

# Epurateurs photocatalytiques pour l'air ambiant: Description des expériences normalisées de laboratoire et comparaison avec les tests en chambre pilote

**N. Costarramone<sup>1-2</sup>, C. Cantau<sup>3</sup>, V. Desauziers<sup>4</sup>,  
C. Pécheyran<sup>1</sup>, T. Pigot<sup>1</sup>, S. Lacombe<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> IPREM - UMR CNRS 5254 , Université de Pau et Pays de l'Adour  
Hélioparc, 2 Av, du Président Angot, BP 1153, 64 053 Pau Cedex  
[nathalie.costarramone@univ-pau.fr](mailto:nathalie.costarramone@univ-pau.fr) et [sylvie.lacombe@univ-pau.fr](mailto:sylvie.lacombe@univ-pau.fr)

<sup>2</sup> UT2A, Hélioparc, 2 Av, du Président Angot, BP 1153, 64 053 Pau Cedex

<sup>3</sup> NOBATEK, 67 Rue de Mirambeau, 64600 Anglet, France

<sup>4</sup> Ecole des mines d'Alès, C2MA (site de Pau), Hélioparc, 2 Av, du  
Président Angot, 64 053 Pau cedex, France



SafePHOTOCAT



NORMACAT

# Projet Normacat (2010-2013) et Projet SafePHOTOCAT (2013-2015)

## Collaborateurs du projet Normacat:

- **TERA ENVIRONNEMENT**, coordinateur du projet
- Laboratoires académiques : **IRCELYON, IPREM**
- Centre de recherche technique : **CERTECH**
- **AFNOR**
- Sociétés privées : **AHLSTROM, CIAT, SAINT-GOBAIN QUARTZ, PHOTOCLEAN QUARTZ, TITANIUM INNOVATIONS**

## Support financier public :



## Collaborateurs du projet SafePHOTOCAT:

- **IPREM**, coordinateur du projet
- Laboratoires académiques : **IPREM, C2MA ARMINES**
- Centre de recherche technologique : **NOBATEK**

## Support financier public :



# Contexte de l'étude

- De nombreux systèmes de purification de l'air à fonction photocatalytique sont aujourd'hui disponibles sur les marchés français/européen,
- Ces dispositifs sont-ils réellement efficaces et sûrs ?



- Comment ont été testés ces systèmes ?
- Les informations ne sont pas très claires dans les notices,
- Dans plusieurs cas, il est fait référence à des tests réalisés dans différents laboratoires, mais ces tests ne sont pas normalisés



- ✓ Nécessité de réaliser des tests normalisés avec les purificateurs d'air photocatalytiques
- ✓ Nécessité d'obtenir des données en conditions réelles d'utilisation

# Comment évaluer les performances des purificateurs d'air ?

- Chambre de volume suffisant,
- Mélange de gaz représentatif des composés rencontrés dans l'air ambiant,
- Faibles concentrations en polluants COV,
- Quantifier la minéralisation des COV (production de  $\text{CO}_2$ ),
- Identifier/quantifier les sous-produits éventuellement formés.

# Comment évaluer les performances des purificateurs d'air?

- **Norme AFNOR XP-B44-013** : Pour systèmes photocatalytiques seuls ou systèmes combinés qui incluent une fonction photocatalytique,

Mesure de l'efficacité de dispositifs photocatalytiques utilisés pour l'élimination d'un mélange de COV et odeurs dans l'air intérieur: Test en enceinte fermée en mode re-circulation. La fonction photocatalytique est démontrée en vérifiant la **minéralisation des COV modèles en CO<sub>2</sub>**.

→ En cours : extension de cette norme vers une norme européenne

- **Norme AFNOR XP-B44-200** : Pour tout type de purificateur d'air autonome,

Mesure de l'efficacité de dispositifs vis-à-vis de divers contaminants :

