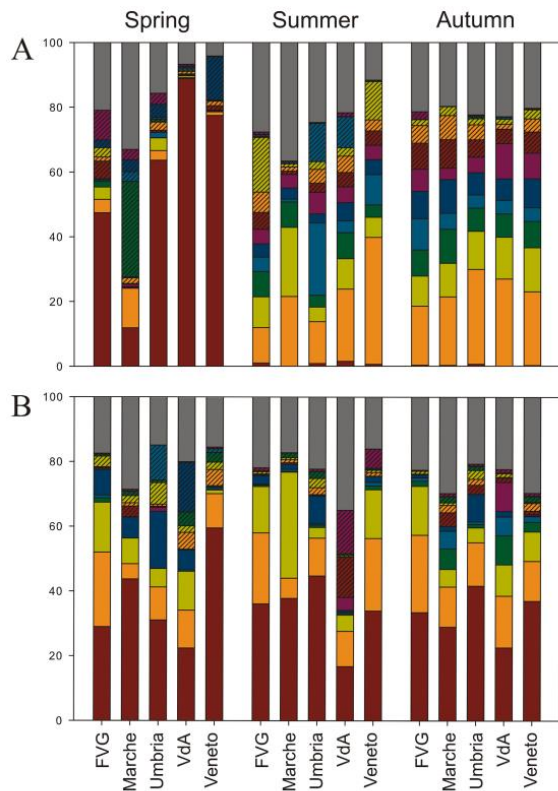


Fig. 1. Relative abundance of the ten most dominant taxonomic groups per marker averaged per weather cluster. Taxa of which the name is followed by an asterisk (\*) were also identified as an indicator taxon for one or more weather clusters (Additional file D). A) Prokaryotic orders, based on 16S; B) eukaryotes classes, based on 18S, including and excluding fungi (Ex fungi); C) plant families, based on rbcL. Weather clusters are clusters of sampling days with broad similarity in weather conditions (see main text and Additional file C).

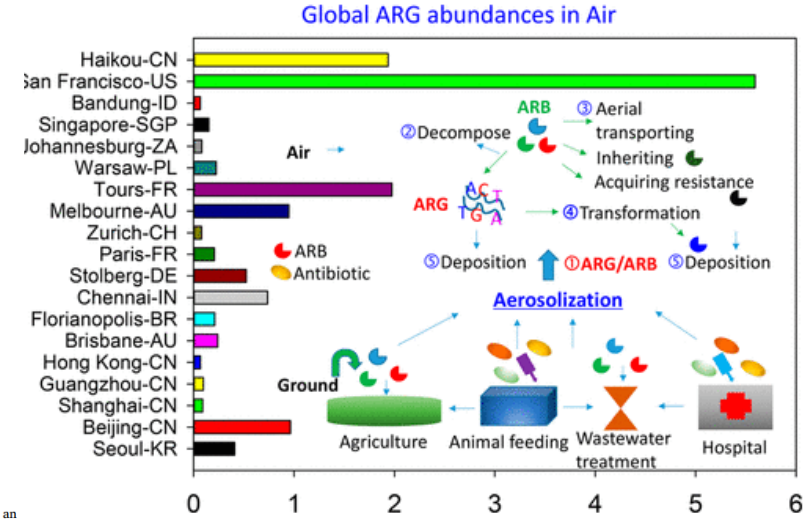


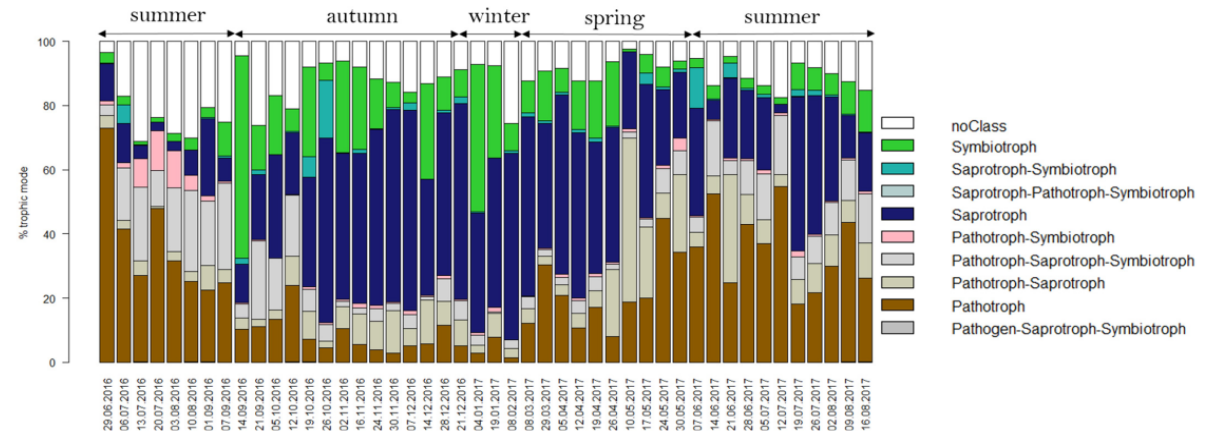
Fig. 4. Taxonomic composition at genus level in the three seasons for the five sampling sites for plants (A) and fungi (B). Abundances of taxa are reported with the percentage values of reads. The most abundant genera are showed (>20% for plants, >10% for fungi), while the less abundant are grouped under "Other".

