



Impact des épurateurs d'air sur les particules en conditions réelles d'utilisation en milieu tertiaire

**Etude réalisée dans le cadre d'une convention
engagée entre Fimea et ADEME**

QAST « Qualité Air Solutions Territoires »

Programme QAST « Qualité Air Solutions Territoire »

Contexte & Objectifs



Problème : qualité de l'air intérieur

- Concentration en particules élevées
- Milieu tertiaire impactés : exposition prolongée : environ 8h/jour
- Enjeu majeur de santé publique



Solutions existantes : épurateurs d'air

- Efficacité en laboratoire prouvée : variable en conditions réelles
- Performances influencées par les caractéristiques des locaux
- Résultats dépendants de l'usage et du contexte



Le programme QAST

- **QAST1 (2023-2024)** : Identification des déterminants et indicateurs pour évaluer la performance réelle des épurateurs d'air
- **QAST2 (2024-2025)** : Expérimentations renforcées + modélisation statistique avancée + revue bibliographique



Objectif du programme :

- Evaluer les performances réelles des épurateurs en milieu tertiaire
- Produire des référentiels robustes pour guider les choix et l'implantation
- Préparer un futur cadre normatif

Protocole de mesure

Mesures des paramètres suivants :

- Concentration moyenne par minute de particules en nombre à l'intérieur des locaux
POD2 - Ellona (0,3 à 10 μm)
Octopus - AirInSpace (0,3 à 10 μm)
Mini WRAS - GRIMM AEROSOL (gamme électrique de 0,01 à 0,253 μm et gamme optique de 0,253 à 35,15 μm)
Live Pollution - LifyAir (0,15 à 100 μm)
- Concentration moyenne par minute de particules en nombre à l'extérieur des locaux
WT1 - Ellona (0,3 à 10 μm)
- Concentration moyenne par minute du CO₂ (ppm) + niveau sonore (dBA) + Température (°C) par minute
POD2 - Ellona

Maitrise des déterminants suivants :

- Ouverture/fermeture des ouvrants (portes, fenêtres)
- Nombre de personnes dans la pièce

Pendant et hors fonctionnement épurateur :

- Fonctionnement : 3 fois par jour pendant 2 heures (04-06h ; 10-12h ; 14-16h)

3 pièces investiguées : variation des volumes de la pièce, du nombre de personnes, des ouvrants et de la pollution de l'air extérieur

5 épurateurs d'air testés : variation des modèles/marques et des débits d'épuration



Lieux d'étude (n°1/3)

Salle de réunion

Volume : 34 m³

Nombre de personnes : entre 0 et 6

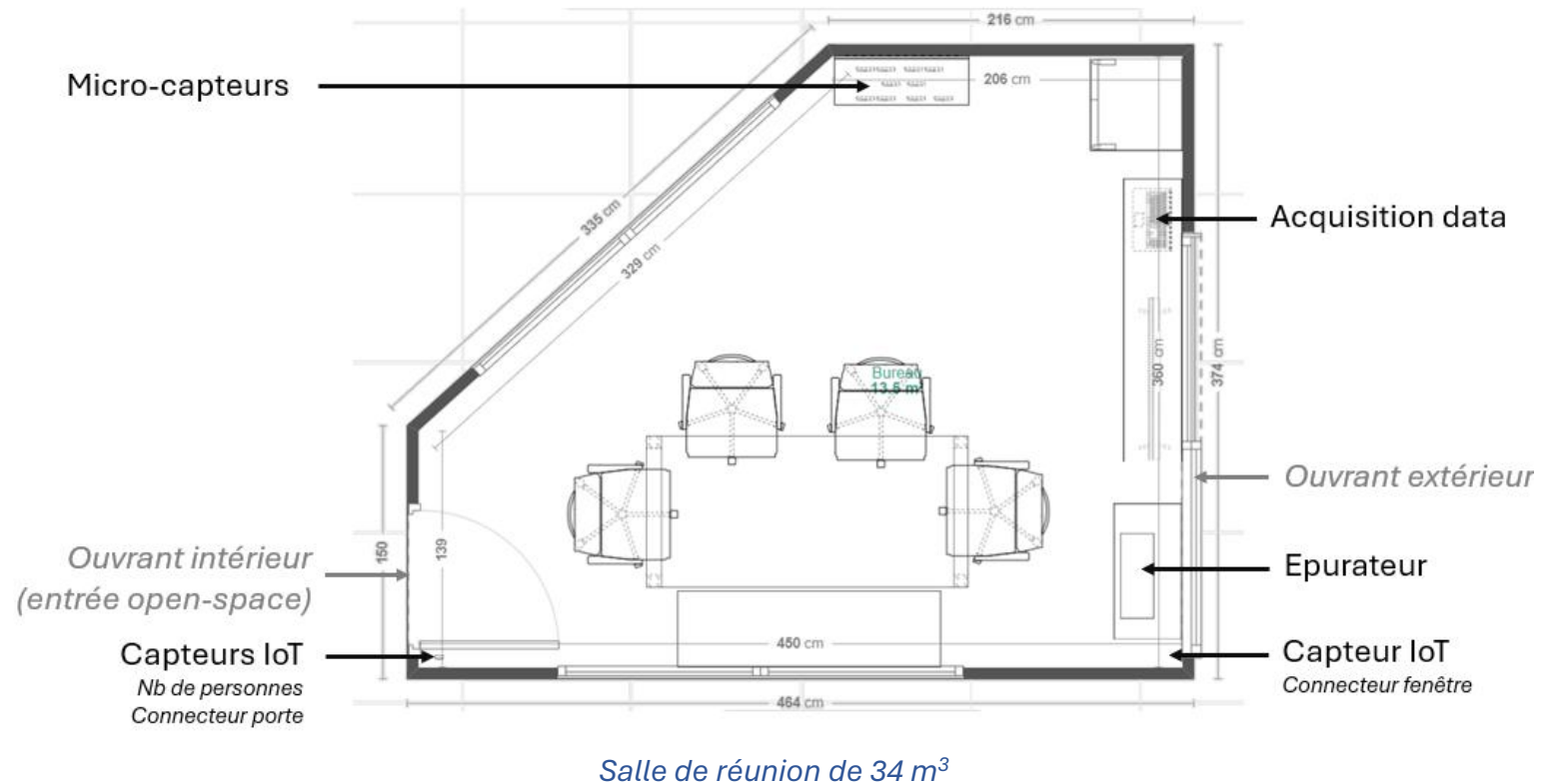
Lieu souvent inoccupé

1 fenêtre sur l'extérieur (fond urbain)