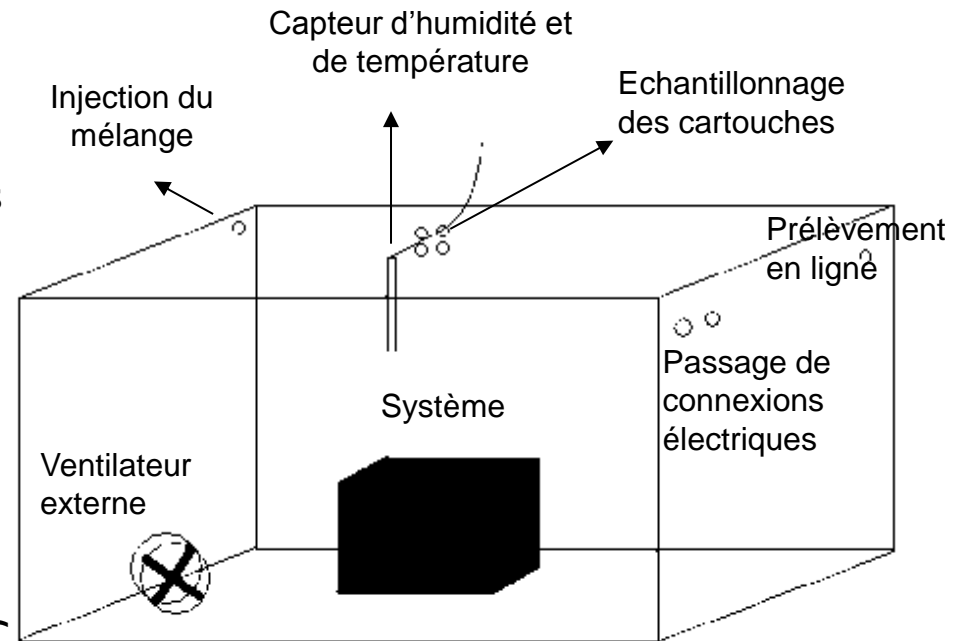
- Gaz : mélange de 4 COV → seuls contaminants en lien avec notre projet, Alimentation en continu des contaminants (enceinte en mode "one-pass")
- + Microorganismes                      + Allergènes                      + Particules inertes

# Principe de la norme pour les tests en enceinte fermée (AFNOR XP B44-013)

## Conditions

- Polluants : acétaldéhyde, acétone, n-heptane, toluène (formaldéhyde en projet pour CEN)
- Air ambiant à deux concentrations  
1 : 250 ppbv/polluants (50 ppbv en projet pour CEN)  
(analyse des sous-produits)  
2 : 1 000 ppbv/polluant  
(analyse du CO<sub>2</sub>)
- Humidité et température de départ:  $50 \pm 5$  % HR et  $22 \pm 2$  °C (peuvent varier durant le test)

Volume total d'échantillonnage :  
< 5% du volume total de l'enceinte (50 L/m<sup>3</sup>)



Enceinte fermée:  $V > 1 \text{ m}^3$

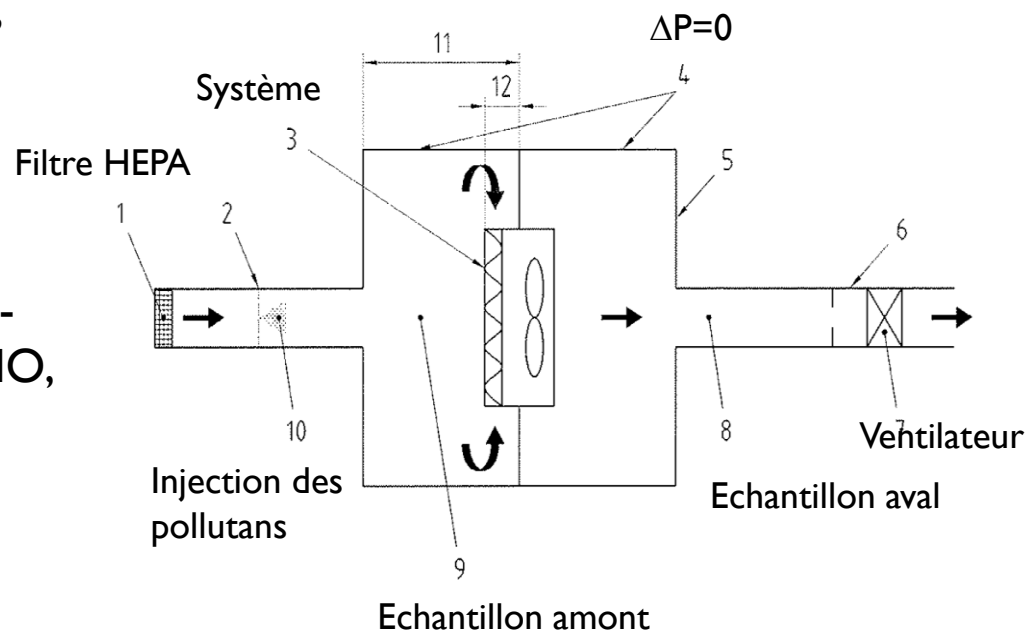
Système : débit max  $1000 \text{ m}^3/\text{h}$

