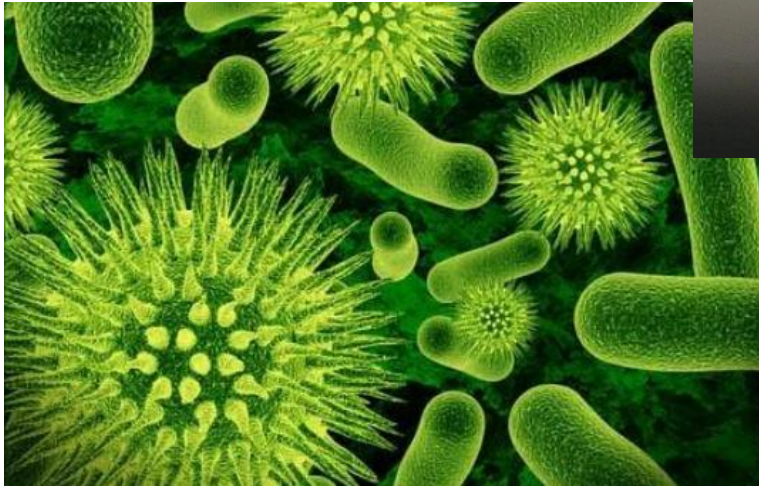


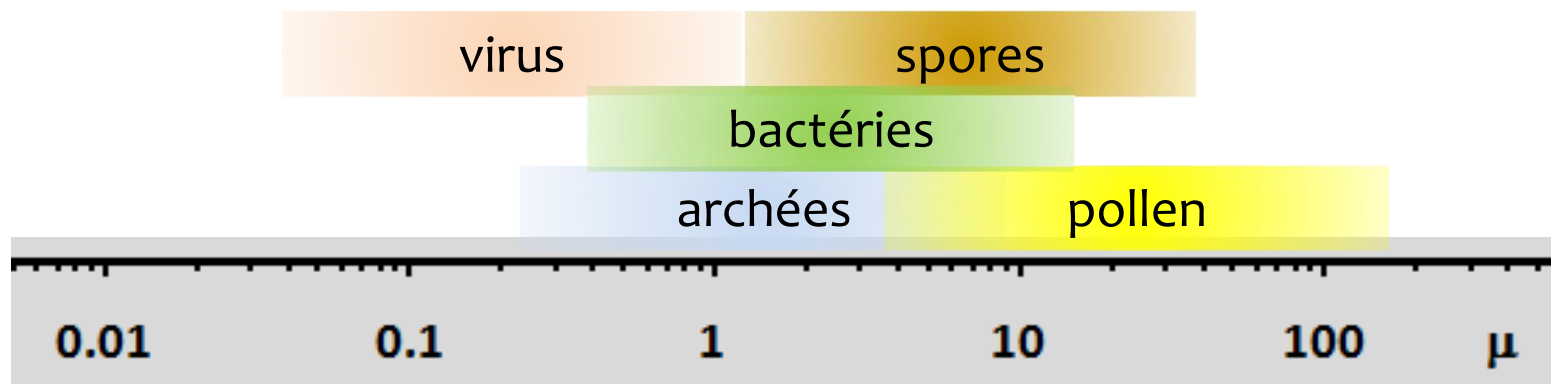
Les bioaérosols :

nature, abondance, diversité, émission, flux, transport, dépôt

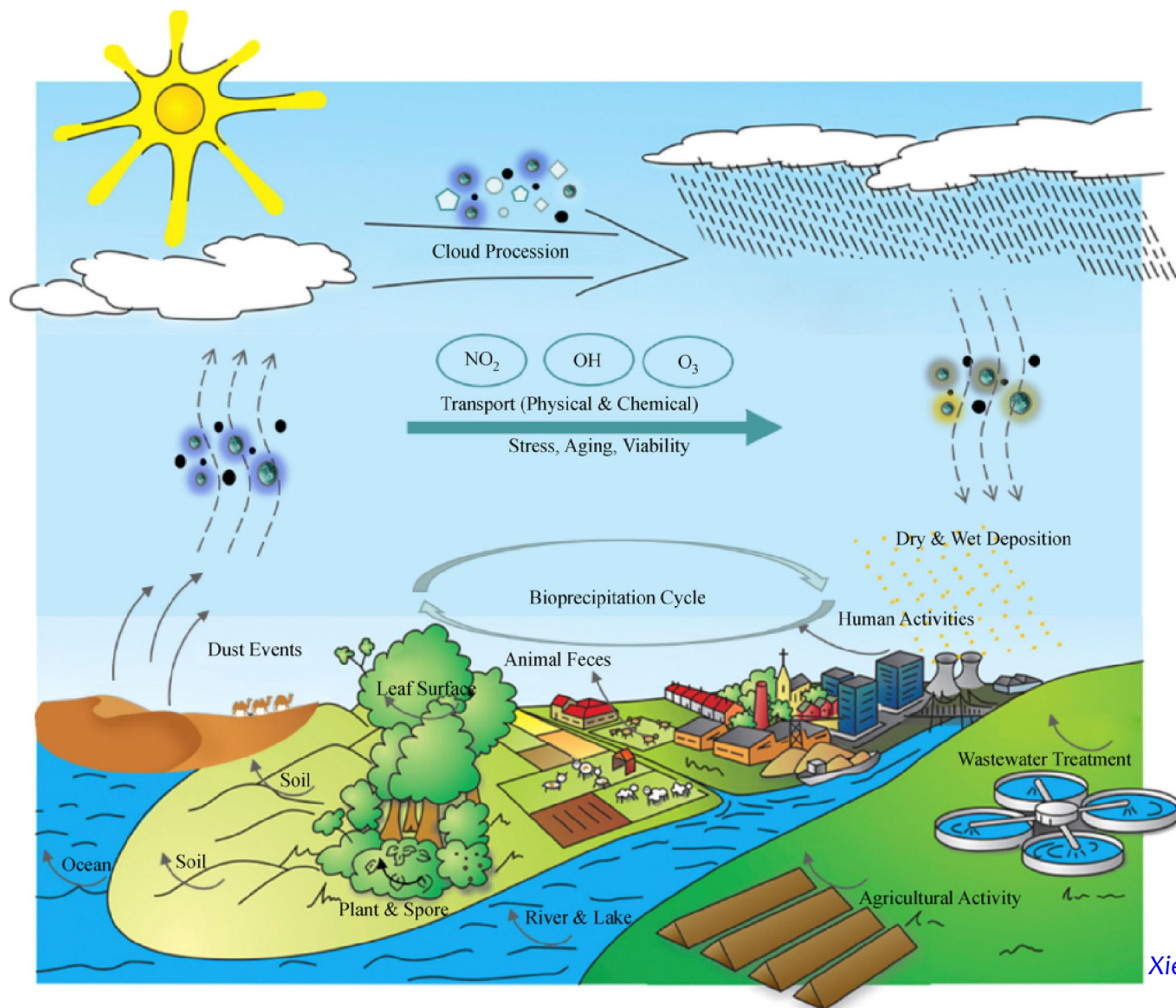


Les bioaérosols, c'est quoi ?