1 porte sur open-space

Du 28/10/2024 au 11/12/2024

114 phases d'épurations



Lieux d'étude (n°2/3)

Bureau type open-space

Volume : 200 m^3

Nombre de personnes : entre 0 et 6

Lieu souvent occupé

1 fenêtre + 1 porte sur l'extérieur (fond urbain)

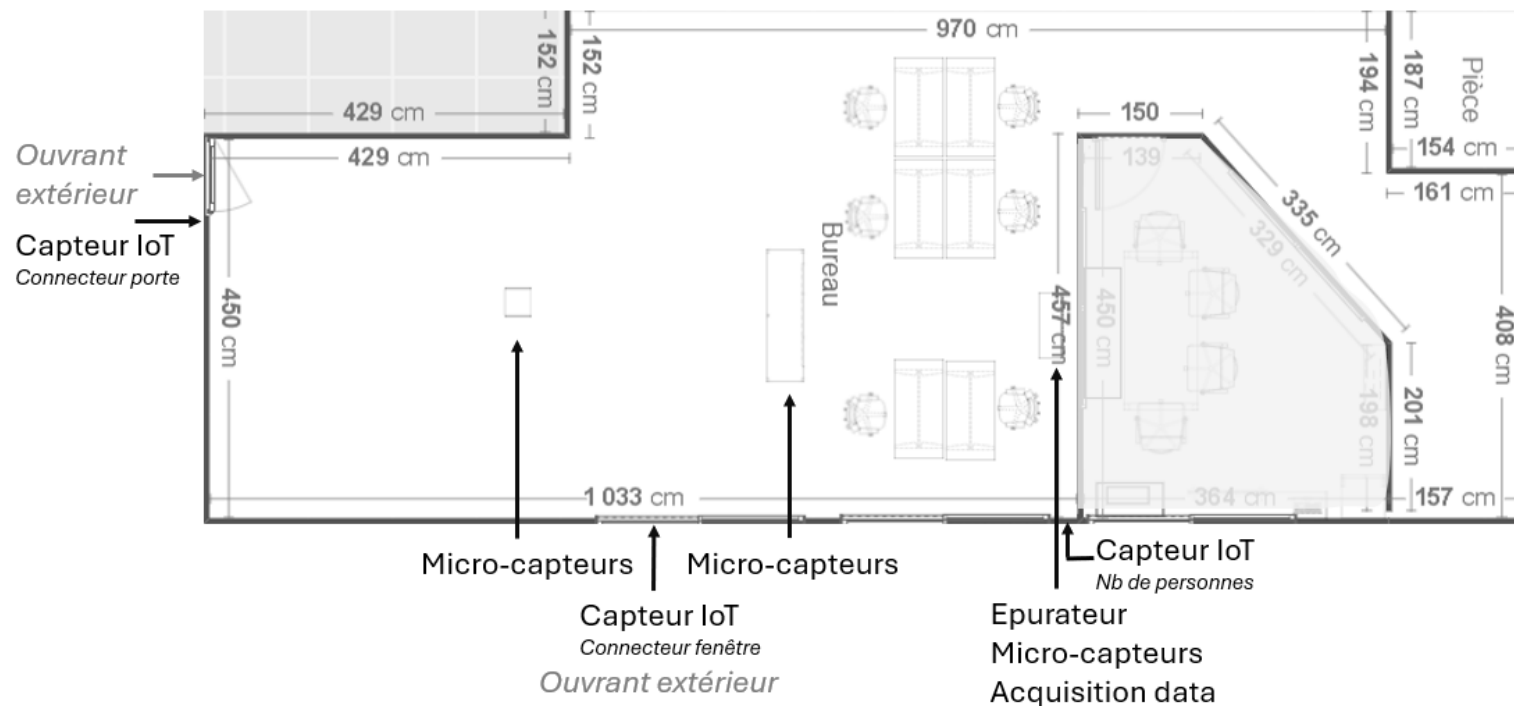
1 porte sur salle de réunion

Du 11/12/2024 au 13/01/2025 (hiver)

99 phases d'épurations

Du 03/03/2025 au 14/04/2025 (printemps)

100 phases d'épurations



Open-space de 200 m³

Lieux d'étude (n°3/3)