$V_{\text{système}}/V_{\text{chambre}} \leq 0,25$   
( $< 0,1$  en projet pour CEN)

# Principe de la norme pour les tests en enceinte (AFNOR XP B44-200)

## Conditions

- Polluants (gaz) : acétaldéhyde, acétone, n-heptane, toluène (générés en continu)
- Concentrations : 250 à 500 ppbv/polluants (suivi des sous-produits :  $O_3$ ,  $HCHO$ ,  $CO$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ )
- Humidité et température :  $50 \pm 5$  % HR et  $22 \pm 2$  ° C
- Filtration de l'air introduit: filtre HEPA (NF EN 1822-1 et filtre CA )



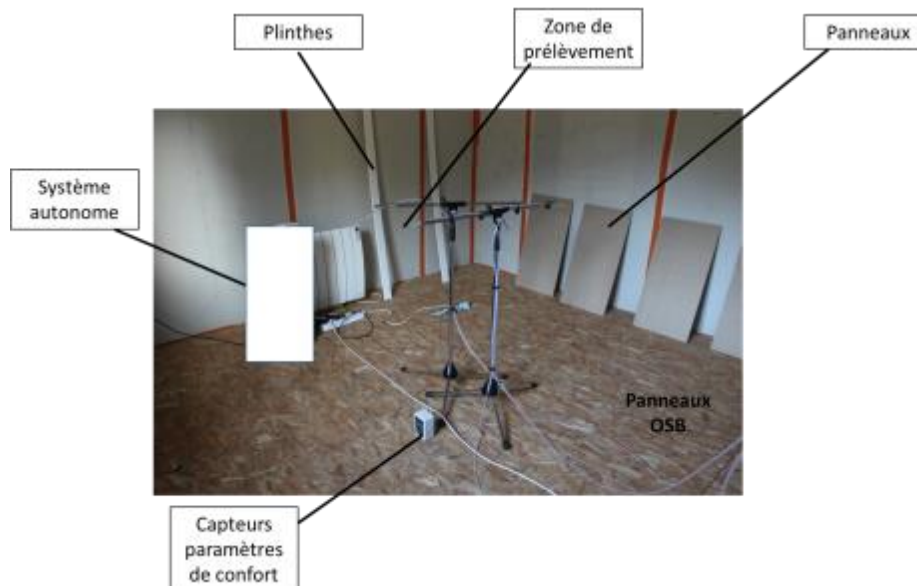
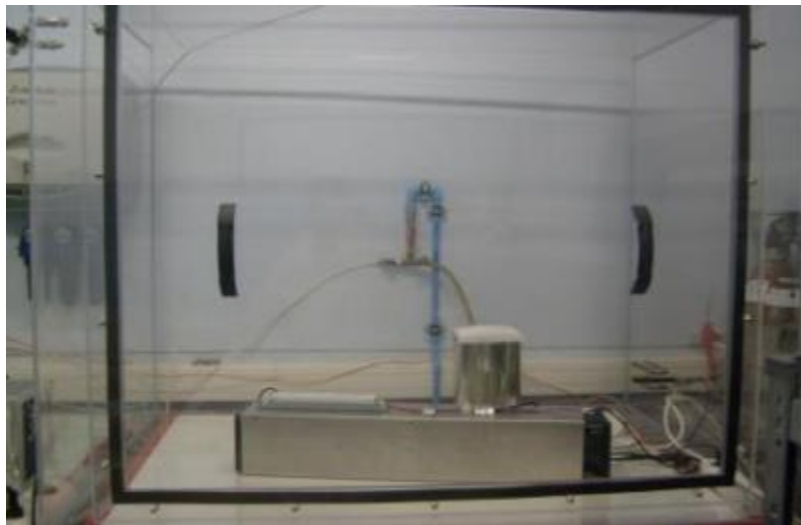


# Moyens mis en œuvre : Enceinte fermée de laboratoire IPREM et salle pilote NOBATEK

IPREM : 1,17 m<sup>3</sup>

## Validation de l'enceinte :

- Pas de relargage de COV: <5 ppbv sur 24 h
- Bonne étanchéité : <10% fuite COV sur 24 h