- **Aérosol** : particule liquide ou solide en suspension dans un milieu gazeux
- **Bioaérosol** : aérosol d'origine biologique
- **Bioaérosol primaire** : particule directement émise par la surface (virus, bactérie, champignon, pollen ; protistes, algues, archées ; débris, produits d'excretion, toxines...)

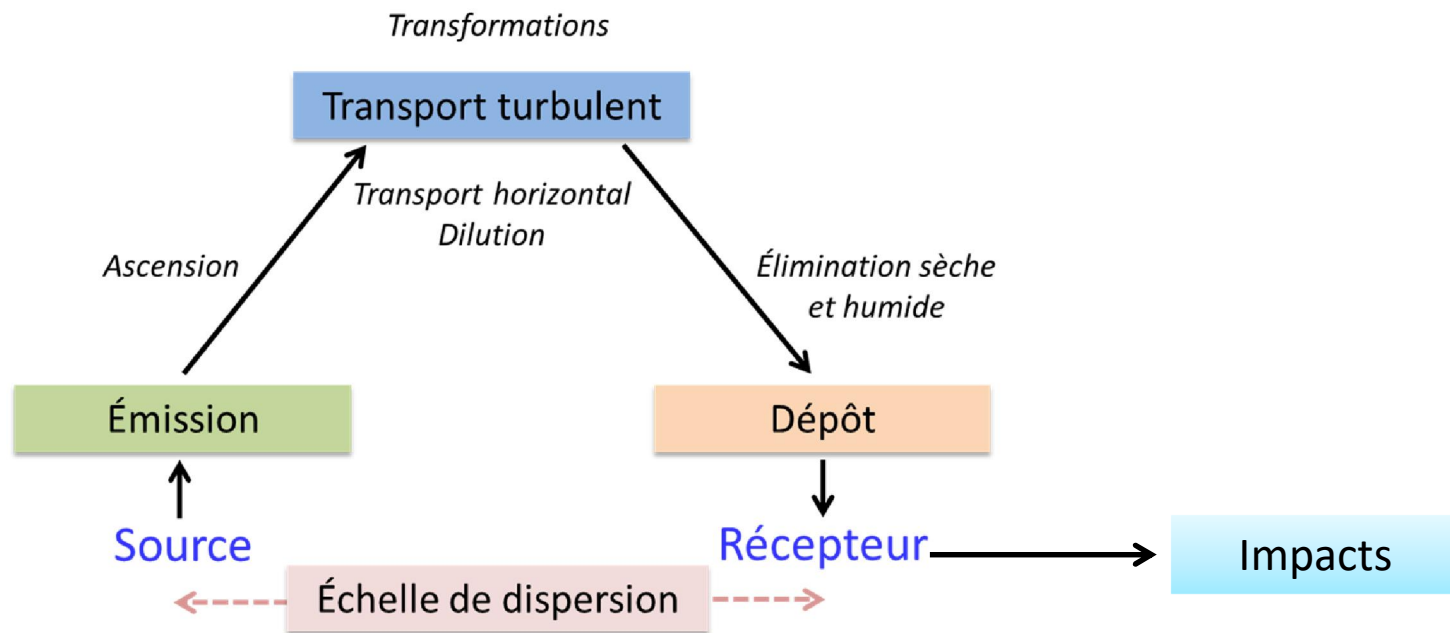


La vie des bioaérosols



Xie et al. (2021)

La vie des bioaérosols

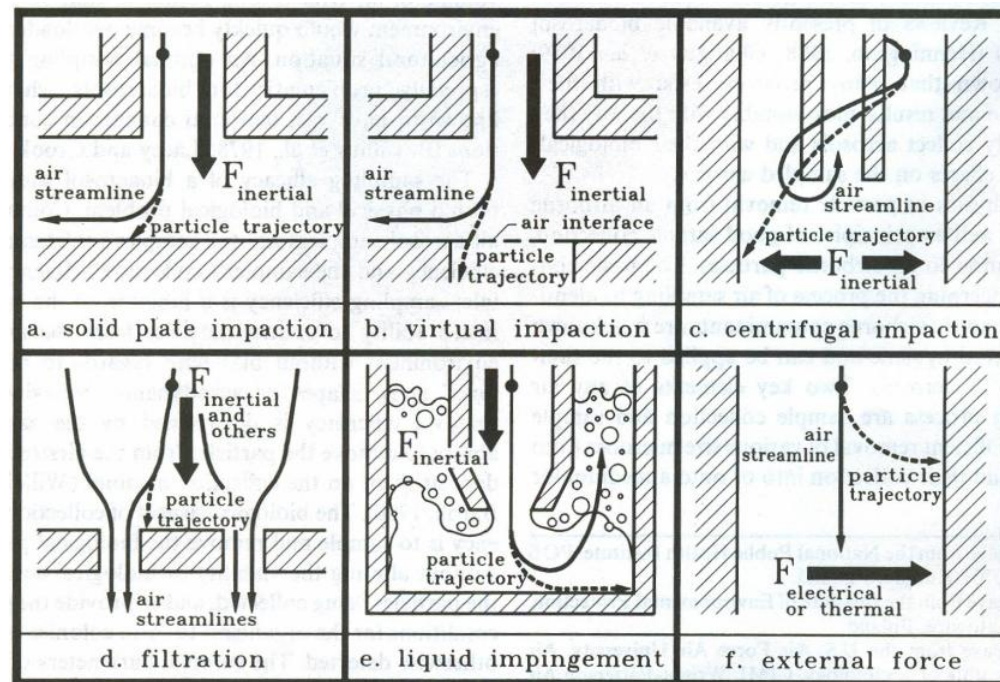
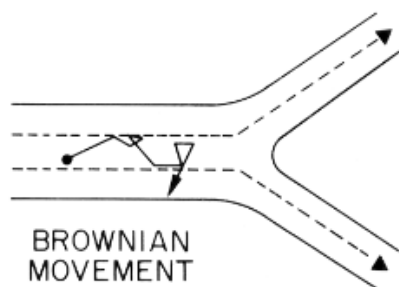
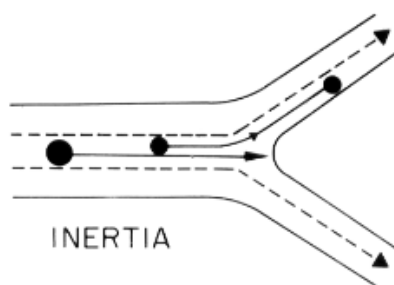
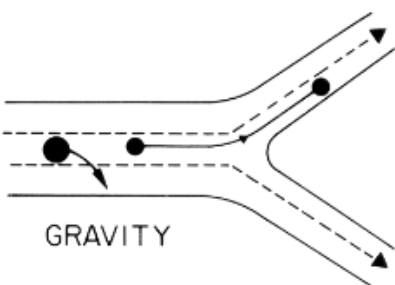


- **Sources** : plantes, sol, eau, animaux, sites industr/agric, hôpitaux...
- **Transport** : mouvements turbulents, distances courtes (qq m), longues (km) ou très longues (1000 km...)
- **Transformation** : dessèchement, réactions phys-chim, inactivation...
- **Dépôt** : par inhalation, gravité, impaction, lessivage...