# ADNe aérien : des progrès rapides pour la biodiversité

## Approches fonctionnelles ( $\neq$ taxonomiques)

- **modes trophiques** d'espèces fongiques  
(prélèvements au sommet du Puy-de-Dôme)

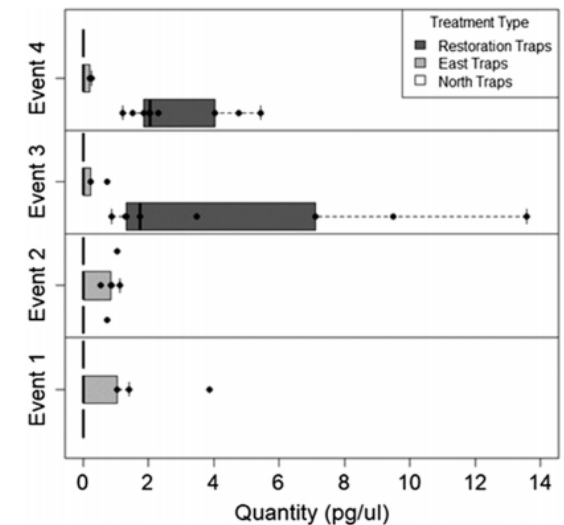
Tignat-Perrier et al., 2020, *Sci. Tot. Environ.*



## Détection de changements d'utilisation des terres

- restauration de parcours avec élimination d'une plante invasive : Honey mesquite (*Prosopis glandulosa*, Fabaceae)

Johnson et al., 2021, *Front. Environ. Sci.*

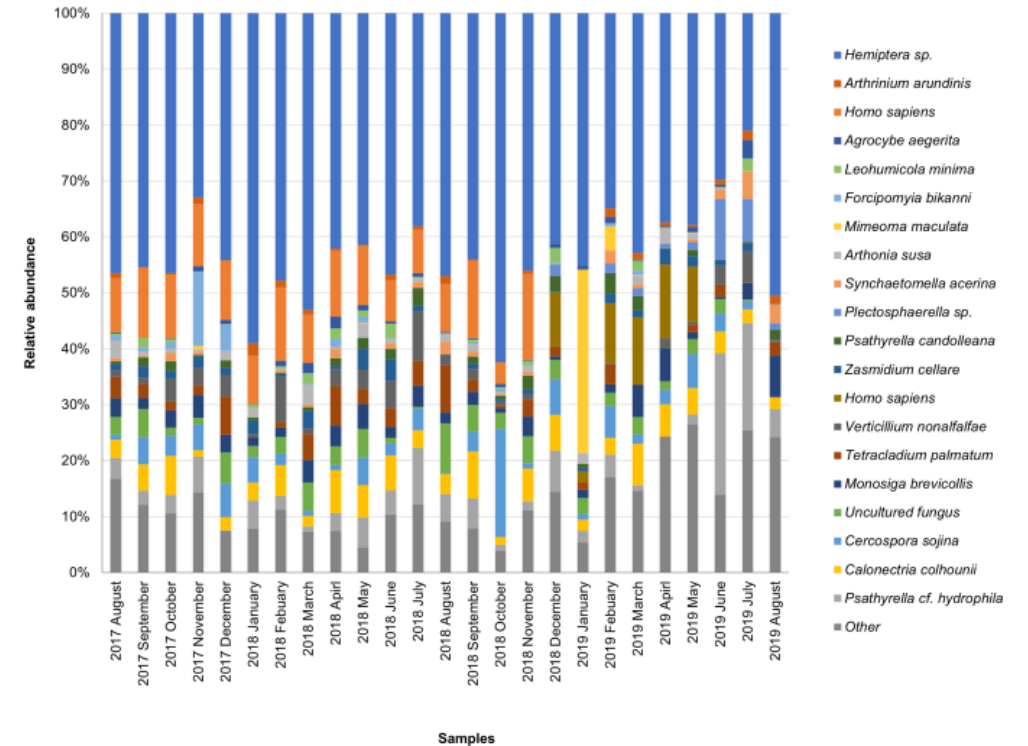




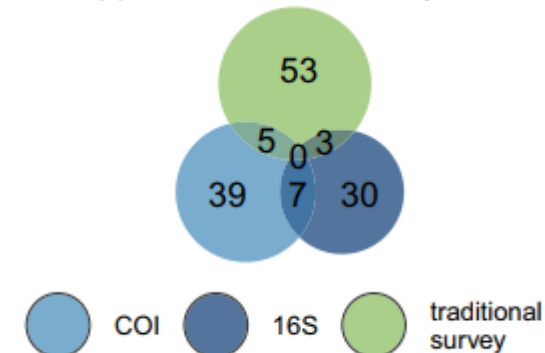
# ADNe aérien : et les insectes ?