Salle EVALIS chez  
Nobatek : 40 m<sup>3</sup>

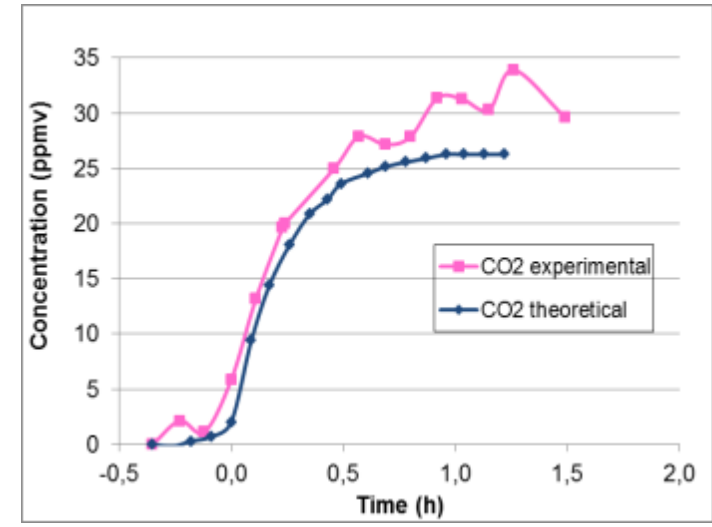
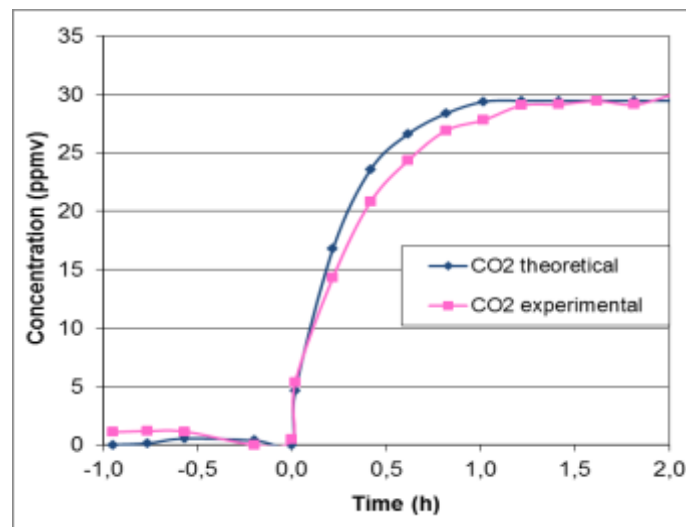
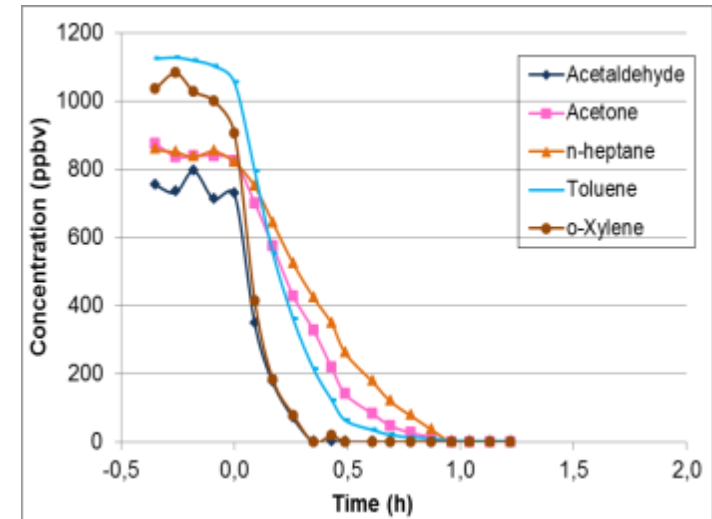
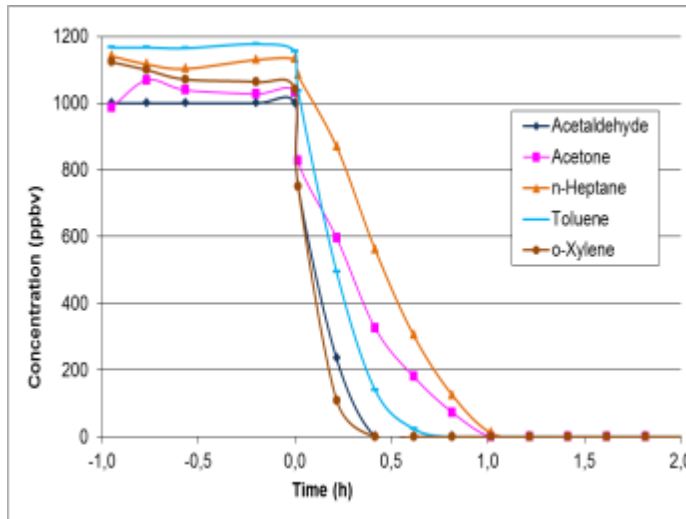