Bureau type open-space (FDS)Volume : 55 m³

Nombre de personnes : entre 0 et 4

Lieu souvent occupé

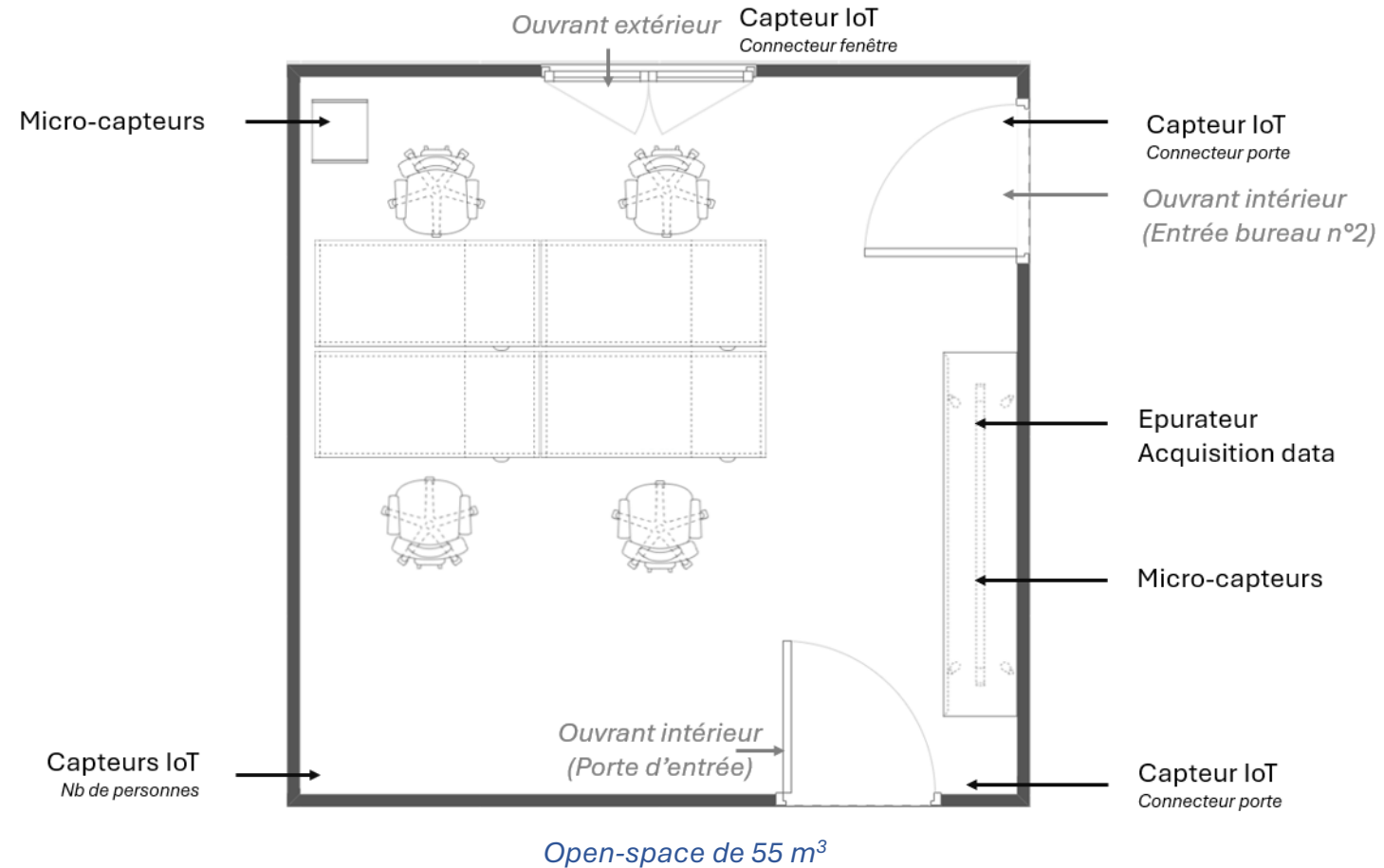
1 fenêtre sur l'extérieur (trafic – boulevard St Michel)

1 porte sur open-space

1 porte sur couloir

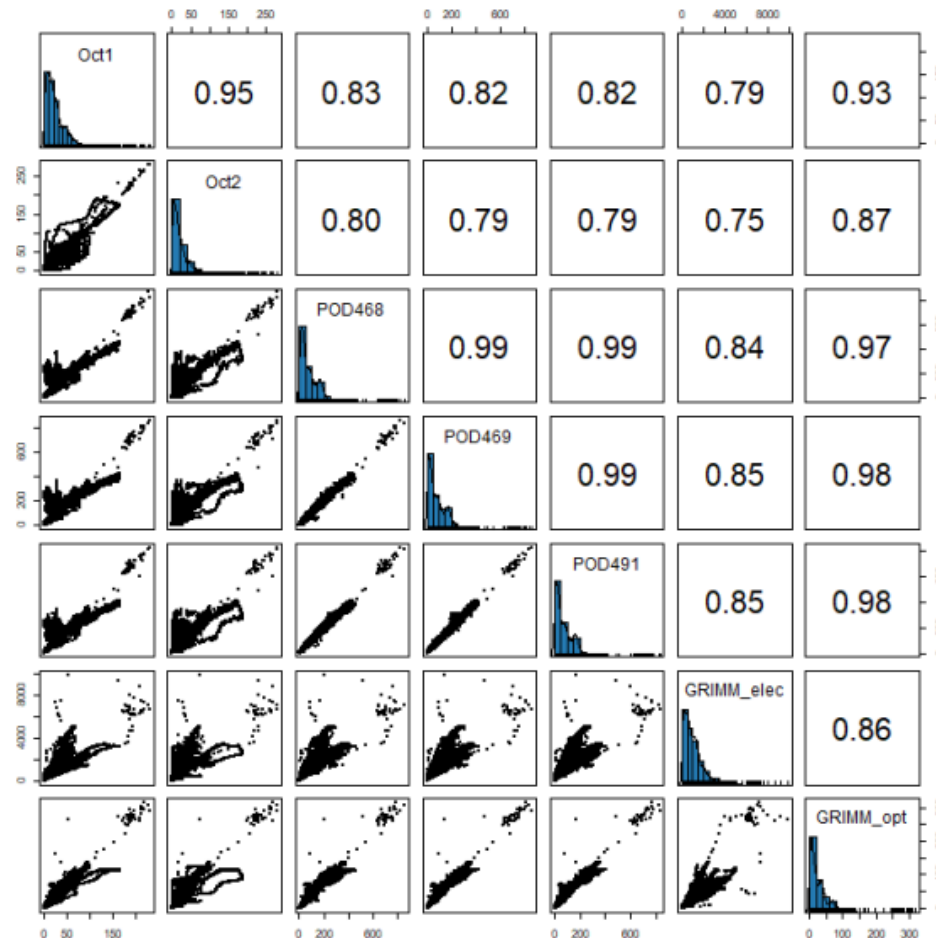
Du 13/01/2025 au 03/03/2025

137 phases d'épurations



Analyse statistique

Corrélation entre les instruments de mesure



Matrice de nuages de points et de coefficients de corrélation de Pearson
entre les mesures des différents capteurs (expérience salle de réunion)