Étudier les bioaérosols

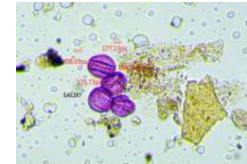
- **Écologie microbienne** : compartiment atmosphère, aérosolisation, dépôt
- **Flux de gènes et biodiversité** : croisements à courte et longue distance
- **Impacts sur les processus atmosphériques** : formation des nuages (noyaux de condensation, noyaux glaçogènes...), microbiologie des nuages, chimie atmosphérique...
- **Santé environnementale** : pathogènes des plantes, pathogènes humains ou animaux, allergologie, résistance antibiotique, bloom algal, cyanobactéries, production de toxines...

Collecter les bioaérosols



Analyser les bioaérosols

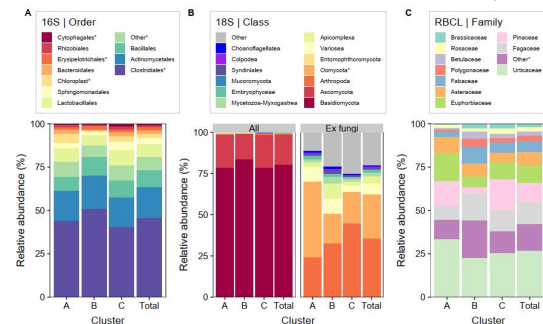
- **Observation** : collection sur bande collante
- **Mise en culture** : UFC, unités formant colonies (part. cultivables, qq %)
- **Analyses moléculaires** : identification des genres, espèces, etc.
- **Vers la concentration (Np m^{-3})** : quantité, volume passé



Sarda Estève (2021)



de Groot et al. (2021)



Nature et concentration

Sites concernés

- Écosystèmes (agricoles, « naturels »...)
- Décharges, compostage, traitement des eaux
- Air urbain, hôpitaux, lieux publics
- Nuages

Échantillonnage

- Bioimpacteurs
- Filtres
- Barboteurs
- Capteurs passifs

Analyses

- Concentrations (CFU, total)
- Granulométrie
- Identification de genres
- Analyses génomiques (struct. com., etc.)

Nature et concentration

- **Bactéries** : Proteobacteria, Actinobacteria, Firmicutes, Bacteroidetes dont pathogènes (*Acinetobacter*, *Pseudomonas*, *Staphylococcus*, *Enterococcus*, *Streptococcus*, *Bacillus*, *Bacteroides*, *Burkholderia*, *Vibrio*, *Legionella*, *Salmonella*, *Bacillus anthracis*)
- **Champignons** : ascomycètes (*Cladosporium*, *Alternaria*, *Penicillium*, *Aspergillus*, *Epicoccum*), levures, de charbon, de rouille, autres basidiomycètes
- **Virus** : nombreux (dont pathogènes)
- **Pollen** : nombreuses espèces (dont allergènes)

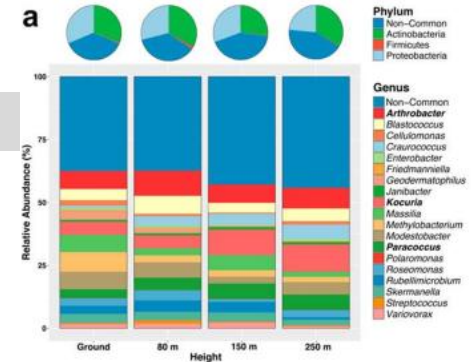
Dépend des zones géographiques

- Tropical, tempéré, arctique...
- Montagne, côte, villes...
- Occupation du sol

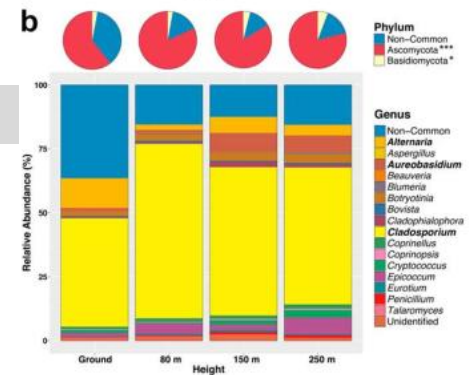
Des ordres de grandeur

- Bactéries, champignons, virus $\approx 10^4 \text{ m}^{-3}$
- Bactéries : de 10^2 à 10^8 m^{-3} (Desprès et al. 2012)

