

Reproduire et contrôler les conditions de l'air intérieur en laboratoire :

IRINA (*Innovative Room for Indoor Air studies*)



Frédéric THEVENET, Nadine LOCOGE

Structure et contexte de la présentation ...

#1

➔ *Bibliographie :*
Les pièces expérimentales existantes

#2

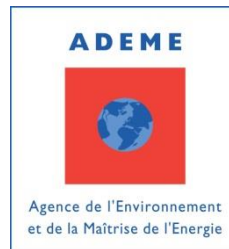
➔ *Présentation d'IRINA :*
Caractéristiques, principe, validation

#3

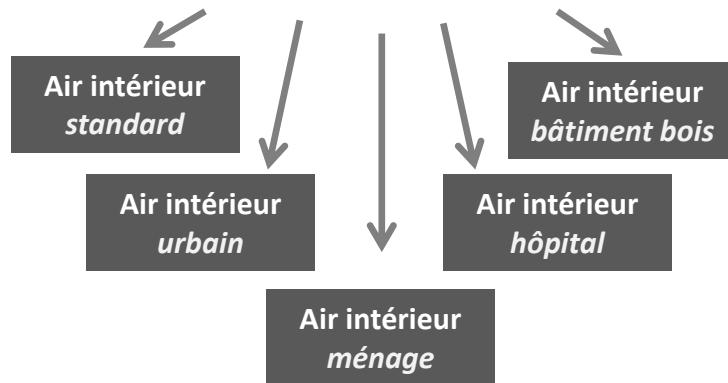
➔ *Exemple de mise en œuvre :*
Activité ménage & traitement de l'air

Évaluation de l'innocuité des systèmes de Traitement d'Air intérieur par PhotocatalysE

ÉTAPE



Objectif : évaluer les performances et l'innocuité de systèmes commerciaux de traitement d'air par photocatalyse en conditions réalistes.



#1

➤ ***Bibliographie :***

Les pièces expérimentales existantes



Etat de l'art des chambres expérimentales ...

①

Volume des
chambres

②

Matériaux de
revêtement

③

Taux de
renouvellement

Analyse de 18 publications scientifiques (1986 – 2015), sélectionnées selon 3 critères

→ Développement /
description détaillée
d'une chambre expé.

→ Mise en oeuvre d'une
chambre expérimentale
 $V > 1 \text{ m}^3$

→ Problématique QAI
(émission, expo,
traitement,...)

Sexton, Webber et al. 1986
Vu-Duc and Huynh 1989
Moschandreas, Choi et al. 1996
Lee, Lam et al. 2001
Guo, Murray et al. 2004
Lee and Wang 2004
Baek and Jenkins 2004
Lee, Yermakov et al. 2004
Paulsen 2005

Carter, Fitz et al. 2005
Langer, Moldanová et al. 2008
Huang, Chen et al. 2012
Destailats, Sleiman et al. 2012
Miclo 2013
Isaxon, Dierschke et al. 2013
Hagerman, Isaxon et al. 2014
Wei, Xiong et al. 2014
Gunschera, Markewitz et al. 2015

Etat de l'art des chambres expérimentales ...

①

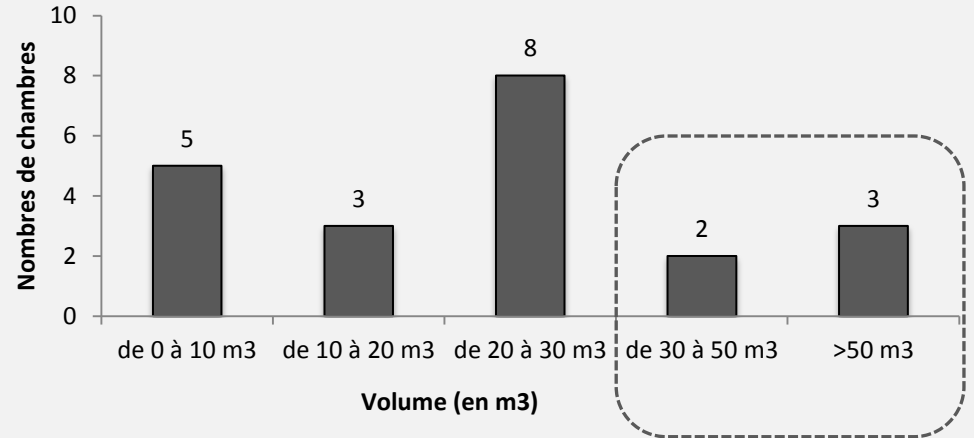
Volume des
chambres

②

Matériaux de
revêtement

③

Taux de
renouvellement



➔ Les volumes observés se répartissent entre 1 et 100 m³

➔ Seul 20% des chambres offrent une dimension réaliste

☑ *surface* > 10 m²

☑ *volume* > 30 m³

Etat de l'art des chambres expérimentales ...

①

Volume des
chambres

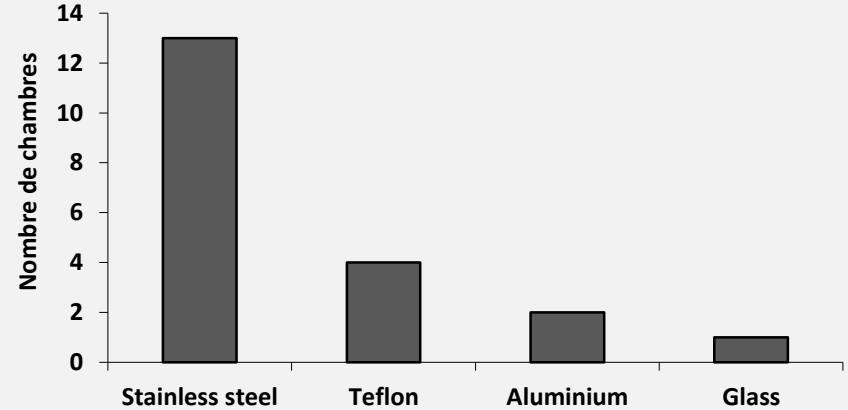
②

Matériaux de
revêtement

③

Taux de
renouvellement

La nature du revêtement de la chambre est essentielle car elle impacte directement l'interaction gaz / surface.



- Les chambres en INOX sont majoritaires
- Intérêt de ces 4 matériaux : maîtrise de l'interface gaz / surface

→ *non poreux, peu adsorbant, non-émissif, faiblement réactifs*

Etat de l'art des chambres expérimentales ...

1

Volume des
chambres

2

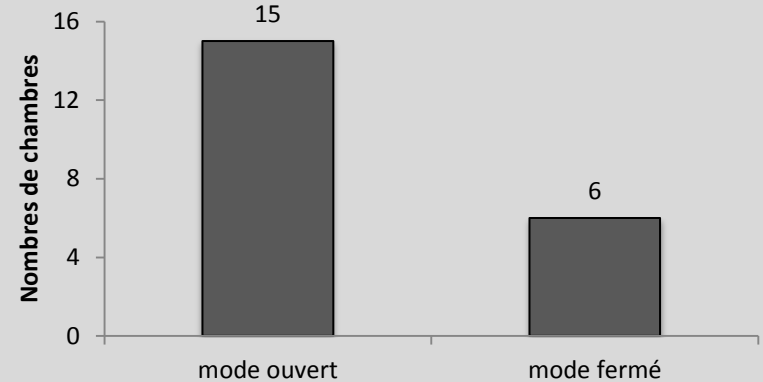
Matériaux de
revêtement

3

Taux de
renouvellement

Le taux de renouvellement d'air et la gestion de flux d'air permettent de classer les chambres suivant deux modes de fonctionnement :

Ouvert vs. Fermé



➤ Mode OUVERT : introduction mécanique d'un débit d'air extérieur contrôlé, généralement, le taux de renouvellement d'air est supérieur à 1 h^{-1} .