- Très bons coefficients de corrélation entre les instruments de mesure entre eux (POD2 (468, 469, 491) ; Octopus 1 et 2) (**R entre 0,81 et 0,99**)
- Bonne homogénéité des mesures entre les micro-capteurs et le compteur GRIMM sur sa gamme optique (**R entre 0,87 et 0,98**)
- Corrélations plus faibles sur la gamme électrique (**R entre 0,75 et 0,85**)
- **Utilisation de micro-capteurs pertinente** pour caractériser l'efficacité dynamique d'un épurateur en conditions réelles

Indicateurs d'efficacité (QAST1)

1) L'abattement maximal moyen

Défini par la formule suivante : $\frac{N_0 - N_F}{N_0} \times 100$

Avec :

N_0 : concentration initiale en nombre de particules fines mesuré en moyenne par minute durant les 15 minutes avant le démarrage de l'appareil

N_F : concentration finale en nombre de particules fines mesuré en moyenne par minute durant les 15 dernières minutes de la phase des deux heures de fonctionnement de l'appareil

Résultats :

- L'abattement max moyen varie entre **11 et 22 %** selon les instruments de mesure pour un **débit inférieur à 1 vol/h**
- L'abattement max moyen varie entre **26 % et 73 %** selon les instruments pour des **débats variant entre 1,1 et 5,9 vol/h**
- Les résultats observés sur **453 phases d'épuration** indiquent des valeurs proches selon les épurateurs pour des débits compris entre >1 et 6 vol/h

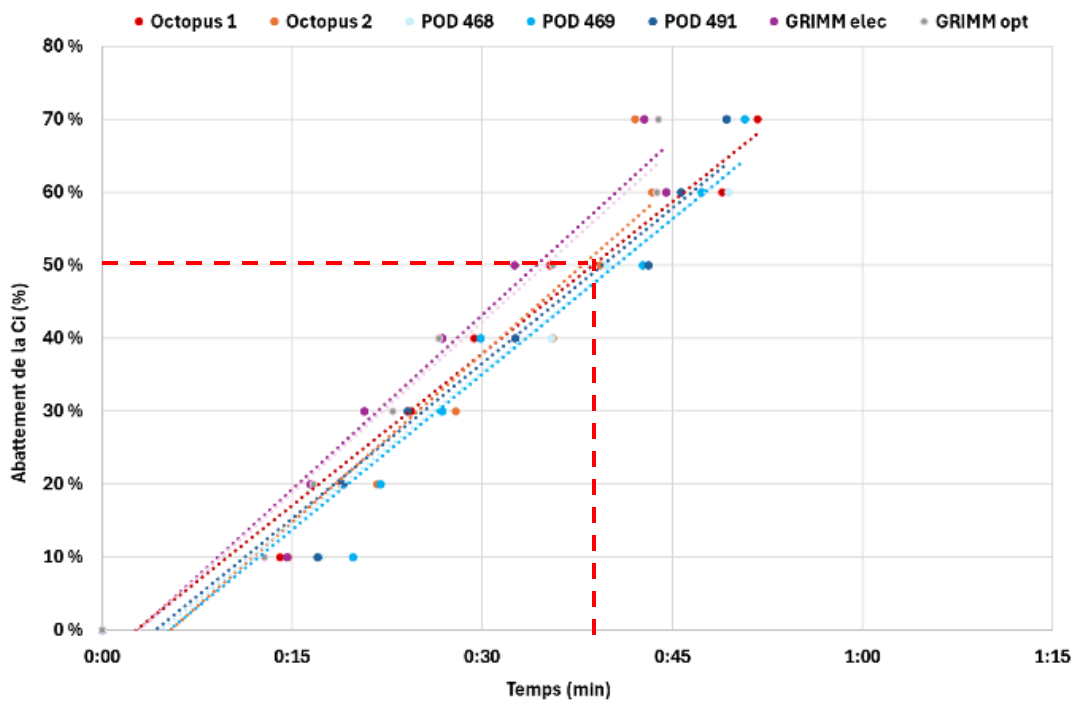
Pièce	Epurateur	Débit (vol/h)	Abattement max moyen (%)		
			POD2	Octopus	GRIMM
Salle de réunion 0-6 personnes (34 m³)	A	4,6	[54-55]	[63-66]	64
Open-space 0-6 personnes (200 m³) Hiver	A	0,8	[18-19]	[17-18]	22
	A	1,2	[54-59]	[53-57]	56
Open-space 0-6 personnes (200 m³) Printemps	B	1,6	[61-70]	[61-62]	
	C	1,1	[51-52]	[53-54]	
	E	0,5	[11-12]	[11-13]	
Open-space 0-4 personnes (55 m³)	A	2,9	[57-60]	[56-58]	
	B	5,9	[46-47]	NC	
	C	4,1	[66-68]	[26-66]	
	D	5,0	[72-74]	[71-72]	

Tableau 1 : abattement maximal moyen obtenu pour chaque pièce

Indicateurs d'efficacité (QAST1)

2) Le T₅₀ par modèle linéaire

Temps (en minutes) requis par l'épurateur pour atteindre 50 % d'abattement par rapport à la concentration initiale (C₀) définie comme la moyenne des concentrations mesurées durant les 15 minutes précédant la mise en fonctionnement de l'appareil.



Pièce	Epurateur	Débit (vol/h)	T ₅₀ (minutes)		
			POD2	Octopus	GRIMM
Salle de réunion 0-6 personnes (34 m ³)	A	4,6	[40-43]	[35-39]	34
Open-space 0-6 personnes (200 m ³) <i>Hiver</i>	A	0,8	[72-78]	[73-90]	78
	A	1,2	[38-60]	[36-43]	52
Open-space 0-6 personnes (200 m ³) <i>Printemps</i>	B	1,6	[40-51]	NC	
	C	1,1	[67-70]	[59-67]	
	E	0,5	NC	NC	
Open-space 0-4 personnes (55 m ³)	A	2,9	[58-60]	[50-55]	
	B	5,9	[21-25]	NC	
	C	4,1	[45-46]	[31-44]	
	D	5,0	[6-37]	[31-40]	

Tableau 2 : indicateur T₅₀ obtenu pour chaque pièce expérimentée

Indicateurs d'efficacité (QAST1)

3) L'efficacité selon la concentration initiale (C_0)

Cet indicateur correspond à une diminution calculée sur 2h de fonctionnement, en fonction de la concentration en nombre initiale avant mise en fonctionnement de l'épurateur, durant la période d'étude considérée (au moins une semaine).