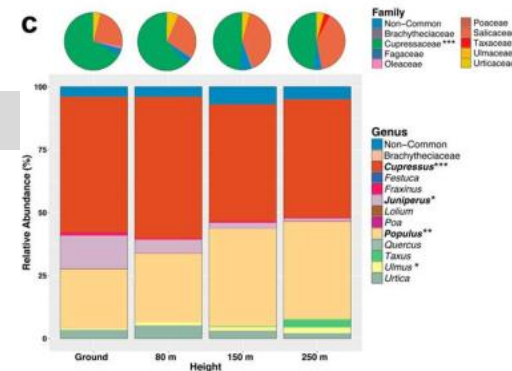
Bactéries



Champignons



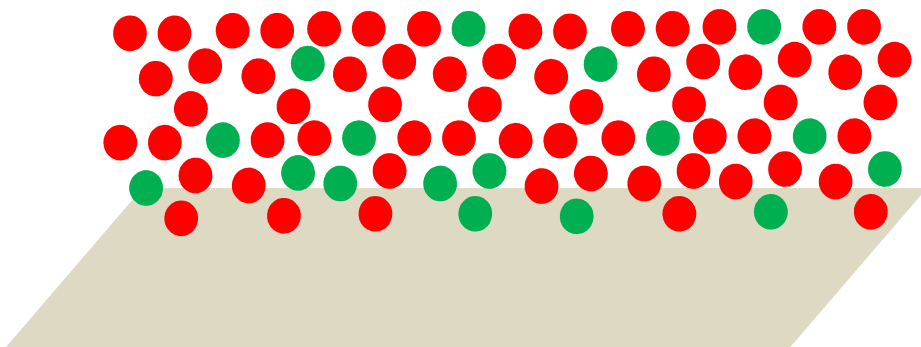
Pollen



L'émission : concentration et flux

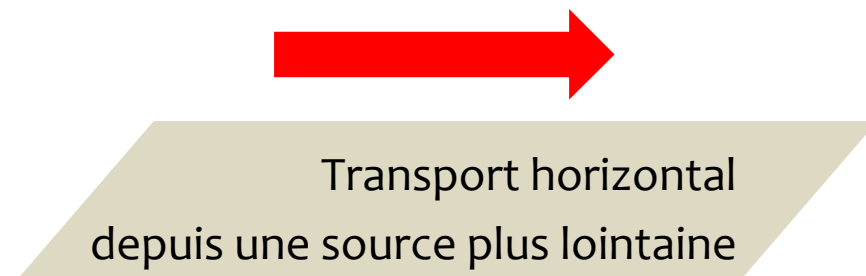
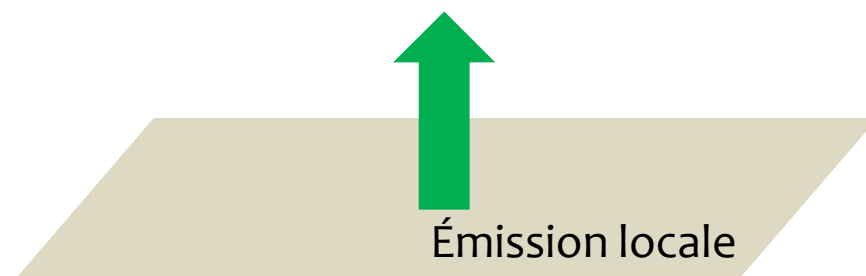
$$C \text{ (Np m}^{-3}\text{)}$$

Quantité par unité de volume

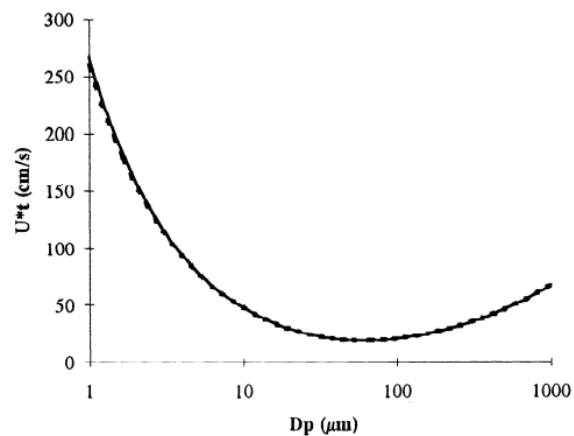


$$F \text{ (Np m}^{-2} \text{ s}^{-1}\text{)}$$

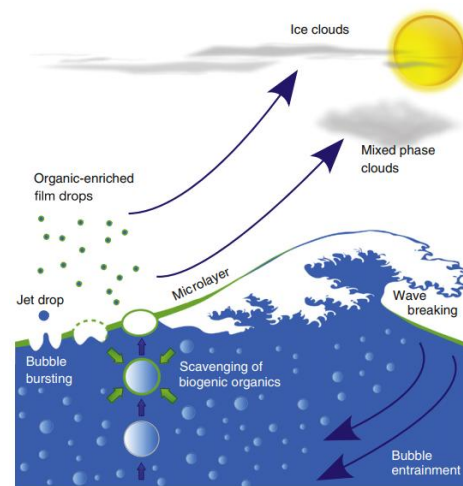
Quantité passant par unité de surface et
par unité de temps



Émission et aérosolisation



Marticorena and Bergametti (1995)



Fröhlich-Nowoisky et al. (2016)

Actions anthropiques

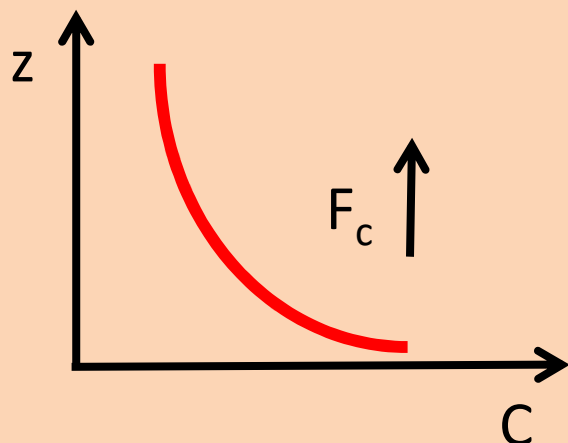
- Plateformes de compostage, traitement des eaux usées
- Opérations agricoles (moisson...), bâtiments d'élevage
- Hôpitaux, industrie...



L'émission : concentration et flux

La relation flux – gradient

$$F_c = -K_c \frac{dC}{dz}$$



Une mesure difficile

- $C \propto \frac{1}{z^2}$ grande précision requise

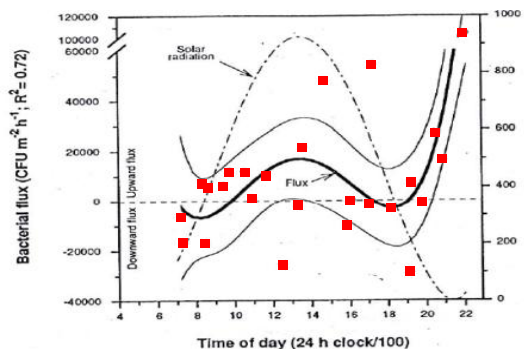
D'autres compétences requises

- mesures en écoulement turbulent

Des approches alternatives

- corrélation avec sources voisines
- trajectoires de masses d'air
- modélisation (inversion)

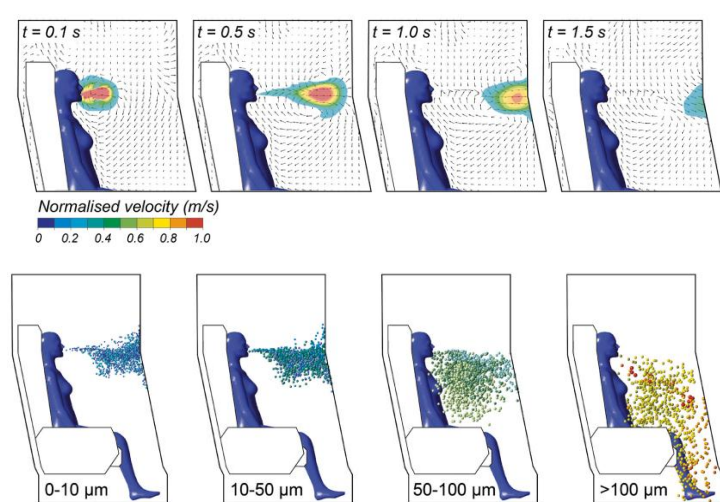
Très peu de mesures



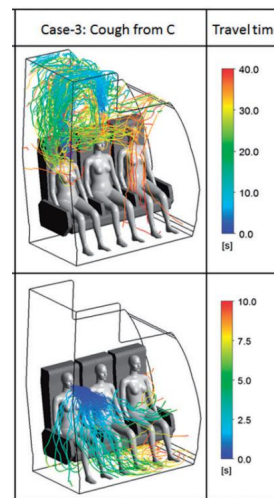
LightHart and Schaffer (1994)