➔ La température, l'humidité relative et les niveaux résiduels de polluants sont conditionnés par la nature de l'air entrant.

➤ Mode FERME : on cherche à minimiser les interactions entre l'air de la chambre et l'air extérieur, généralement, le taux de renouvellement d'air est inférieur à 1 h^{-1} .

➔ Température et humidité relative sont contrôlables par des systèmes "bouclés", la pollution résiduelle est difficilement évacuable.

Les contraintes imposées à une pièce expérimentale ...

L'air intérieur est un système variable et multi-influencé, comment reproduire / contrôler au mieux les différents déterminants de la QAI...?

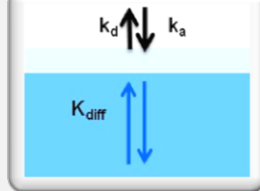
$$C_{\text{int}}(t) = f(\tau ; K, k_a, k_d ; n, C_{\text{ext}} ; k_c)$$



Taux d'émission
(sources internes)

Choix du matériau.
Vieillessement du matériau.

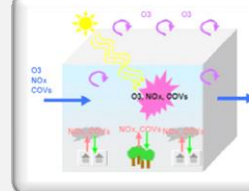
Choix des instruments
internes à la chambre
(sondes, climatiseur, etc...).



C^{stes} de sorption
(interaction gaz/surfaces)

Choix du matériau.

Caractérisation des
propriétés de sorption à long
termes.



C^{stes} de réaction
(homogène/hétérogène)

Caractérisation des
concentrations en polluants
/ oxydants.

Caractérisation de la
réactivité de surface.



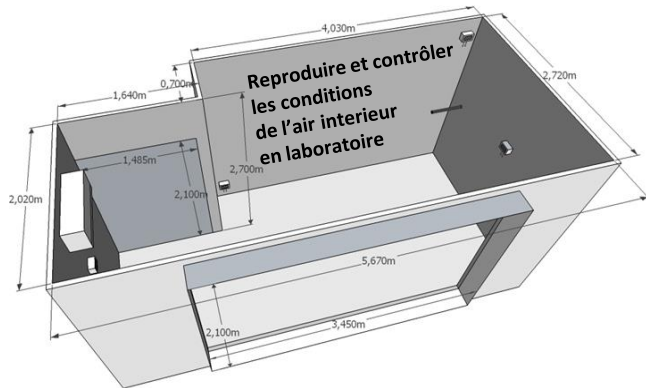
Taux de renouvel^t
(concentrations externes)

Maîtrise des flux d'air
entrant et sortant, taux de
renouvellement.

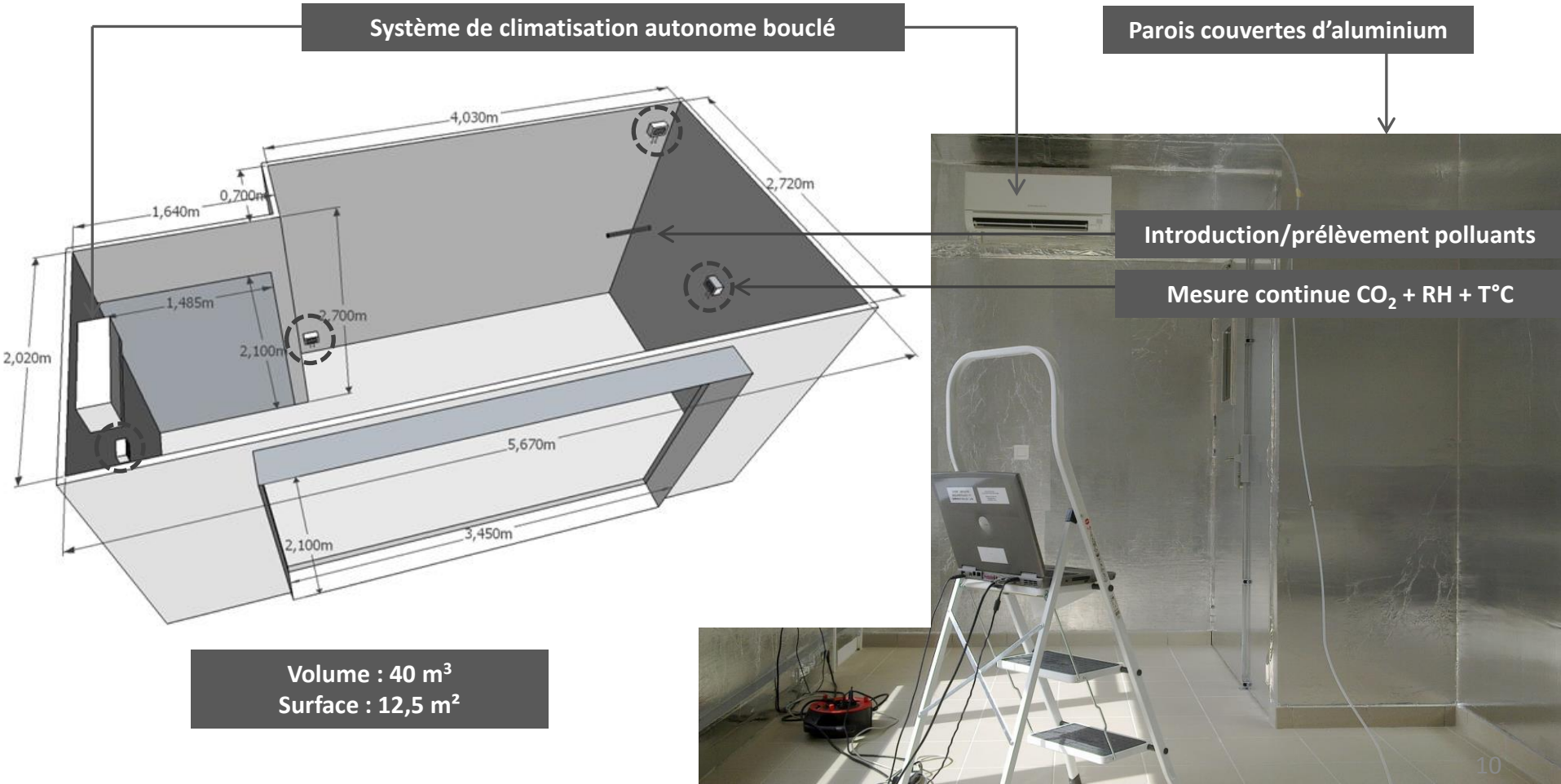
Caractérisation des niveaux
de blancs en polluants.