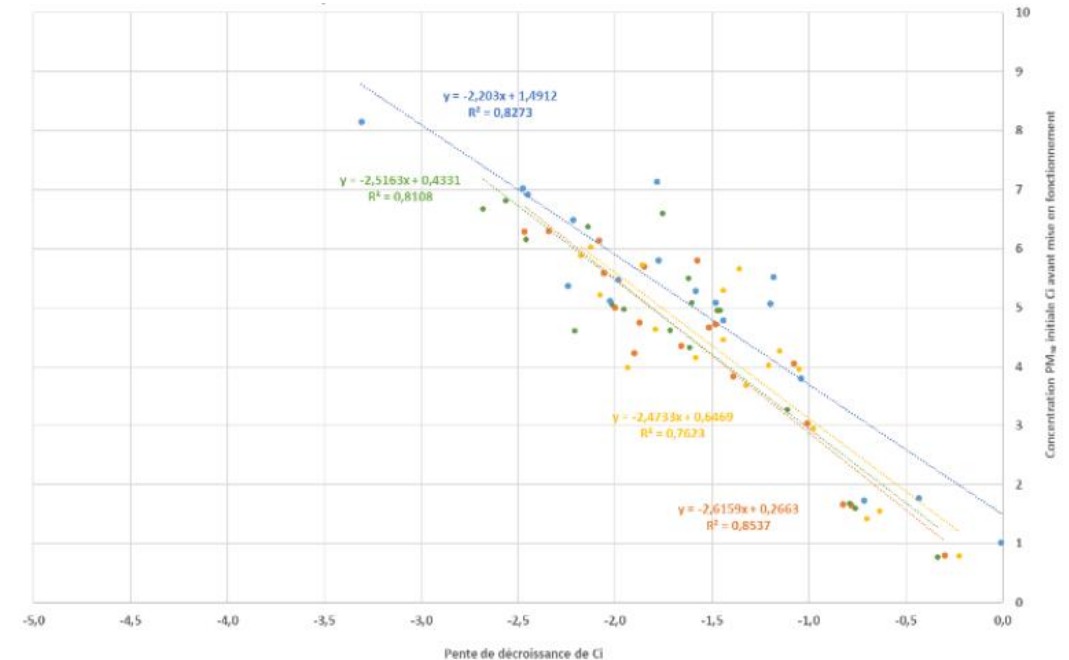
Cette diminution correspond à la formule suivante : $\frac{N_0 - N_F}{2h \text{ de fonctionnement}}$

Avec :

N_0 : concentration moyenne par minute en nombre de particules fines des 15 minutes avant démarrage de l'appareil

N_F : concentration moyenne par minute en nombre de particules fines des 15 dernières minutes de la phase de fonctionnement de 2 heures

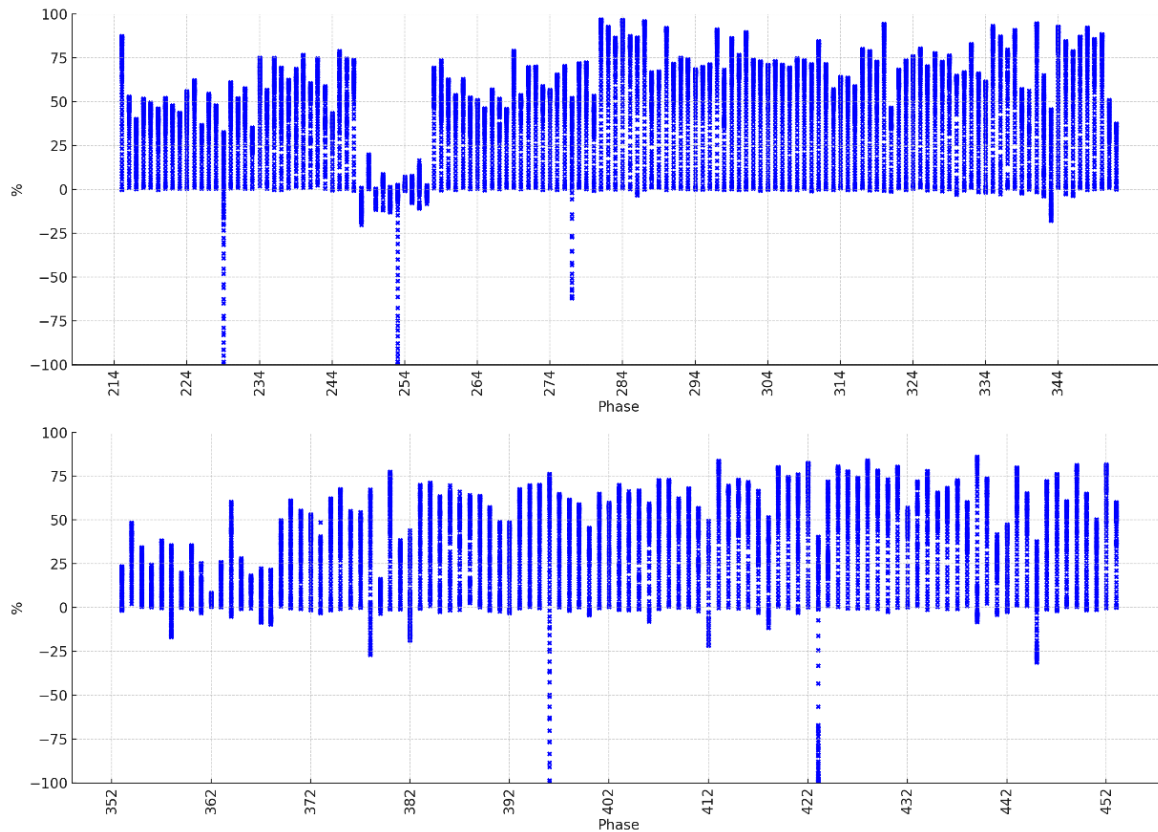
La courbe obtenue permet d'indiquer une diminution moyenne au bout de 2h en fonction d'une concentration en nombre initiale de particules fines.