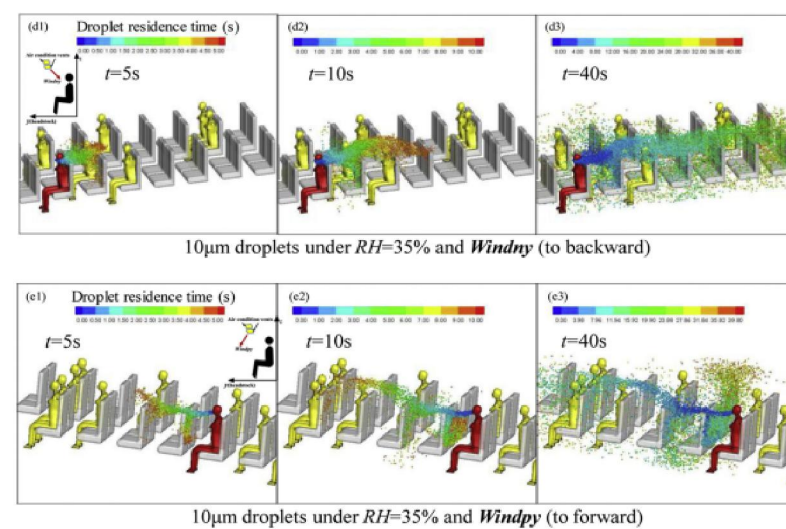
Transport de bioaérosols : air intérieur



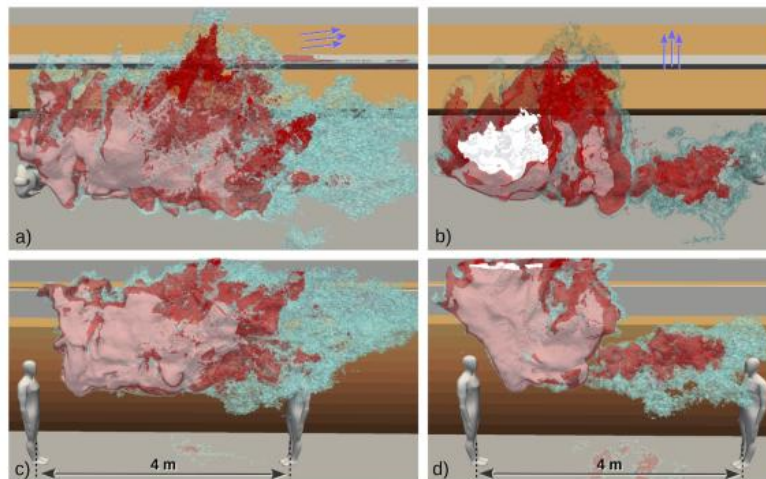
Yan et al. (2020)



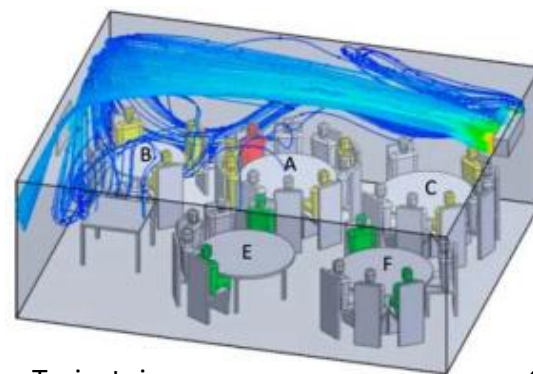
Lin et al. (2018)



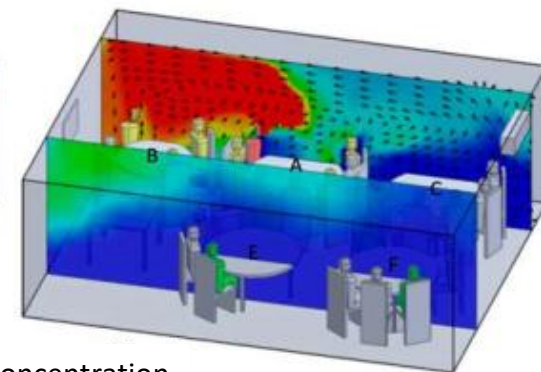
Yang et al. (2020)



Vuorinen et al. (2020)



Trajectoires
et Vitesse

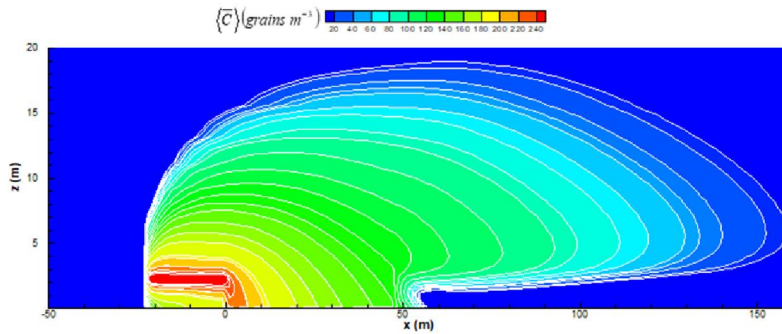


Concentration
virale

Ho (2021)

Transport de bioaérosols : courte distance

Dispersion de pollen à partir d'un champ



Hofmann et al. (2014)

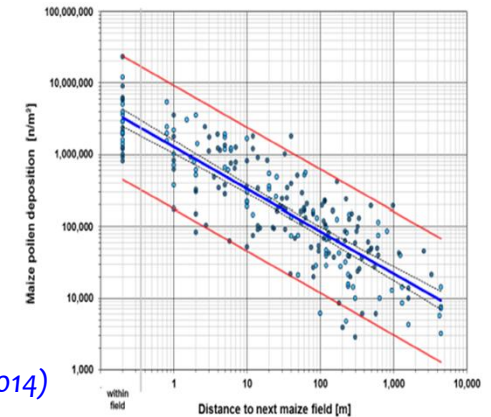
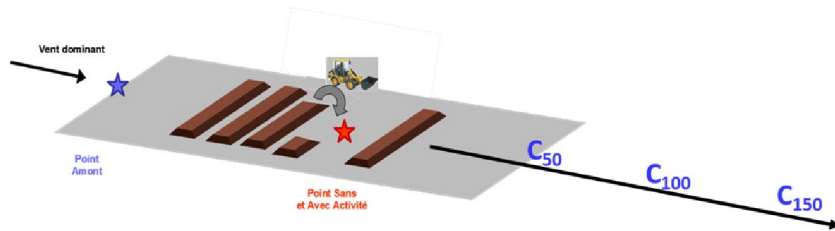
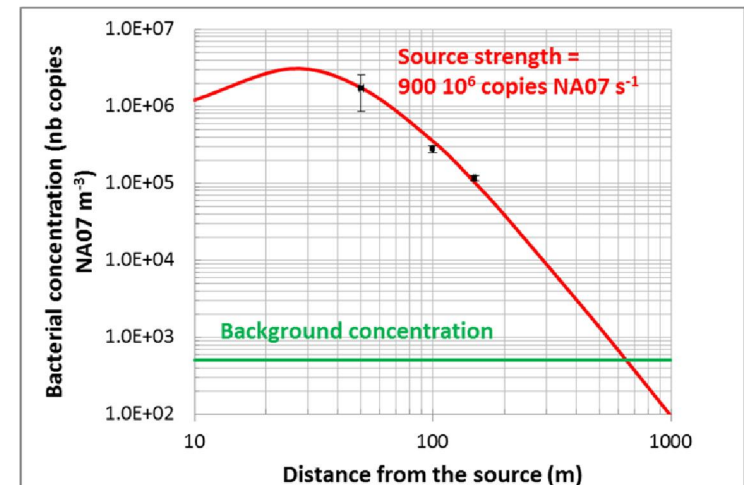