#2

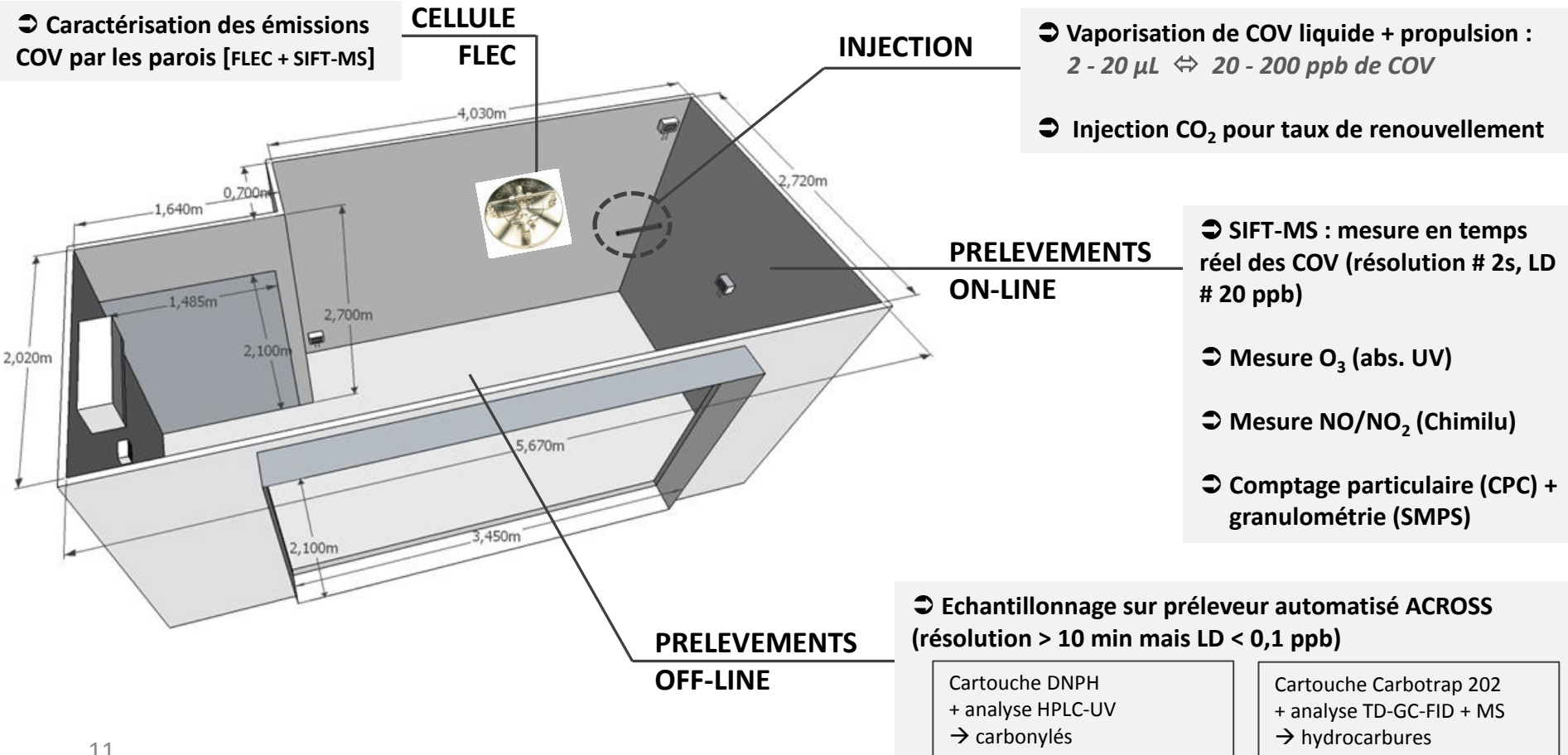
➤ **Présentation d'IRINA :**
Caractéristiques, principe, validation



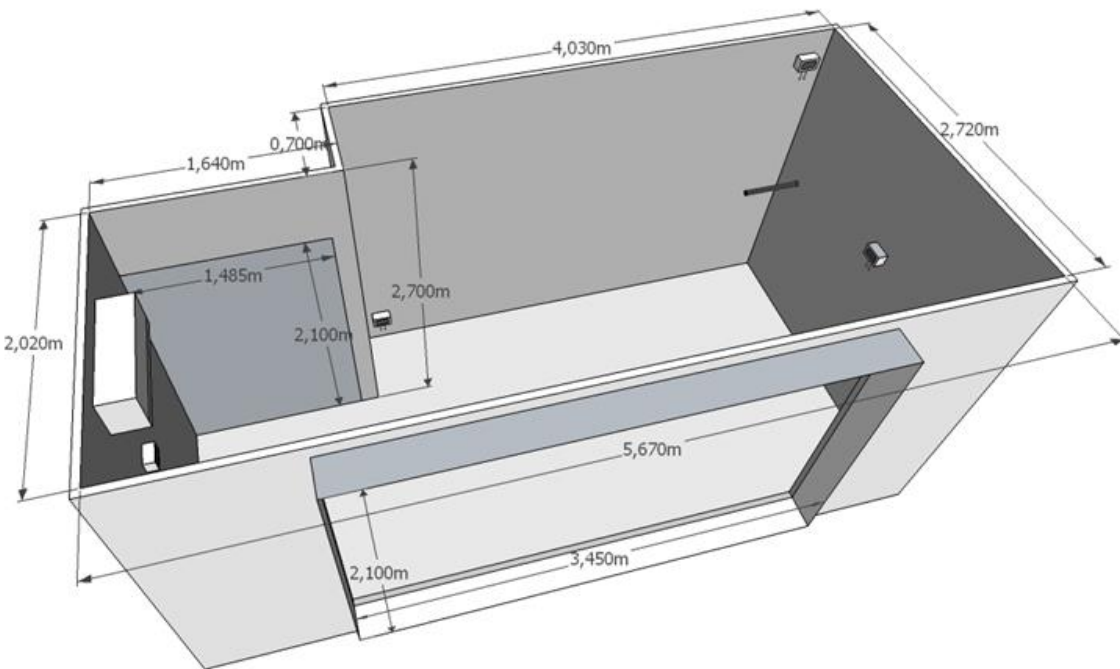
Caractéristiques techniques de la pièce expérimentale IRINA ...



Instrumentation de la pièce expérimentale IRINA ...



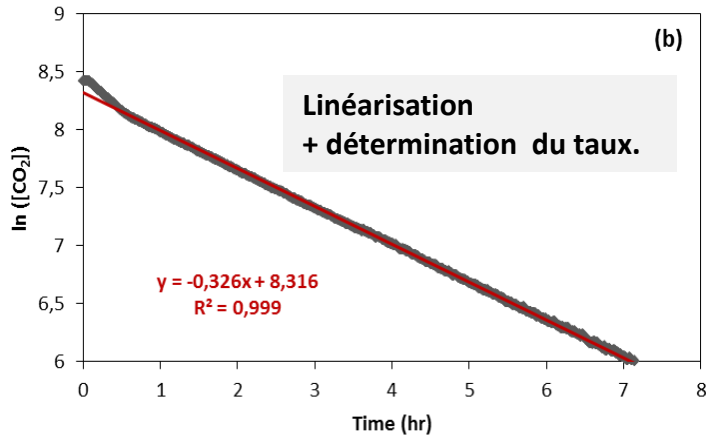
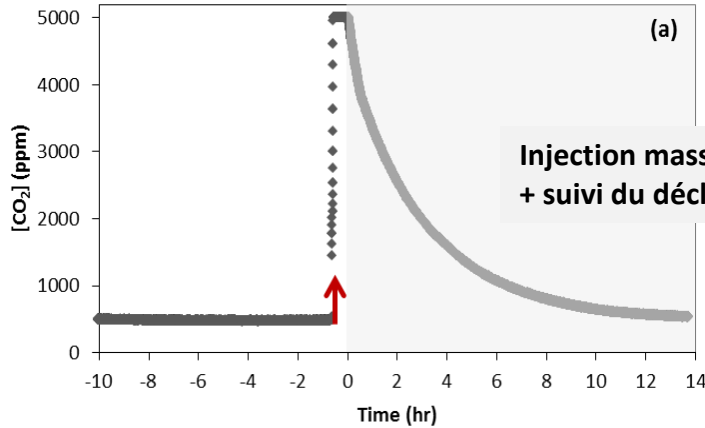
Les points de validation de la pièce expérimentale IRINA ...