## Deux études récentes

- Deux années de prélèvement de poussières sur un toit (campus japonais), filtre, COI, Illumina MiSeq : **315 espèces d'insectes**, dont beaucoup d'hémiptères (Pumkayo et al., 2021, *PeerJ*)
- Quelques jours sur trois sites en Suède (toit campus, paysage rural, parc suburbain), filtre, COI et 16S : **12 ordres d'insectes, 91 espèces d'arthropodes** (Roger et al., 2021, *Environ. DNA*)
- Dans ces études : des insectes, mais pas que !...  
→ bactéries, champignons, vertébrés (grenouilles, oiseaux, mammifères, homme...)



(b) Moth site – all Arthropods



# ADNe aérien : du mammifère dans l'air du labo ?

## Sérotine brune (enceinte fermée)

- Détection ADN de sérotine air/eau/sol (amorces COI)
- Détection ADN non ciblé

Serrao et al., 2021, *Biol. Conserv.*



## Rats-taupés nus (grande pièce et terrier artificiel)

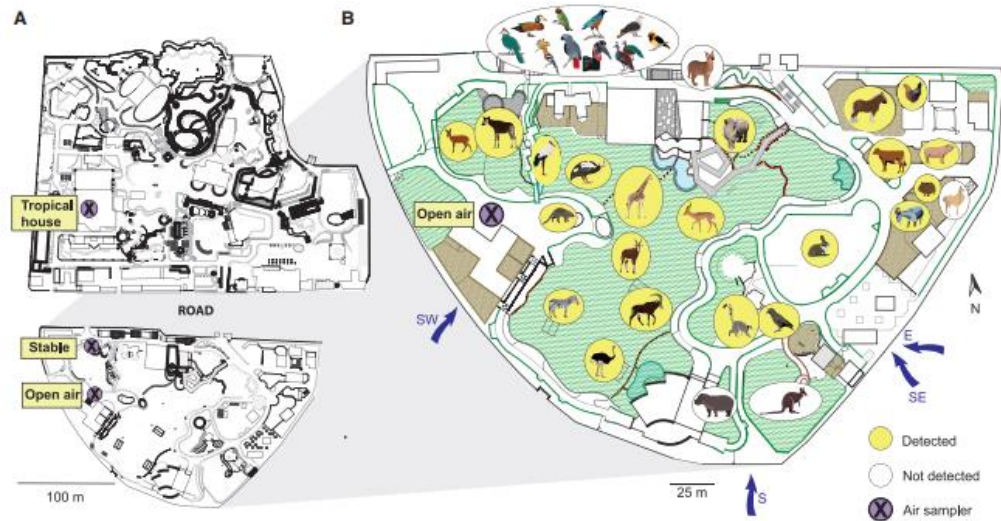
- Détection ADN de rat-taupe (amorces 16S)
- Détection d'ADN non ciblé (humain, forte présence au labo)
- Crainte d'une trop forte dilution dans l'air extérieur (une « soupe dénuée de sens »).  
Réservé à des espaces clos (terriers) ou cavités (chauves-souris) ?

Clare et al., 2021, *PeerJ*



# ADNe aérien : du mammifère dans l'air extérieur ?

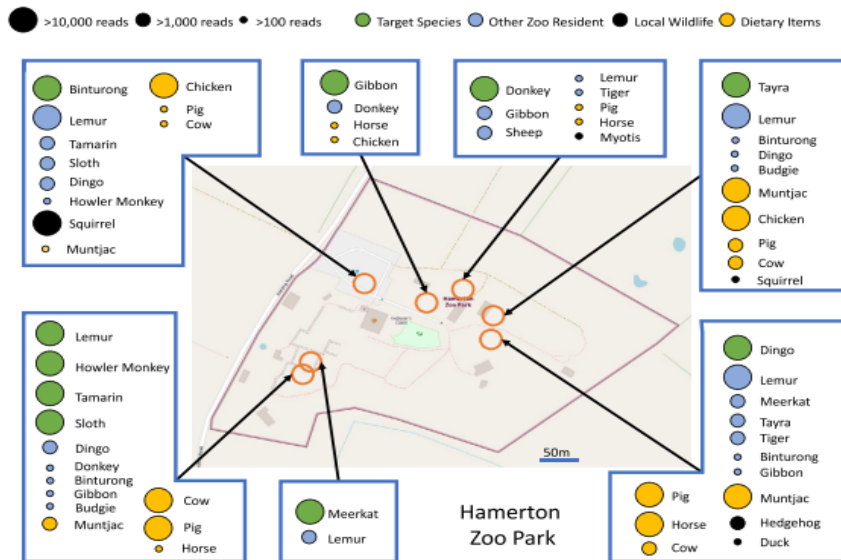
Deux études indépendantes menées dans des parcs zoologiques