- ⇒ Si ces indicateurs globaux offrent une première appréciation de l'efficacité d'épuration de l'air en conditions réelles, ils masquent des disparités importantes liées aux contextes d'usage et conditions environnementales
- ⇒ Afin de mieux comprendre la variabilité observée selon les phases d'épuration et d'identifier les facteurs influençant l'efficacité en conditions réelles, une étude statistique a été menée

Analyse statistique

Répartition des cinétiques par classe de stabilité



Phases d'épuration dans l'open-space FDS (55 m³)
Phases d'épuration dans l'open-space (200 m³) – printemps

Résultats :

Sur 453 phases d'épuration, il est observé que :

- **87 % des phases (393)** présente un abattement positif (efficacité variable)
- **13 % des phases (60)** présente un abattement négatif pendant au moins 20 % du temps de la phase d'épuration (*impact négatif sur les indicateurs d'efficacité en conditions réelles*)

L'efficacité des épurateurs en conditions réelles d'usage semble conditionnée par :

- L'usage des occupants (gestion des ouvrants, débit de l'appareil, nombre de personnes...)
- Les conditions environnementales (saisons, configuration des locaux)

Analyse statistique

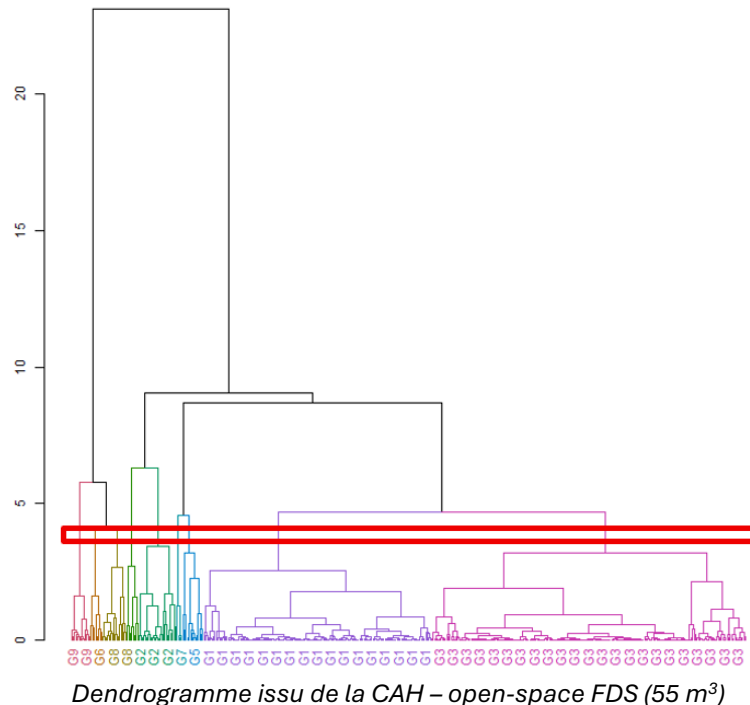
Classification Ascendante Hiérarchique

Premières observations :

- Parmi les phases les plus efficaces (abattements positifs), des cinétiques stables caractérisées par une croissance puis un plateau
- Parmi les phases les moins efficaces (abattement négatifs ou faiblement positifs), de nombreux comportements aléatoires

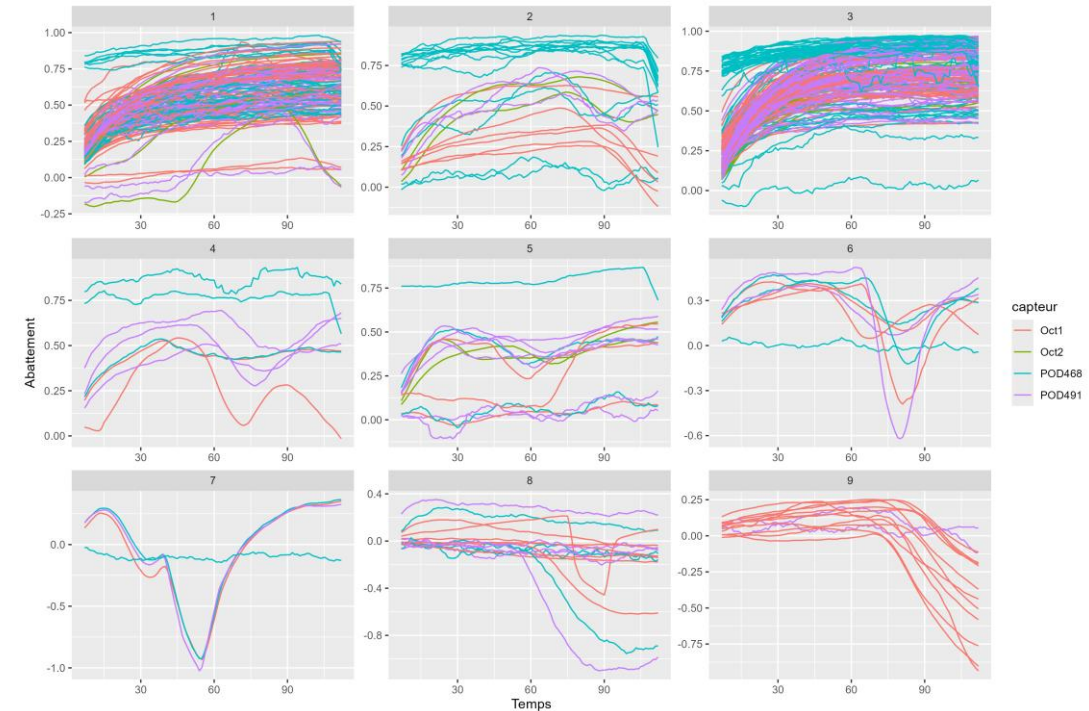
Objectif : regrouper différents profils d'épuration par une **Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)**

Dendrogramme, 9 groupes



Exemple de résultats observés sur la CAH dans l'open-space FDS :

- Forte variabilité entre les classes
- Classes 1 et 3 considérées comme « stables »
- Autres classes considérées comme « erratiques » (sensibilité aux facteurs extérieurs...)