5 points de validation de la pièce :

- ✓ Taux de renouvellement d'air
- ✓ Régulation de T°C et niveau RH
- ✓ Niveaux de blancs
- ✓ Injection et homogénéité des COV
- ✓ Evaluation des pertes aux parois

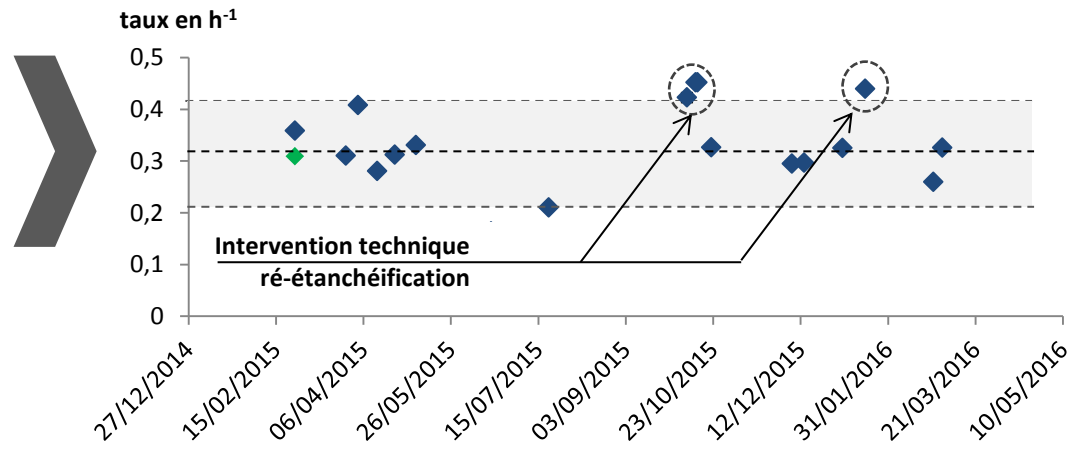
Taux de Renouvellement d'air / IRINA ...



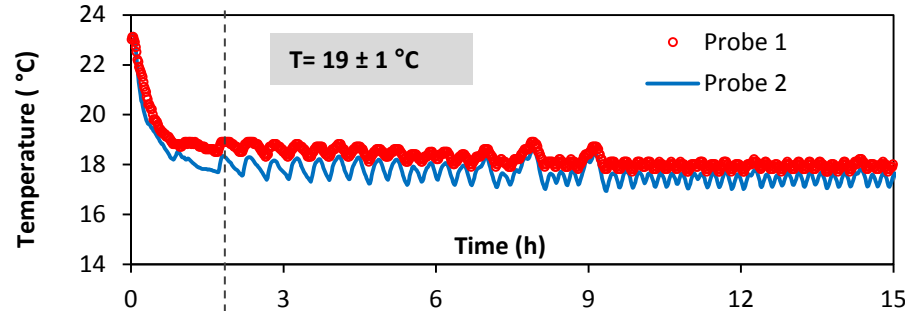
OBJECTIF : Utiliser la pièce expérimentale en mode fermé, i.e. avec un taux de renouvellement d'air faible, maîtrisé et stable dans le temps.

☑ Carte de contrôle du taux de renouvellement d'air sur 1,5 an :

Taux de renouvellement : $0,22 < \tau < 0,42 \text{ h}^{-1}$, valeur moyenne $0,32 \text{ h}^{-1}$



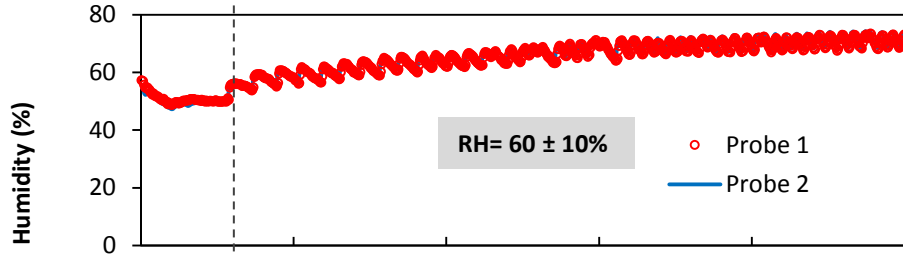
Régulation de température et d'humidité ...



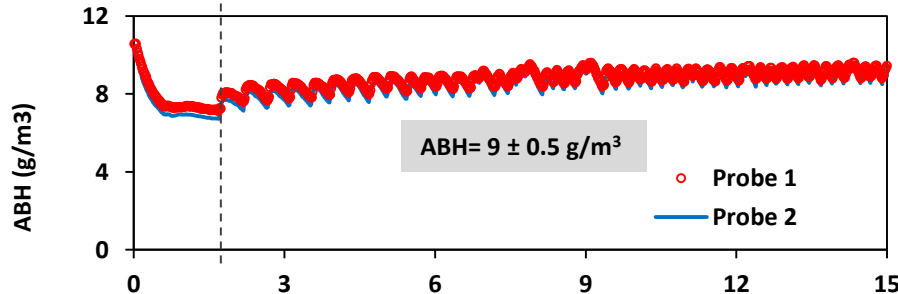
Température initiale : 23°C

Consigne : 19°C

→ Consigne atteinte en 1h30, homogène sur les 4 sondes de la pièce : $19 \pm 1^\circ\text{C}$



Sur la gamme de température couverte par le test entre 23 et 19°C , l'humidité relative reste comprise entre 50 et 70 % → Compatible avec l'air intérieur



L'humidité absolue de la pièce reste stable : $9 \pm 1 \text{ g/m}^3$ uniquement impactée par les conditions climatiques extérieures.

Niveaux de blancs / IRINA ...