Figure 3 Maize pollen deposition versus distance to the next maize field. Data points from field measurements 2001 to 2010 (gray dots), data from 2001 to 2006 (light blue dots), data from 2007 to 2010 (dark blue dots) and resulting regression analysis (dashed power regression equation $\log_{10} y = -0.585 \cdot \log_{10} x + 6.104$, $R^2 = 0.709$, $p < 0.001$; power regression equation, $y = 1.271 \cdot 10^6 \cdot x^{-0.585}$, x : distance in m, y : deposition in n/m^2). Central solid blue line, expected deposition; dashed lines, confidence interval for expected deposition; red solid lines (outer lines), 95% confidence intervals for single predictions. Deposition values in n/cm^2 were obtained by multiplying displayed deposition values by 0.0001.

Dispersion de bactéries à partir d'une plateforme de compostage



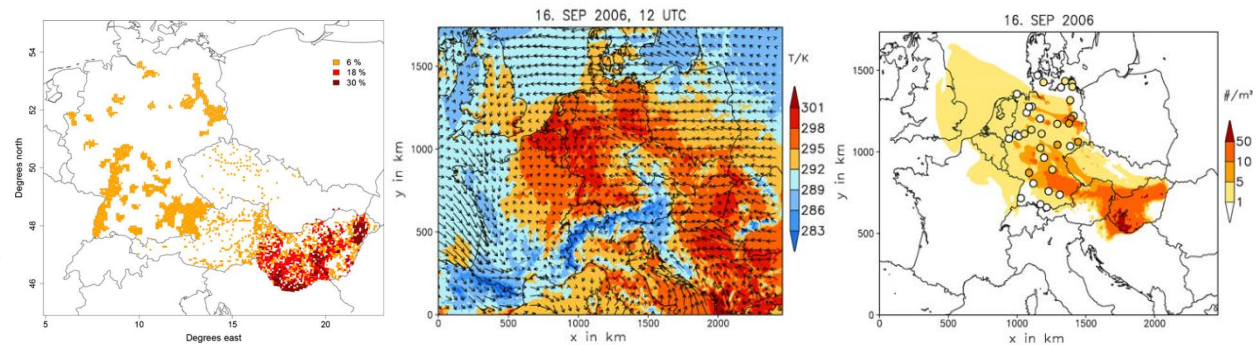
$$\hat{C}(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_Y \sigma_Z} \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_Y^2}\right) \left[\exp\left(\frac{-(z - z_s)^2}{2\sigma_Z^2}\right) + \exp\left(\frac{-(z + z_s)^2}{2\sigma_Z^2}\right) \right]$$



Transport de bioaérosols : longues distances

Échelle régionale :
pollen d'ambroisie

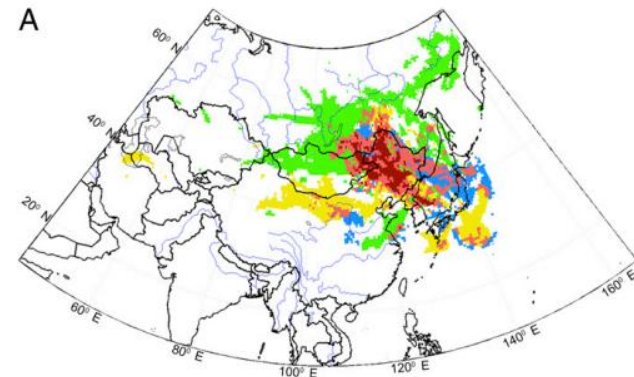
Zinc et al. (2012)



Échelle continentale :
champignon *Candida* sp.

Échelle globale :
bactéries

Modeled column density of bacteria



Rodo (2014)

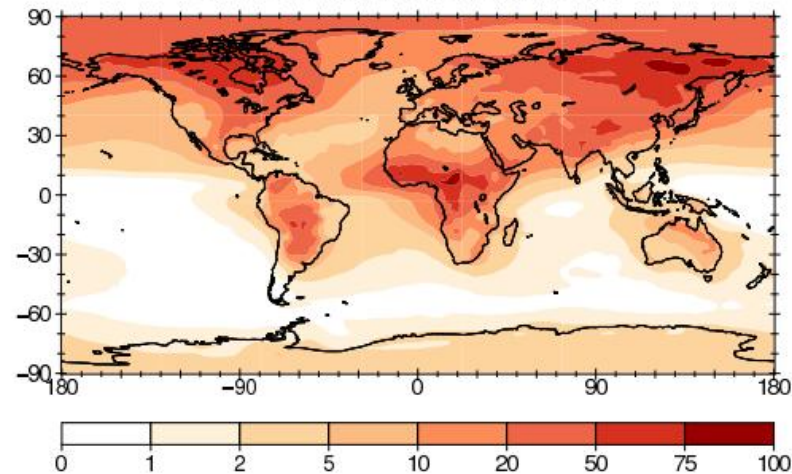
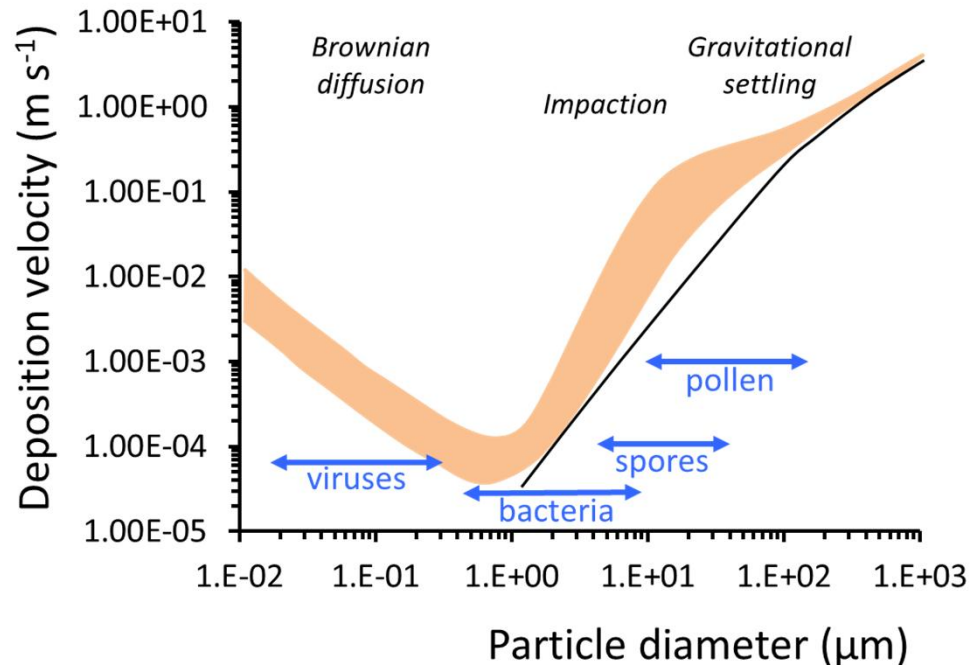