Lyngaard et al., 2022, *Curr. Biol.*

Clare et al., 2022, *Curr. Biol.*

Copenhague (DK)	Hamerton (UK)
enclos, extérieur, serre	20 sites (int/ext)
30/800/8800 L/min	0,3 L/min
40 échantillons	72 échantillons
amorces 16S et 12S	amorces 16S et COI
49 espèces	23 espèces



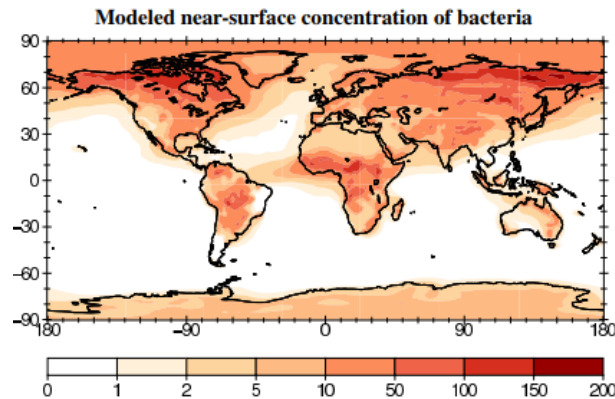
- Mammifères, oiseaux, poissons, amphibiens, reptiles
- Espèces non indigènes du zoo
- Mais aussi espèces locales extérieures et espèces utilisées en nourriture
- Intérieur, extérieur, jusqu'à plusieurs centaines de m
- Plus forte concentration à proximité et en forte population

# ADNe aérien : non, « tout n'est pas partout »

## Structuration à l'échelle globale

Bactéries

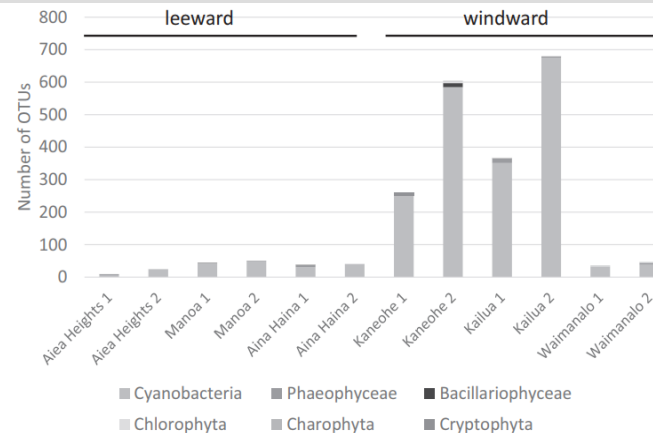
Burrows et al., 2009, *Atmos. Chem. Phys.*



## Structuration sur relief (Hawaï)

Algues, au vent vs sous le vent, ≈ 3000 OTUs

Sherwood et al., 2017, *J. Phycol.*



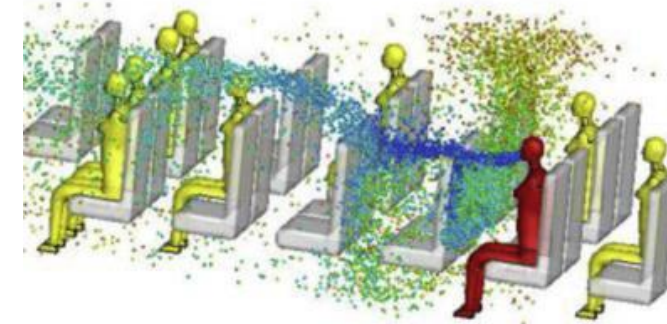
## Très petite échelle

Propagation du virus SARS-CoV-2 en milieu confiné

Yang et al., 2020, *J. Hazard. Mater.*



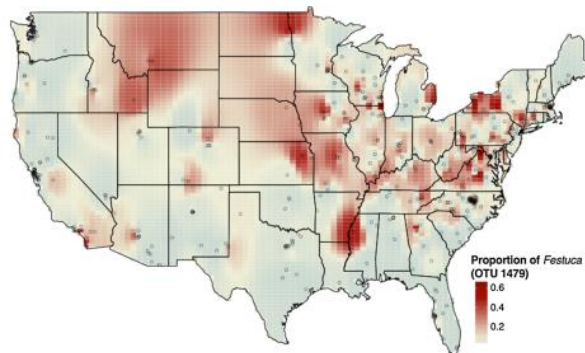
t=40s



## Structuration à l'échelle continentale

Pollen, ≈ 500 sites, ≈ 1000 OTUs

Craine et al., 2016, *Aerobiology*



## Échelle 1-100 km

X < 10 km similaire, X > 100 km différent (champignons, Finlande, ≈ 1000 espèces)

Abrego et al., 2017, *Mol. Ecol. Resour.*

La plus forte contribution : rayon de 25 km (bactéries et champignons, 9 sites mondiaux)