OBJECTIF :

1/ Assurer un suivi régulier des niveaux de blancs de l'ensemble des espèces gazeuses pour :

- Vérifier l'absence de contamination par une source extérieure
- Vérifier l'absence de contamination par les parois

2/ Maintenir des niveaux de blancs BAS sur l'ensemble des espèces pour :

- Limiter la réactivité intrinsèque à la pièce
- Permettre la mesure des espèces injectées et des sous-produits gazeux ou particuliers générés

Ozone :

[O₃] < LD = 0,4 ppb

NO :

[NO] < 0,2 ± 0,04 ppb

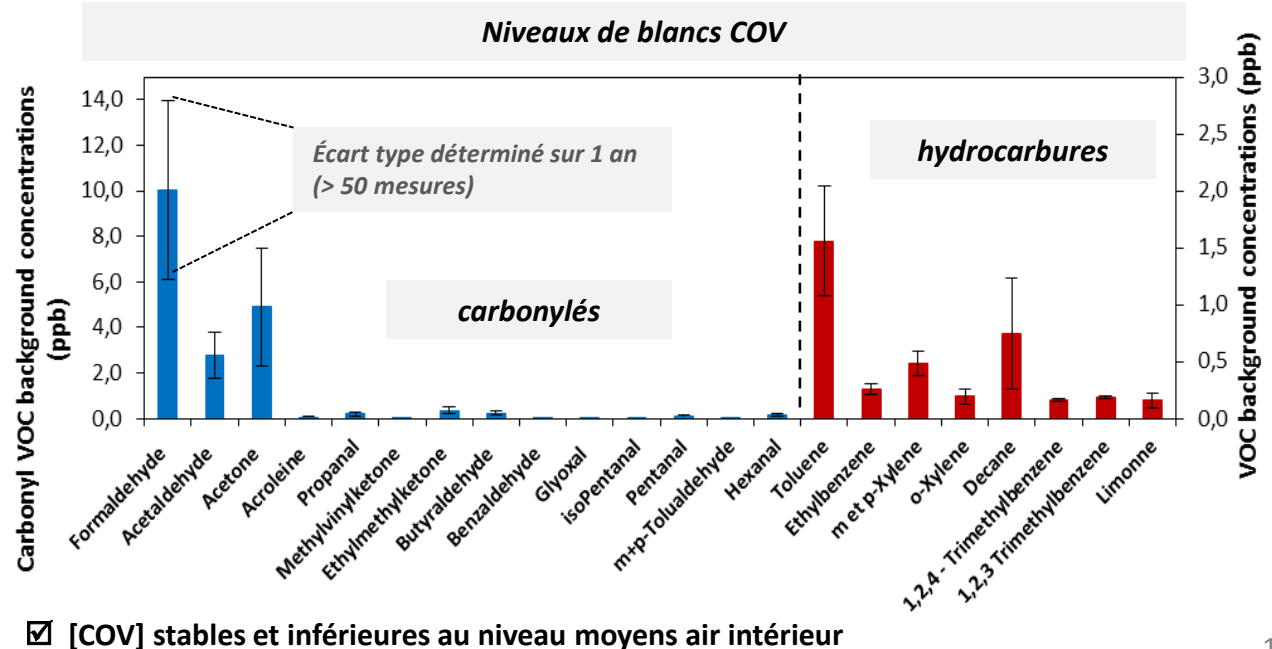
NO₂ :

[NO₂] < 6 ± 4 ppb

Particule :

part < 2000 ± 500 cm⁻³

☑ Inférieur aux niveaux typiques de l'air intérieur et compatible avec les mesures envisagées.



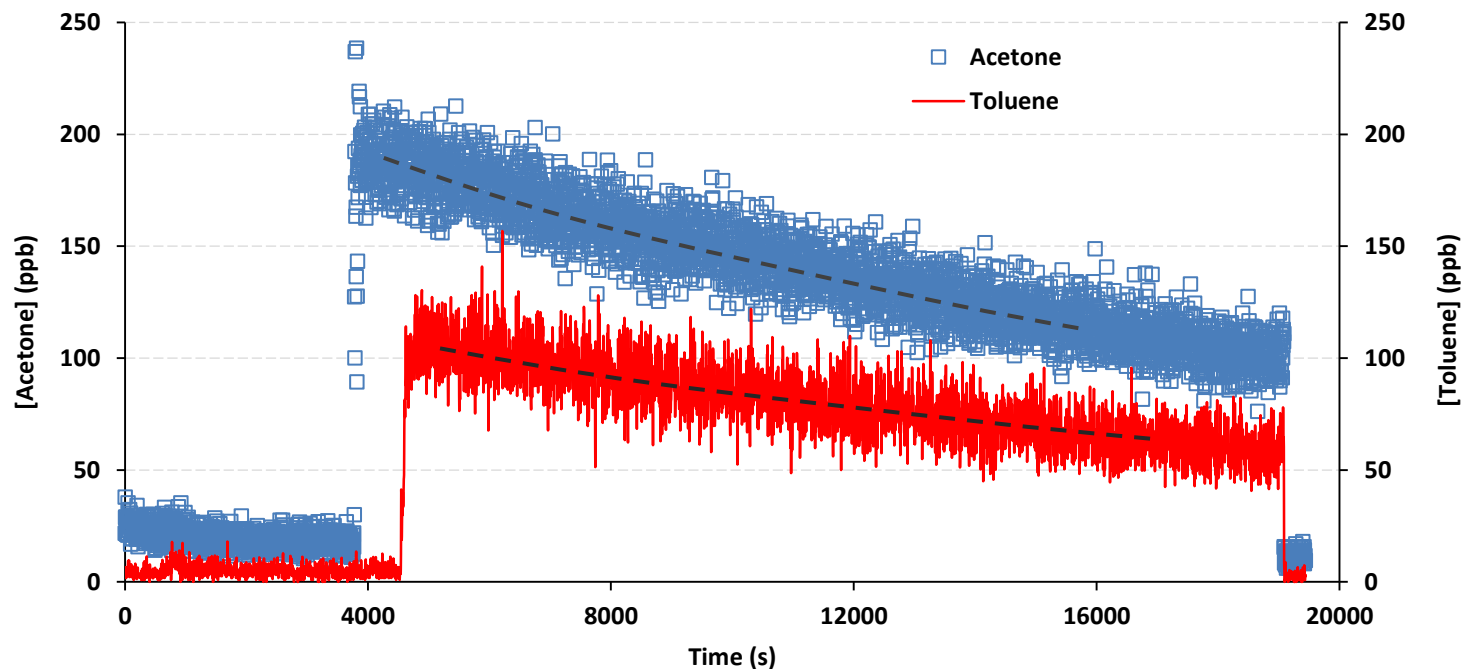
Injection des COV, homogénéité et pertes au parois / IRINA ...

OBJECTIF : Renseigner la cinétique de diffusion des COV, leurs déclinés naturels et les pertes éventuelles aux parois.

→ Concentration max atteinte en 120-180 s

→ Plus de 90 % du COV liquide injecté est retrouvé en phase gaz

	<i>Vol. injecté</i>	<i>Conc. Max. Théo.</i>	<i>Conc. Max. Exp.</i>
acétone	24 μ L	200 ppb	190 ± 20 ppb
toluène	20 μ L	120 ppb	110 ± 10 ppb



Injection des COV, homogénéité et pertes au parois / IRINA ...