Analyse statistique

Classification Ascendante Hiérarchique

La CAH laisse suggérer que plusieurs facteurs influencent la performance des épurateurs en conditions d'usage :

- **Concentration initiale (C_0)** : impact sur la pente et l'amplitude de l'abattement
- **Occupation** : remise en suspension et nouvelles sources internes
- **Ouverture fenêtres/portes** : modification des flux d'air, apports extérieurs
- **Débit de l'épurateur** : capacité de traitement par unité de temps
- **Pollution extérieure** : apports particulaires via gradient de concentration
- **Caractéristiques propres** : technologie, filtres, géométrie, positionnement

La CAH offre un aperçu descriptif => comment expliquer ces différences et tenter de quantifier certains facteurs ?

Objectif : déterminer un modèle statistique le mieux adapté aux classes « stables » pour quantifier l'effet des variables sur la stabilité (et l'efficacité)

Analyse statistique

Choix d'un modèle statistique

Choix initial porté sur 5 modèles
(bibliographie et retex) :

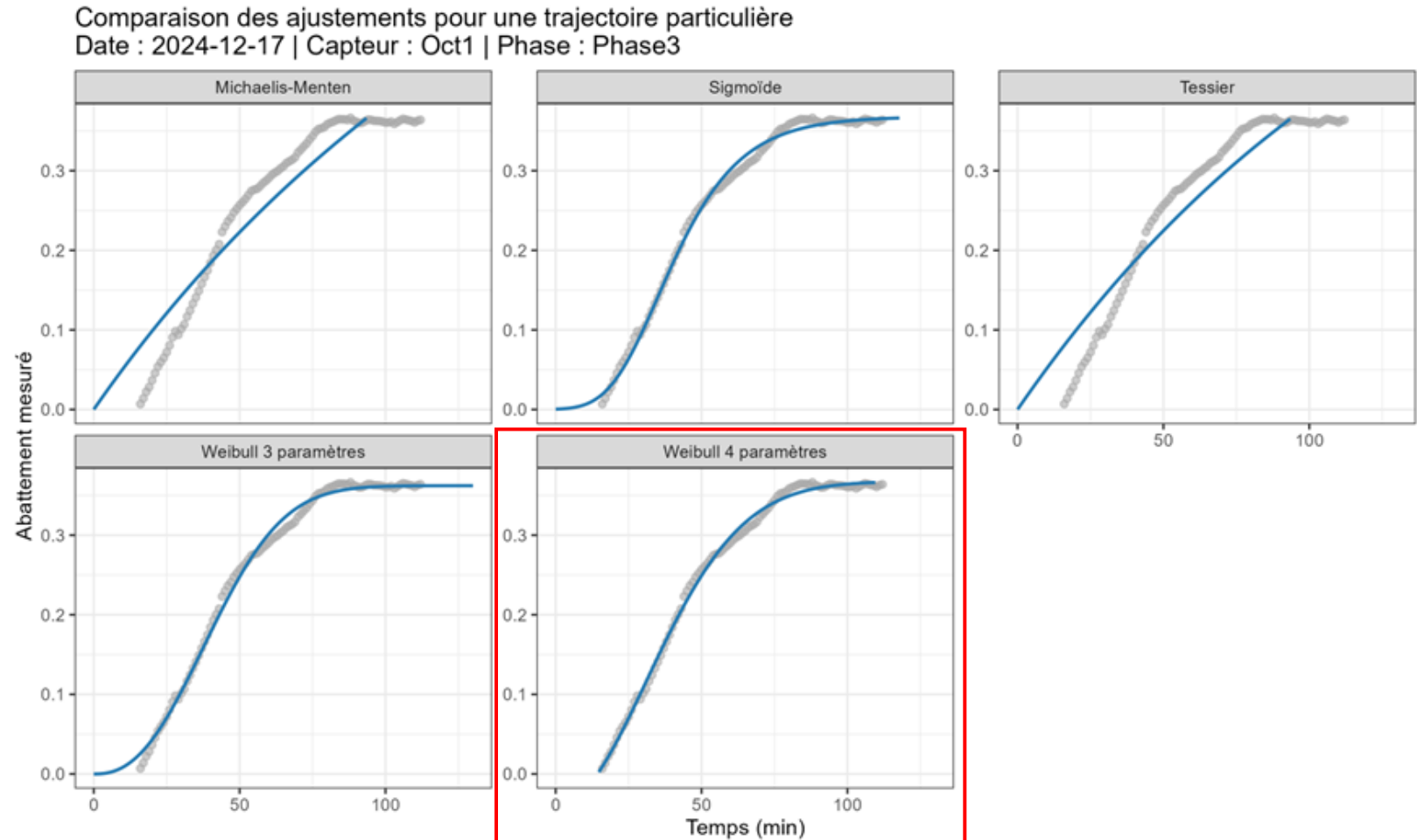
- Modèle de Tessier
- Modèle de cinétique enzymatique de Michaelis-Menten
- Modèle de Weibull à 3 paramètres
- Modèle de Weibull à 4 paramètres
- Modèle sigmoïde à 5 paramètres

=> Après analyse statistique, **modèle de Weibull à 4 paramètres privilégié**

$$\text{Abattement} = \text{plateau} \cdot \lambda \cdot e^{-k \cdot t^\beta}$$

Reprise des paramètres sur le modèle :