Fig. 6. Column density of bacteria tracer (10^6 m^{-2}), with emissions given by the median of the ensemble of positive-constrained emissions estimates.

Burrows et al. (2009)

Le dépôt des bioaérosols

La vitesse de dépôt : $V_d = F_c / C$

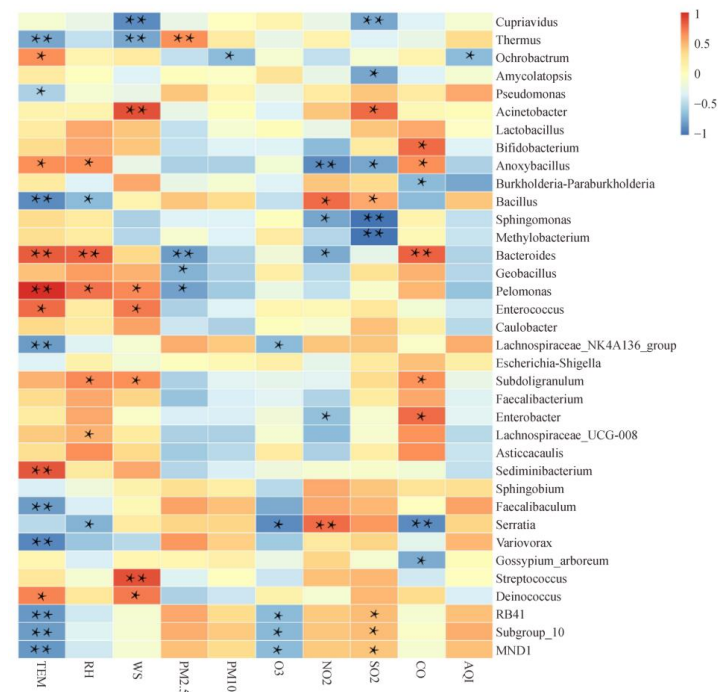
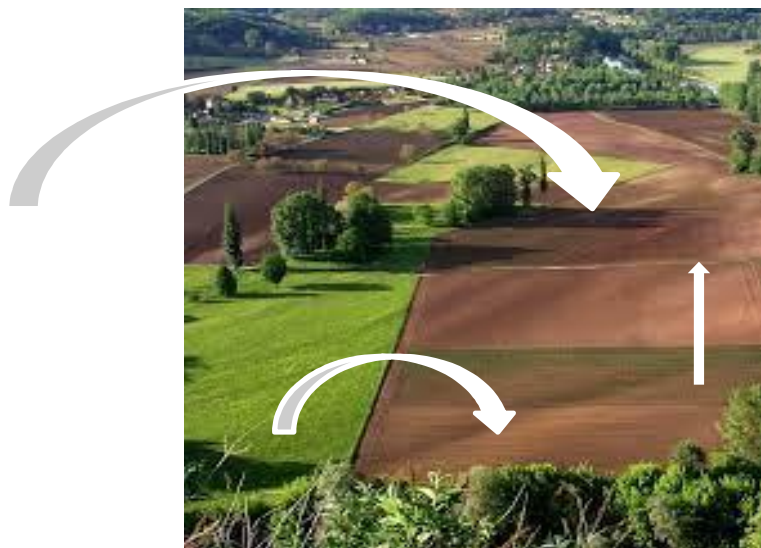


Vieillessement des bioaérosols

- **Soumis à de nombreux stress** : dessiccation, privation de nutriments, présence de radicaux libres oxydants, rayonnement solaire UV, pollution de l'air
- **Une durée de vie très variable** : de quelques minutes à plusieurs jours
 - Ex. pollen maïs : de 30 min (35 °C) à quelques heures (15 °C)
 - Ex. SARS-CoV-2 : - 2 % par minute sans UV
- **Dépend de la température et de l'humidité** : dessiccation, métabolisme
- **Dépend du type de membrane** : lipidique vs non lipidique
- **Viabilité et allergénicité**