Tignat-Perrier et al., 2019, *Sci. Rep.*

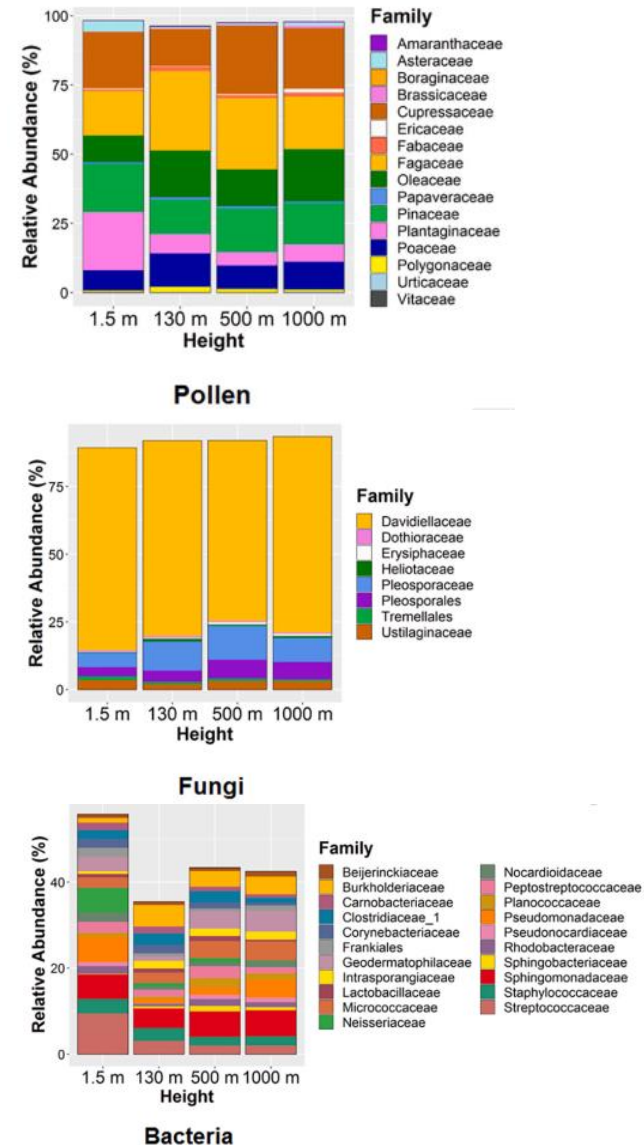
Lien avec la structure urbaine

Robinson et al., 2021, *Sci. Rep.*

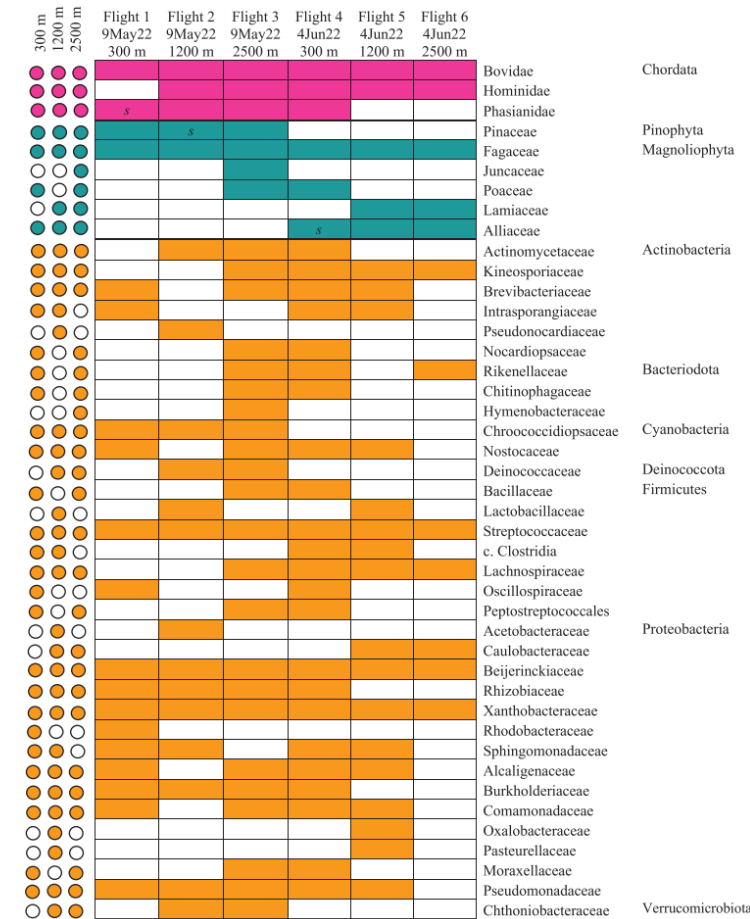
# ADNe aérien : et en altitude ?

Campagnes de collecte de bioaérosols par moyens aéroportés (aviation légère, moyens de recherche, ballons sondes, drones...).