- **Pente**
- **Abattement maximal (ordonnée du plateau)**
- T_{50}
- R^2



Analyse statistique

Effet des déterminants sur la stabilité et l'efficacité

	Stabilité					Efficacité				
Déterminants	Salle de réunion (34 m³)	Open-space (200 m³) hiver	Open-space FDS (55 m³)	Open-space (200 m³) print.	Global	Salle de réunion (34 m³)	Open-space (200 m³) hiver	Open-space FDS (55 m³)	Open-space (200 m³) print.	Global
Concentration initiale (C ₀)	Positif	Positif	Positif	Positif	Positif	Dépend des cas d'usage	Positif	NS	Positif	Dépend des cas d'usage
Capteur	Impact significatif	NS	Impact significatif	Impact significatif	Impact significatif	Impact significatif	NS	Impact significatif	Impact significatif	Dépend des cas d'usage
Epurateur			Impact significatif	Impact significatif	Impact significatif			Impact significatif	Impact significatif	Impact significatif
Nombre de personnes		Négatif	Négatif	Positif	Dépend des cas d'usage		Négatif	Négatif	NS	Dépend des cas d'usage
Débit de l'épurateur		Positif			Positif		Dépend des cas d'usage			Dépend des cas d'usage
Fermeture porte bureau			Positif	NS	Dépend des cas d'usage			Positif	Négatif	Dépend des cas d'usage
Fermeture porte entrée			NS		NS			Dépend des cas d'usage		Dépend des cas d'usage
Fermeture fenêtre				Positif	Positif				NS	NS
Pollution extérieure	Non étudiable Inter-colinéarité avec la C ₀									

Tableau 3 : influence des paramètres sur la stabilité et l'efficacité des cinétiques

Le modèle statistique permet d'objectiver les observations qualitatives : l'efficacité d'un épurateur n'est pas « fixe » mais pilotée par des paramètres liés aux contextes d'usages

Un dimensionnement efficient (contrôle du débit, des ouvrants, de l'occupation...) rend la stabilité prédictible

=> Permet de jouer sur la reproductibilité de l'efficacité réelle

Conclusion & perspectives

Fiabilité des mesures :

Bonne cohérence entre capteurs (écarts < 10 % en moyenne)

Efficacité variable selon le contexte :

Abattement maximal de 70 % dans les configurations optimales (espaces clos, faibles perturbations)

Efficacité réduite (< 20 %) dans les espaces ouverts ou perturbés

Temps pour atteindre 50 % d'abattement (T_{50}) : de 40 min (volumes réduits et clos) à 80 min (grands espaces/mieux ventilés)

Nuisances sonores ressenties par les occupants, corrélées à l'augmentation du débit d'air

Variabilité intrinsèque du réel → inefficacité apparente dans les mesures ≠ inefficacité intrinsèque de l'appareil

Facteurs influençant l'efficacité :

Concentration initiale (C_0) : augmente l'abattement final et réduit le T_{50}

Présence d'occupants : tend à diminuer le plateau et l'abattement final

Débit d'épuration : effet positif sur le plateau et négatif sur le T_{50}

Fermeture des ouvrants : augmente le plateau réduit le T_{50}

Recommandations et suites :

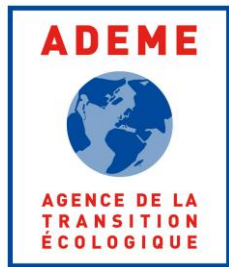
Adapter le choix et le dimensionnement des épurateurs au contexte réel (volume, occupation, ventilation)

Développer un indicateur global d'efficacité en conditions réelles pour un futur référentiel opérationnel

Étendre l'approche à d'autres types de bâtiments (scolaires, résidentiels, centre de santé)

Merci aux partenaires de l'étude

Institutionnel

Fournisseurs du matériel de mesure
& capteurs IoTFournisseurs des solutions
de traitement de l'air

Annexe 1 : Récapitulatif des expérimentations menées

QAST2		2024									2025																
		S44	S45	S46	S47	S48	S49	S50	S51	S52	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15		
Lieu	Pièce expérimentée	Salle de réunion						Open-space Airea				Bureau FDS						Open-space Airea									
	Volume	34 m³						200 m³				55 m³						200 m³									
	Nombre de personnes	0-6										0-4						0-6									
	Nombre de portes	1						2				2						2									
	Nombre de fenetres	1						1				1						1									
Epurateur	Marque & modèle	Fellowes AM3S										Fell. AS2	Teqoya E500		AirInSpace HEPA Bulle		Life01 Element®		Teqoya E500		Fellowes AS2						
	Conso énergétique (kWh)	0,07										0,06		0,02		0,05		-		0,02		0,06					
	Débit (m³/h)	158										238		158		323		225		275		90		225		323	
	Débit (vol/h)	4,6						0,8				1,2		2,9		5,9		4,1		5		0,5		1,1		1,6	
Mesures int.	Paramètres	Nb de particules (#/cm³) ; PM ₁₀ ; PM ₂₅ ; PM ₁ ; T°C ; %HR ; CO ₂																									
	Niveau sonore (dB)	61						62				58						51									
	Capteurs	6 capteurs (0,1m)						2 capteurs (0,1 m) 3 capteurs (3,6 m) 3 capteurs (6,1 m)				3 capteurs (0,1m) 2 capteurs (3 m)						2 capteurs (0,1 m) 3 capteurs (3,6 m) 3 capteurs (6,1 m)									
Mesures ext.	Paramètres	Nb de particules (#/cm³) ; PM ₁₀ ; PM ₂₅ ; PM ₁ ; T°C ; %HR																									
	Capteurs	1 capteur																									

Annexe 2 : mesures complémentaires

Objectif : caractériser l'impact d'un épurateur sur les concentrations de bactéries et moisissures dans l'air ambiant

Méthodologie : prélèvement sur gélose au moyen d'un bio-impacteur Sampl'Air

3 prélèvements réalisés sur une durée de 1 minute :

- 15 minutes avant fonctionnement
- Pendant fonctionnement (après 1h)
- 15 minutes après fonctionnement

	Moisissures	Bactéries
15 minutes avant fonctionnement	280 ufc/m ³	410 ufc/m ³
Pendant fonctionnement	20 ufc/m ³	540 ufc/m ³
15 minutes après fonctionnement	50 ufc/m ³	280 ufc/m ³

Résultats obtenus :

- Diminution significative pour les moisissures
- Concentrations erratiques pour les bactéries

→ **Nécessité d'affiner les résultats par la réalisation de mesures sur plus de phases et plus de prélèvement pendant le fonctionnement**



Illustration de la méthode de prélèvement des bactéries et moisissures