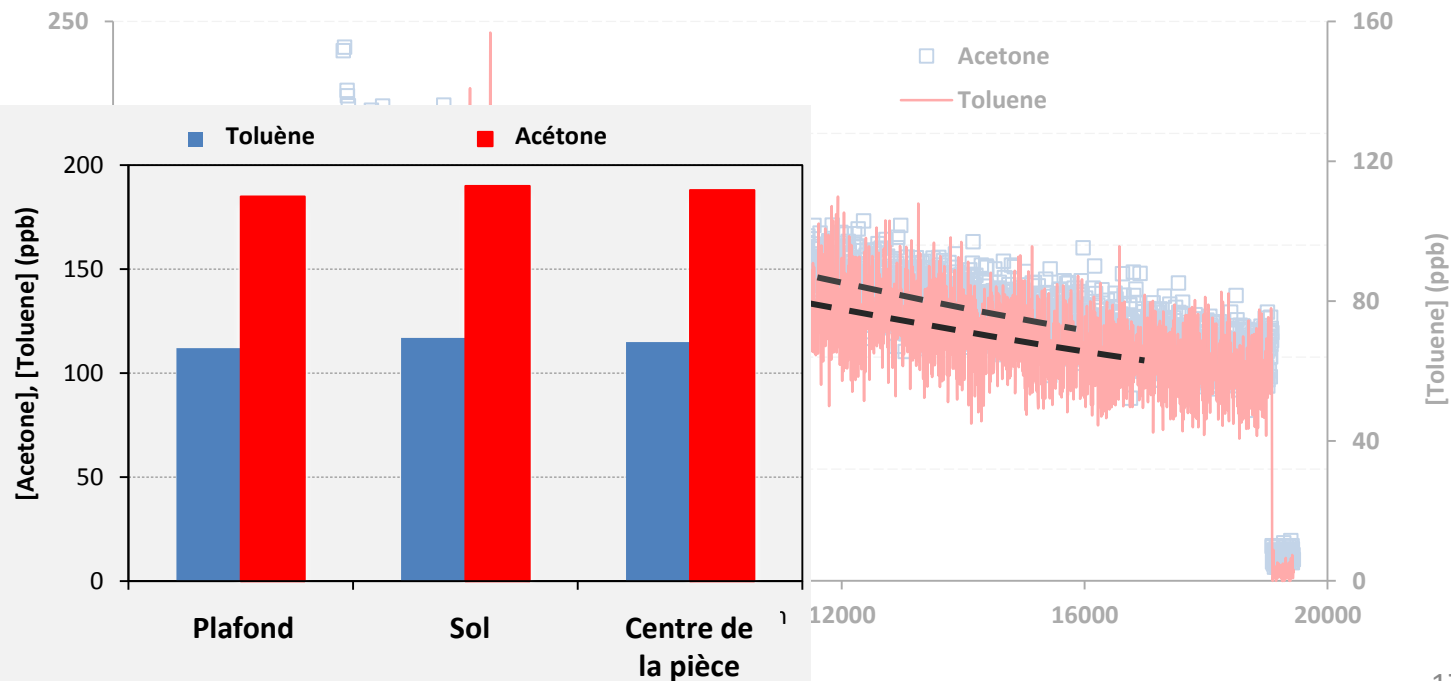
OBJECTIF : Renseigner la cinétique de diffusion des COV, leurs déclinés naturels et les pertes éventuelles aux parois.

	Vol. injecté	Conc. Max. Théo.	Conc. Max. Exp.
acétone	24 μL	200 ppb	190 ± 20 ppb
toluène	20 μL	120 ppb	110 ± 20 ppb

→ Concentration max atteinte en 120-180 s

→ Plus de 90 % du COV liquide injecté est retrouvé en phase gaz

Les concentrations sont-elles homogènes dans le volume de la pièce ?



Injection des COV, homogénéité et pertes au parois / IRINA ...

OBJECTIF : Renseigner la cinétique de diffusion des COV, leurs déclinés naturels et les pertes éventuelles aux parois.

	<i>Vol. injecté</i>	<i>Conc. Max. Théo.</i>	<i>Conc. Max. Exp.</i>
acétone	24 μL	200 ppb	190 ± 20 ppb
toluène	18 μL	100 ppb	100 ± 20 ppb

→ Concentration max atteinte en 120-180 s

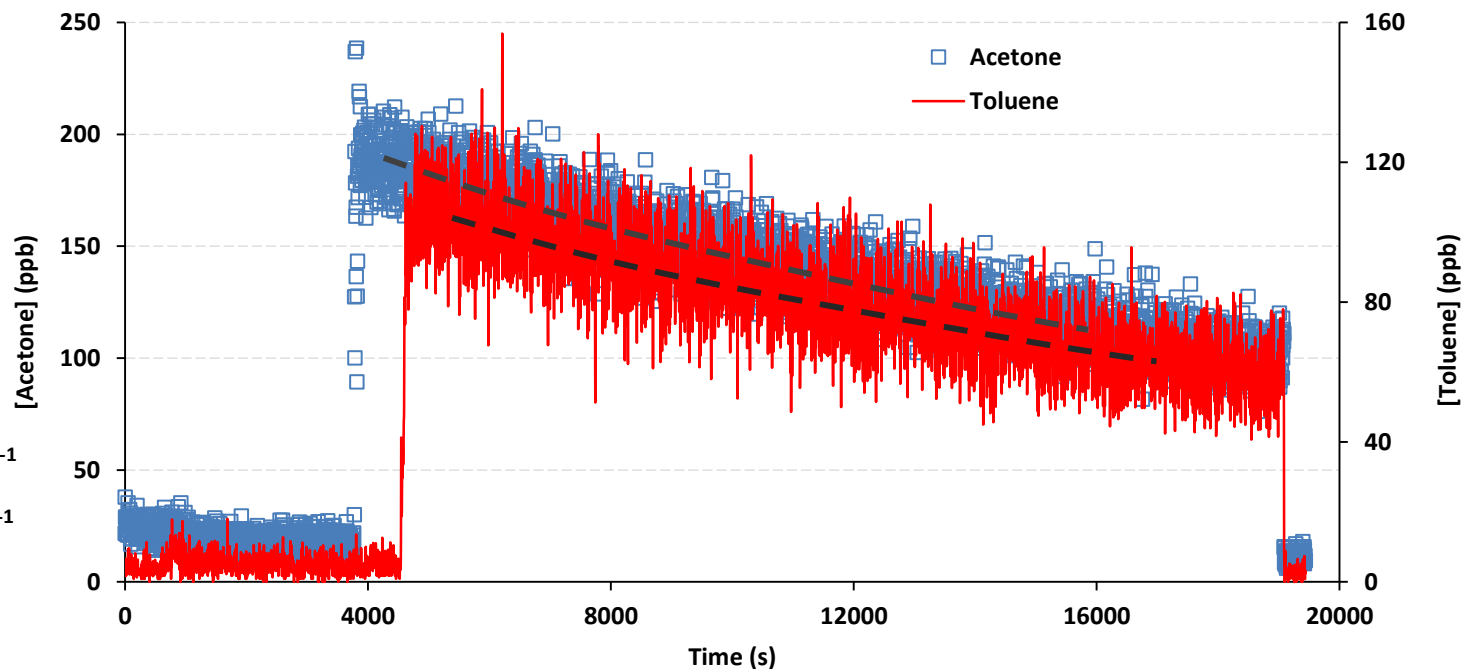
→ Plus de 90 % du COV liquide injecté est retrouvé en phase gaz

→ Possibilité de déterminer les déclinés naturels des COV

$$\tau(\text{acétone}) = 0,22 \pm 0,4 \text{ h}^{-1}$$

$$\tau(\text{toluène}) = 0,21 \pm 0,4 \text{ h}^{-1}$$

$$\tau(\text{CO}_2) = 0,20 \pm 0,2 \text{ h}^{-1}$$



Injection des COV, homogénéité et pertes au parois / IRINA ...