- Présence de pollen et de spores (ex. : 24 types de pollen et 15 types de spores à 2000 m, Damialis et al., 2017, *Sci. Rep.*), distribution homogène de bactéries jusqu'à 12 km (Smith et al., 2018, *Front. Microbiol.*), de pollen, spores et bactéries jusqu'à 1000 m (Sánchez-Parra et al., 2021, *Atmos. Res.*)
- Métagénomique shotgun de 3 km à 12 km : nombreux genres de bactéries identifiés (Jaing et al., 2020, *Sci. Rep.*), mais aussi spores et plantes.
- Métagénomique COI, ITS, 16S jusqu'à 2500 m (Métris and Métris, 2023, *PeerJ*) : bactéries, plantes, vertébrés...



Sánchez-Parra et al., 2021, *Atmos. Res.*



Métris and Métris, 2023, *PeerJ*

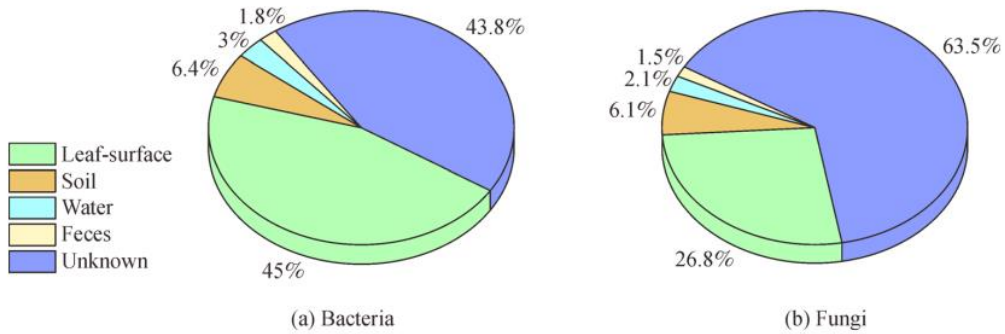
# ADNe aérien : à la recherche des sources

## Techniques biochimiques

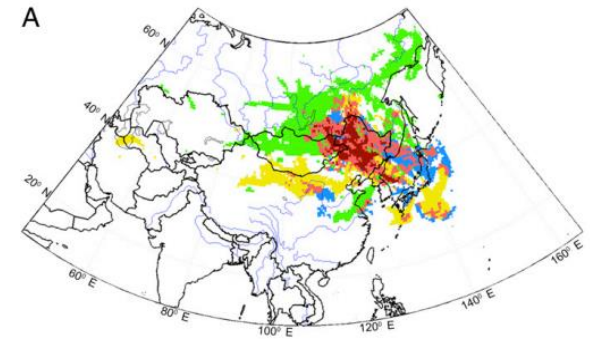
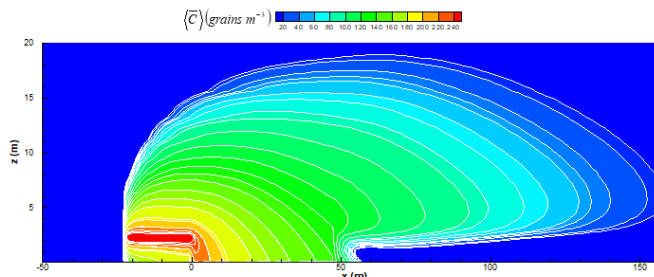
- Type de source

## Un outil indispensable : la modélisation

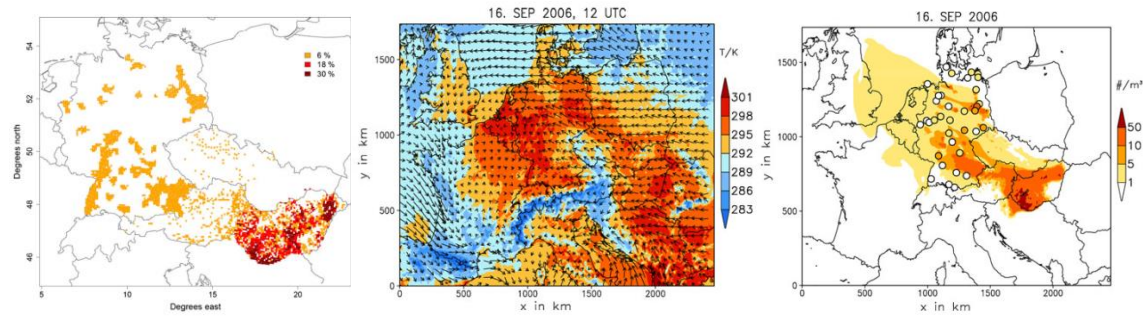
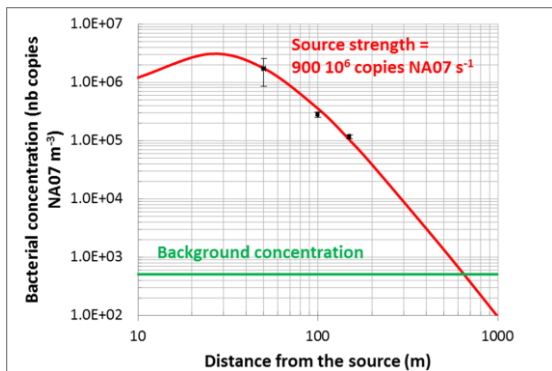
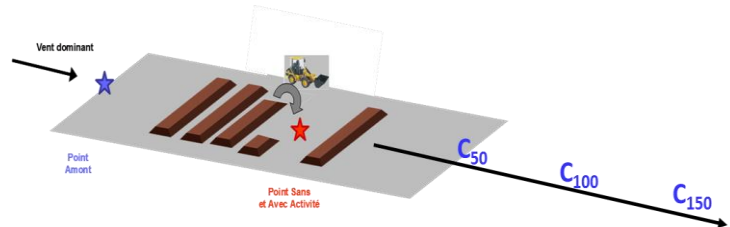
- Inversion de modèles
- Simulation prédictives
- Rétrotrajectoires de masses d'air
- Approches géostatistiques