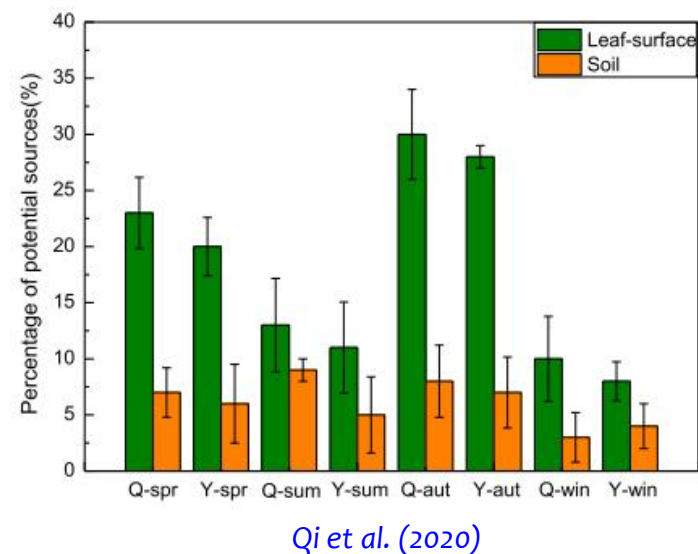
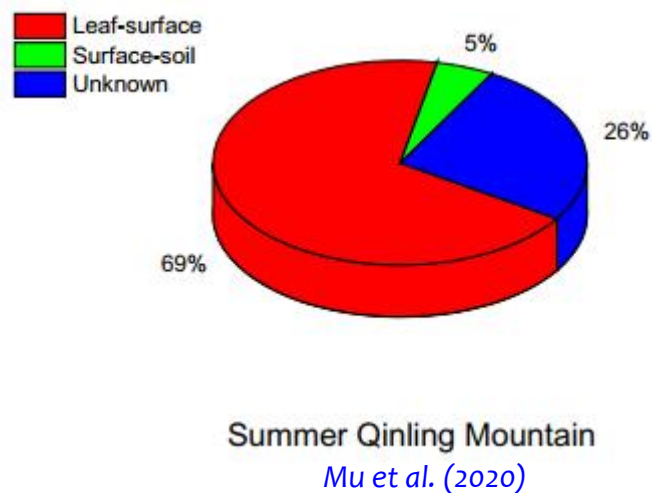
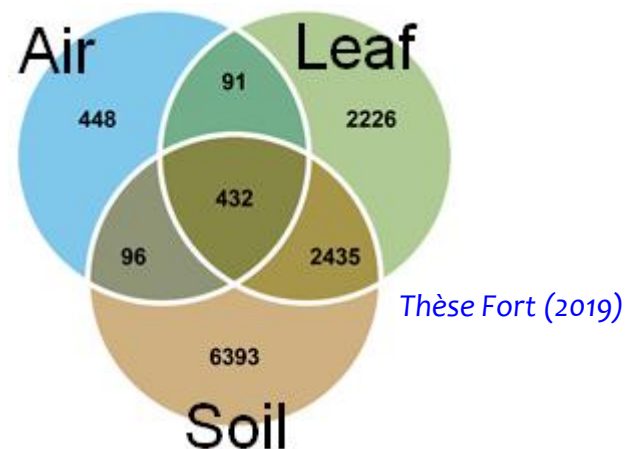
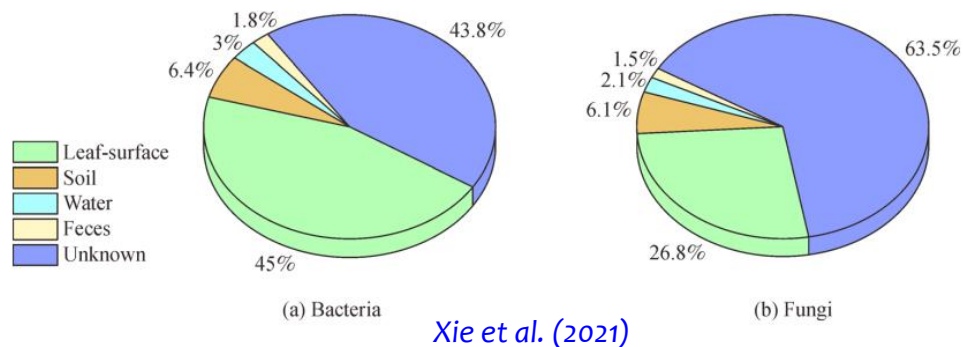
Effet des facteurs environnementaux

- Diversité, abondance, viabilité
- Beaucoup d'études empiriques
- Rôle simultané du transport et des conditions météorologiques



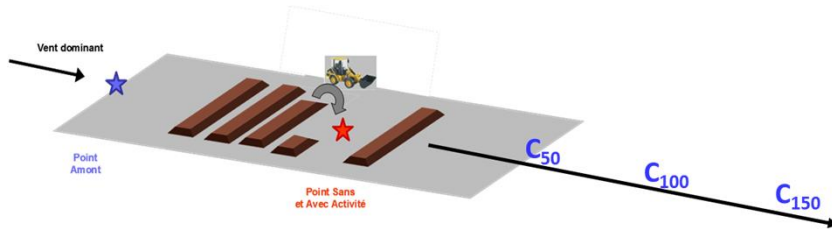
Xie et al. (2021)

Estimation des sources



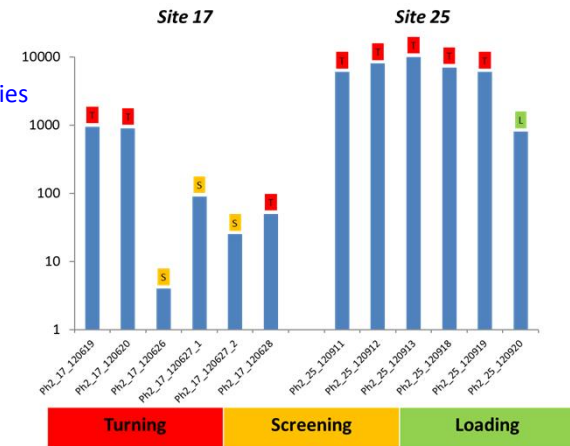
Estimation des sources

Estimation de la source par inversion



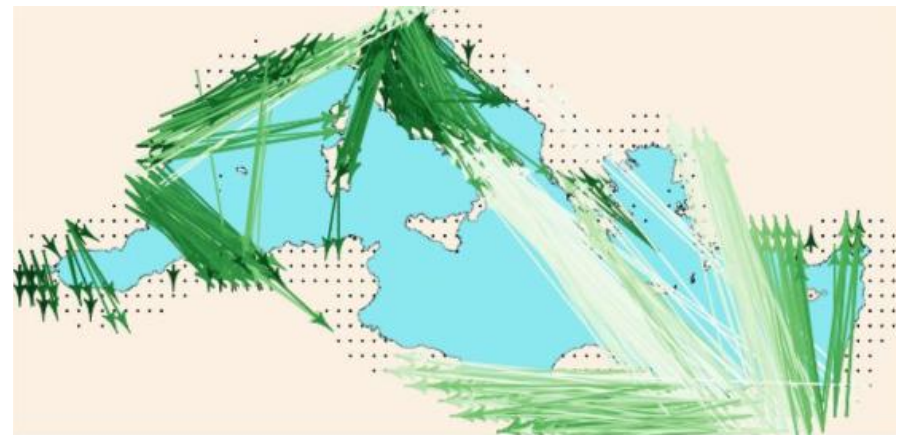
$$\hat{C}(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_Y \sigma_Z} \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_Y^2}\right) \left[\exp\left(\frac{-(z - z_s)^2}{2\sigma_Z^2}\right) + \exp\left(\frac{-(z + z_s)^2}{2\sigma_Z^2}\right) \right]$$

10⁶ nb copies
NAO7 s⁻¹



Connectivité à longue distance

- Statistiques sur les trajectoires de masse d'air
- Construction de réseaux spatio-temporels



Choufany et al. (2021)

Quelques défis

- **Écologie microbienne** : aérobiome = simple collection d'individus ou véritable communauté ?
- **Processus mal connus** : réservoirs, aérosolisation, transport et environnement, survie...
- **Métrologie** : mesures de flux, systèmes de suivi en temps réel
- **Qualité de l'air** : surveillance, réglementation
- **Modélisation du transport atmosphérique** : intégration de données spatiales
- **Gestion des territoires** : influence de l'occupation des sols, impact des sources, gérer l'aérobiome par la gestion du territoire