OBJECTIF : Renseigner la cinétique de diffusion des COV, leurs déclin naturels et les pertes éventuelles aux parois.

	<i>Vol. injecté</i>	<i>Conc. Max. Théo.</i>	<i>Conc. Max. Exp.</i>
acétone	24 μL	200 ppb	190 ± 20 ppb
toluène	18 μL	100 ppb	100 ± 20 ppb

→ Concentration max atteinte en 120-180 s

→ Plus de 90 % du COV liquide injecté est retrouvé en phase gaz

→ Possibilité de déterminer les déclin naturels des COV

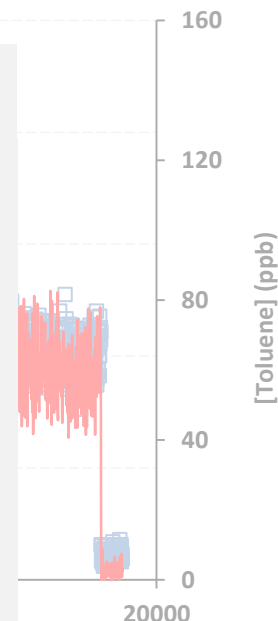
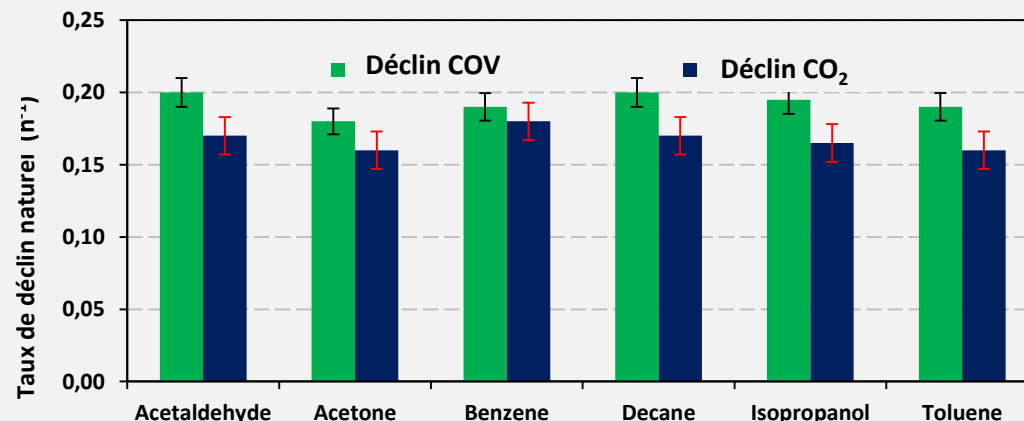
$$\tau(\text{acétone}) = 0,22 \pm 0,4 \text{ h}^{-1}$$

$$\tau(\text{toluène}) = 0,21 \pm 0,4 \text{ h}^{-1}$$

$$\tau(\text{CO}_2) = 0,20 \pm 0,2 \text{ h}^{-1}$$

Les écarts entre $\tau(\text{COV})$ et $\tau(\text{CO}_2)$ indiquent que les pertes de COV par dépôt sur les parois restent inférieures à 15 % sur 4h

→ Impact faible des phénomènes de piégeage sur les parois



OBJECTIF : Définir une équation simple caractérisant la dynamique des espèces gazeuses [X] dans IRINA

$$\frac{d[X]}{dt} = \frac{d[X]_{Out}}{dt} + \cancel{\frac{d[X]_E}{dt}} + \cancel{\frac{d[X]_{Hom}}{dt}} + \cancel{\frac{d[X]_{Het}}{dt}} - \cancel{\frac{d[X]_D}{dt}} - \cancel{\frac{d[X]_{ads}}{dt}} + \cancel{\frac{d[X]_{des}}{dt}}$$

$$\frac{d[X]_{Out}}{dt} = k_n \cdot [X]$$

$$\frac{d[X]}{dt} = k_n \cdot [X]$$

$$\ln(X) = k_n \cdot t + \ln(X_0)$$



Pas de réactivité inter-COV
Concentration en oxydant très faibles

Les taux de déclins des COV sont supérieurs de seulement 15% à ceux de CO₂
→ Pas de phénomène de perte hétérogène significatif

Les pertes très faibles aux parois évitent le stockage sur les surfaces et donc la désorption ultérieure.

#3

➤ *Exemple de mise en œuvre :*

Activité de ménage & traitement de l'air



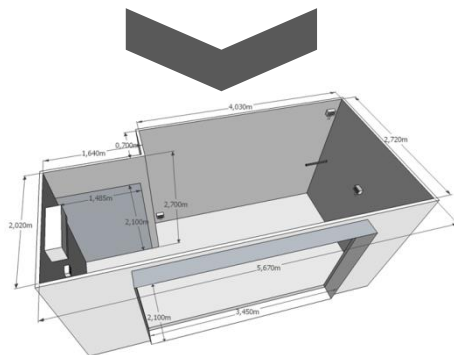


Projet ADOC



❶ Fortement émetteur de limonène qui est un précurseur d'AOS

❷ Très largement représenté dans les habitudes de ménage françaises



Blanc 1 h
(particules, COV
et COVO)

5 min d'émission

Analyses
pendant 5h

Dispersion 20 g de CIF
sur plaque en verre
(eau chaude + éponge)

Rinçage à l'eau
chaude

PARTICULES

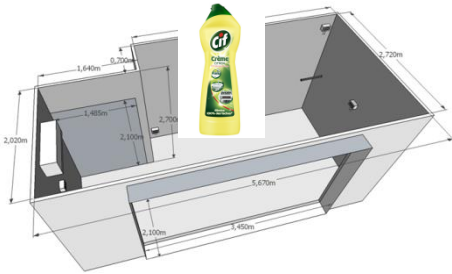
SMPS (DMA-CPC) : 1 scan toutes les 5 min

COV

SIFT-MS: scan 1 h continue suivi de 15 scans de 5 min

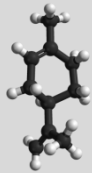
5 prélèvements de 1h sur DNPH et carbotrap

Emission produit ménager / IRINA ...