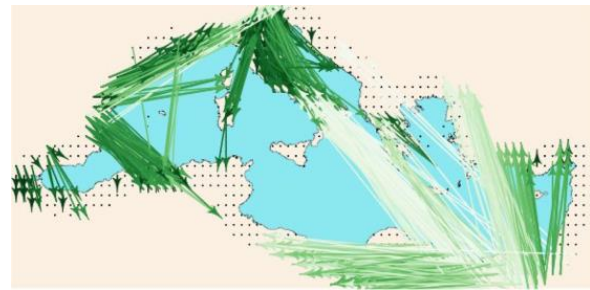
Xie et al., 2021,  
*Front. Environ. Sci. Eng.*



*Candida sp.*  
Rodo et al., 2014, *PNAS*



Zink et al., 2012, *Int. J. Biometeorol.*



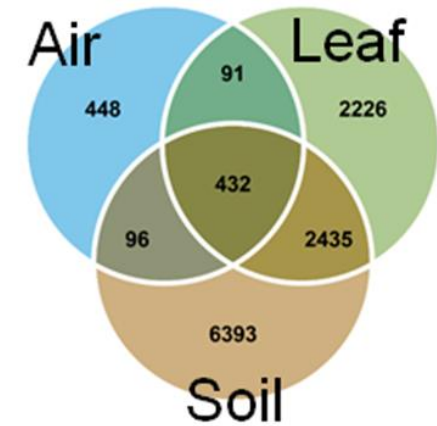
Choufany et al., 2021, *Sci. Rep.*

# ADNe aérien : étudier les bioaérosols

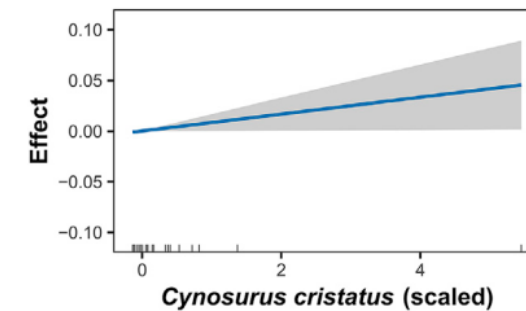
- **Air** : un milieu clé pour la dispersion de l'ADN
- **Au cœur de la problématique One Health** : réservoir sans frontières et milieu de transport de nombreuses espèces, certaines potentiellement pathogènes (plantes, animaux, humains)
- **Écologie** : aérobiome = collection d'individus ou véritables communautés ?
- **Biodiversité** : richesse spécifique, abondance, déclin, espèces invasives/en extinction, changements d'utilisation des terres, restauration écologique, changement climatique...
- **Santé environnementale** : pathogènes des cultures et du bétail, bâtiments d'élevage, bloom algal, cyanobactéries, production de toxines...
- **Santé humaine** : épidémiologie, allergènes, résistance antibiotique, surveillance de l'atmosphère interne aux bâtiments...
- **Impacts sur les processus météorologiques** : formation des nuages (noyaux de condensation, noyaux glaçogènes...), microbiologie des nuages, chimie atmosphérique...
- **Médecine légale** : traces de présence humaine dans l'atmosphère interne (Clare et al., 2021, *PeerJ*) et externe (Métris and Métris, 2023, *PeerJ*). Préoccupations éthiques (Whitmore et al., 2023, *Nat. Ecol. Evol.*)

# ADNe aérien : problèmes, perspectives, priorités

- **Météorologie** : standardisation des capteurs et protocoles (débit), maniabilité, rapidité (microfluidique)
- **Mécanismes** : émission, aérosolisation, viabilité, dépôt
- **Traçage des sources et de la dispersion** : modélisation
- **Biodiversité** : mise en place de réseaux de biosurveillance
- **Pathogènes** : surveillance, systèmes d'alerte précoce (cultures, bétail, épidémiologie, allergologie), croisement avec facteurs explicatifs (ex. santé respiratoire et communautés d'herbes)
- **Mesures réglementaires et gestion du territoire**



Fort et al., 2023, *in prep.*

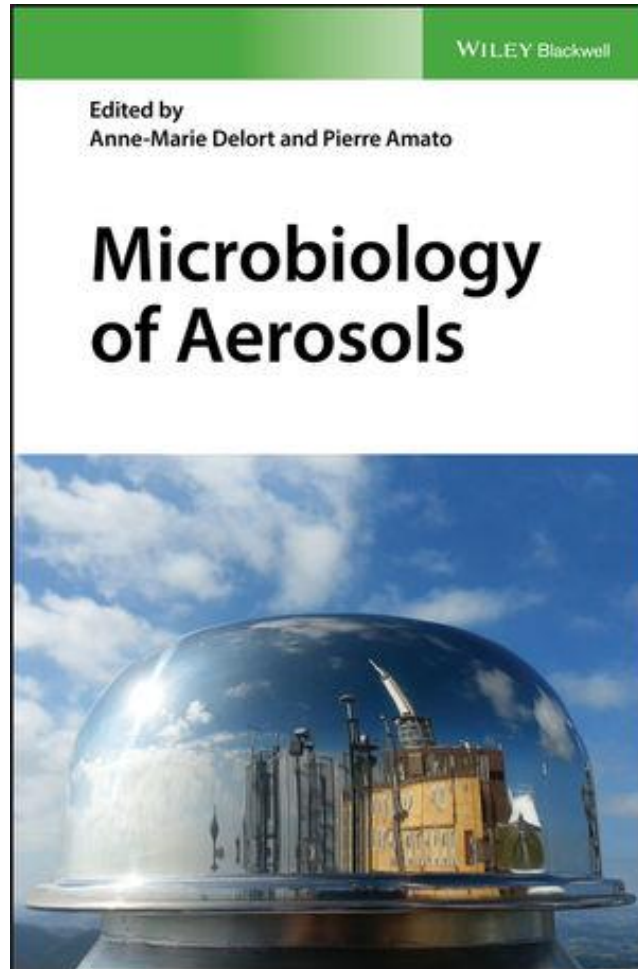


Rowney et al., 2021, *Curr. Biol.*



# ADNe aérien : pour en savoir plus

**Delort A-M and Amato P (eds), *Microbiology of Aerosols***  
Wiley-Blackwell, 2017, 320 p., ISBN: 978-1-119-13228-8 320



## Table of contents

List of Contributors

Preface

Hunting fog

It all happens up there ...

Cela se passe là-haut ...

### Part I Bioaerosols, Sampling, and Characterization

#### 1.1 Main Biological Aerosols, Specificities, Abundance, and Diversity

*P. Amato, E. Brisebois, M. Draghi, C. Duchaine, J. Fröhlich-Nowoisky, J.A. Huffman, G. Mainelis, E. Robine and M. Thibaudon*

#### 1.2 Sampling Techniques

*P. Amato, E. Brisebois, M. Draghi, C. Duchaine, J. Fröhlich-Nowoisky, J.A. Huffman, G. Mainelis, E. Robine and M. Thibaudon*

#### 1.3 Quantification and Characterization of Bioaerosols (offline techniques)

*J. Fröhlich-Nowoisky, P. Amato, P. Renard, E. Brisebois and C. Duchaine*

#### 1.4 Online Techniques for Quantification and Characterization of Biological Aerosols

*J.A. Huffman and J. Santarpia*

### Part II Sources and Transport of Microbial Aerosols

#### 2.1 Bioaerosol Sources

*N. Wéry, A. Galès and Y. Brunet*

#### 2.2 Short-Scale Transport of Bioaerosols

*Y. Brunet, N. Wéry and A. Galès*

#### 2.3 Global-Scale Atmospheric Dispersion of Microorganisms

*D.W. Griffin, C. Gonzalez-Martin, C. Hoose and D.J. Smith*

### Part III Impacts of Microbial Aerosols on Atmospheric Processes

#### 3.1 Impacts of Bioaerosols on Atmospheric Ice Nucleation Processes

*T.C.J. Hill, P.J. DeMott, F. Conen and O. Möhler*

#### 3.2 Impacts on Cloud Chemistry

*A.-M. Delort, L. Deguillaume, P. Renard, V. Vinatier, I. Canet, M. Väitilingom and N. Chaumerliac*

### Part IV Impacts of Bioaerosols on Human Health and the Environment

#### 4.1 Health Impacts of Bioaerosol Exposure

*P. Blais Lecours, C. Duchaine, M. Thibaudon and D. Marsolais*

#### 4.2 Impacts of Microbial Aerosols on Natural and Agro-ecosystems

*C.E. Morris and D.C. Sands*

Index

ADNe aérien : merci de votre attention