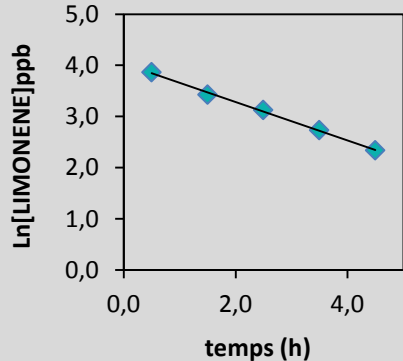


- d-limonène (39 ± 7 ppb)
- eucalyptol ($2 \pm 0,35$ ppb)
- isocinéole (< 2 ppb)
- camphène
- o-cymène
- p-cymenène

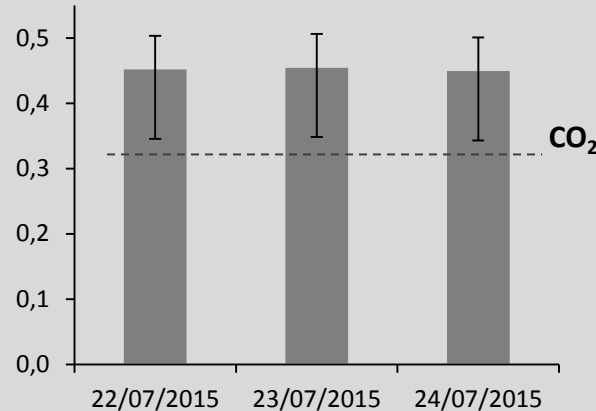
- \emptyset : COVO $< 0,01$ ppb
- \emptyset : Pas d'émission de particules



Détermination du déclin naturel du Limonène



déclin naturel limonène (h^{-1})



Déclin naturel reproductible
 τ (limonène) = $0,45 \pm 0,10 \text{ h}^{-1}$
Perte aux parois $< 30\%$
supérieur aux hydrocarbures plus légers

Evaluation des performances de traitement de l'atmosphère « ménage » par deux systèmes photocatalytiques de traitement d'air

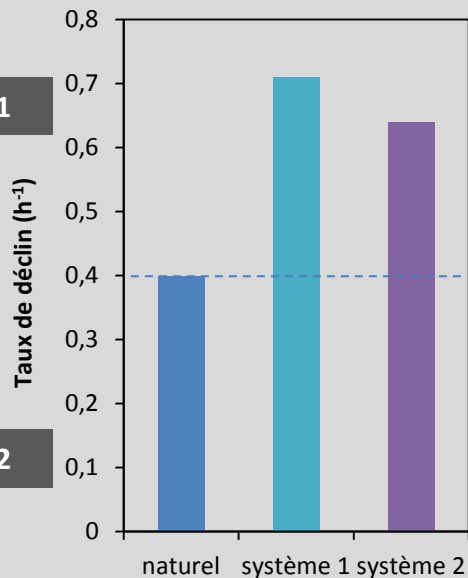
Système # 1

Système # 2

Traitement photocatalytique suite à l'action de ménage / IRINA ...

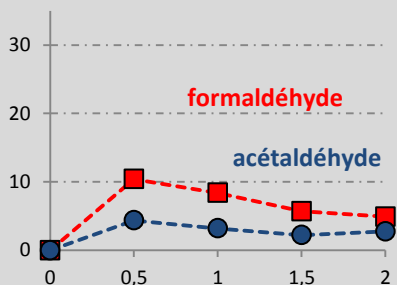
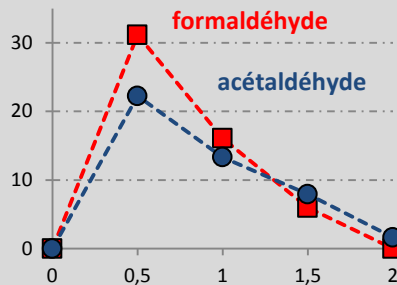
Élimination du Limonène

Système # 1

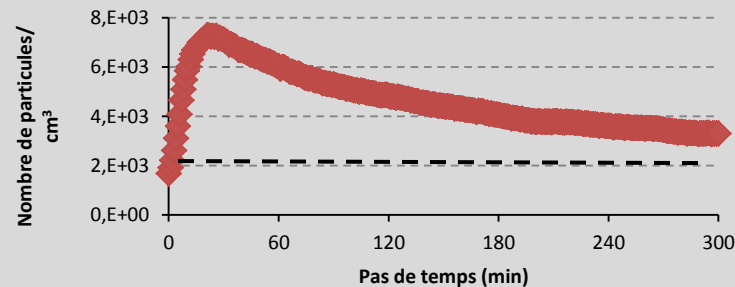
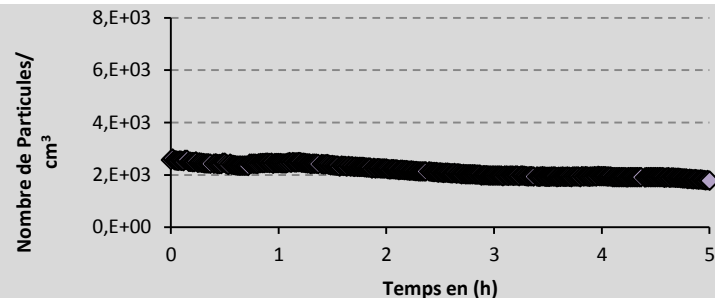


Système # 2

Formation de sous-produits gazeux



Formation sous-produits particulaires



Deux systèmes avec des spécifications proches conduisent à des comportements contrastés non pris en compte dans les normes actuelles.

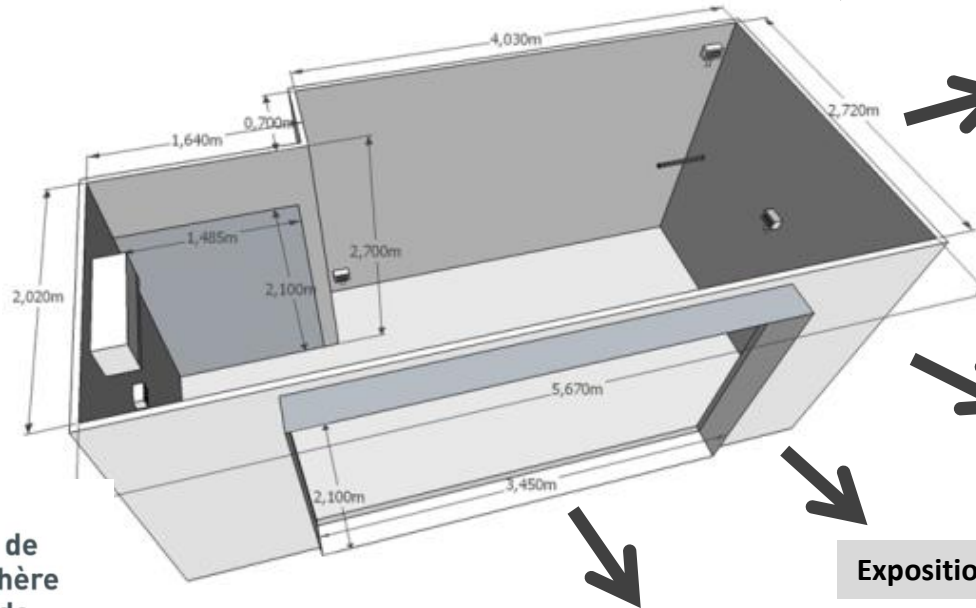
Le développement de dispositif comme IRINA doit contribuer à l'évolution des normes actuelles.

Définition d'un
dispositif innovant
d'étude de la qualité de
l'air intérieur

Conception et
validation
expérimentale de la
pièce IRINA



SAGE
Sciences de
l'Atmosphère
et Génie de
l'Environnement



Systèmes de traitement d'air
par oxydation (photocatalyse,
plasma froid,...)

Systèmes d'épuration passifs
(peinture, cloisons,...)

Systèmes alternatifs (murs
végétalisés,...)

Interactions gaz-surface :
chimie hétérogène de l'air
intérieur

Exposition des personnes

Données expérimentales pour
modèles de QAI.