# Moyens mis en œuvre : équipements analytiques

PARAMETRES	EQUIPEMENT ANALYTIQUE
<b>COV modèles</b> (acétaldéhyde, acétone, n-heptane, toluène)	<b>GC-PID /en ligne</b> (LD = 2 à 17 ppbv)
<b>CO-CO<sub>2</sub></b> : minéralisation des COV	<b>GC-méthaniseur-FID / en ligne</b> (LD=1 ppmv)
<b>Espèces secondaires et COV en salle pilote</b>	<p><b>Formaldéhyde :</b> adsorption sur cartouches <b>DNPH +HPLC-UV</b> (LD=4 ppbv) ou sur fibres <b>SPME +GC-MS</b> ou <b>GC-FID</b> (LD&lt;4 ppbv)</p> <p><b>COV:</b> adsorption sur cartouches <b>Air Toxics/Tenax+ ATD-GC-MS</b> (LD=1 ppbv)</p> <p><b>Ozone :</b> adsorption sur cartouches <b>BPE-DNPH +HPLC-UV</b> (LD O<sub>3</sub>&lt;0,5 µg/m<sup>3</sup>)</p> <p><b>NO/NO<sub>x</sub> :</b> <b>Analyseur à chimiluminescence</b> (LD=1 ppbv)</p>
<b>Nano et microparticules</b>	<p><b>ELPI (Electric Low Pressure Impactor) :</b> <b>13 étages</b> : diamètre des particules de <b>7 nm à 10 µm</b> (seuil de détection : 0,5 part, cm<sup>-3</sup> pour la classe 380 nm, 7 part, cm<sup>-3</sup> pour la classe 100 nm)</p>

# Validation des équipements : étude inter-laboratoire (CERTECH-IPREM)

**Conditions expérimentales similaires** : même système, chaque COV à environ 1ppmv, Humidité relative 45-55%, température 22-28° C,

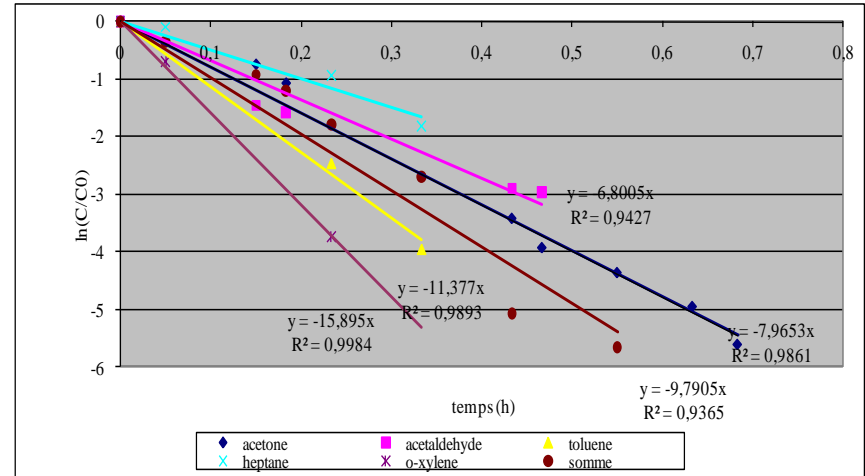
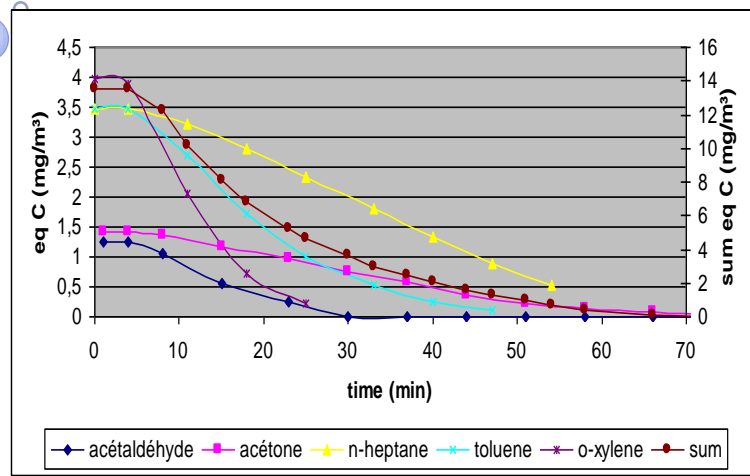


IPREM

CERTECH

# Exemple d'étude inter-laboratoire

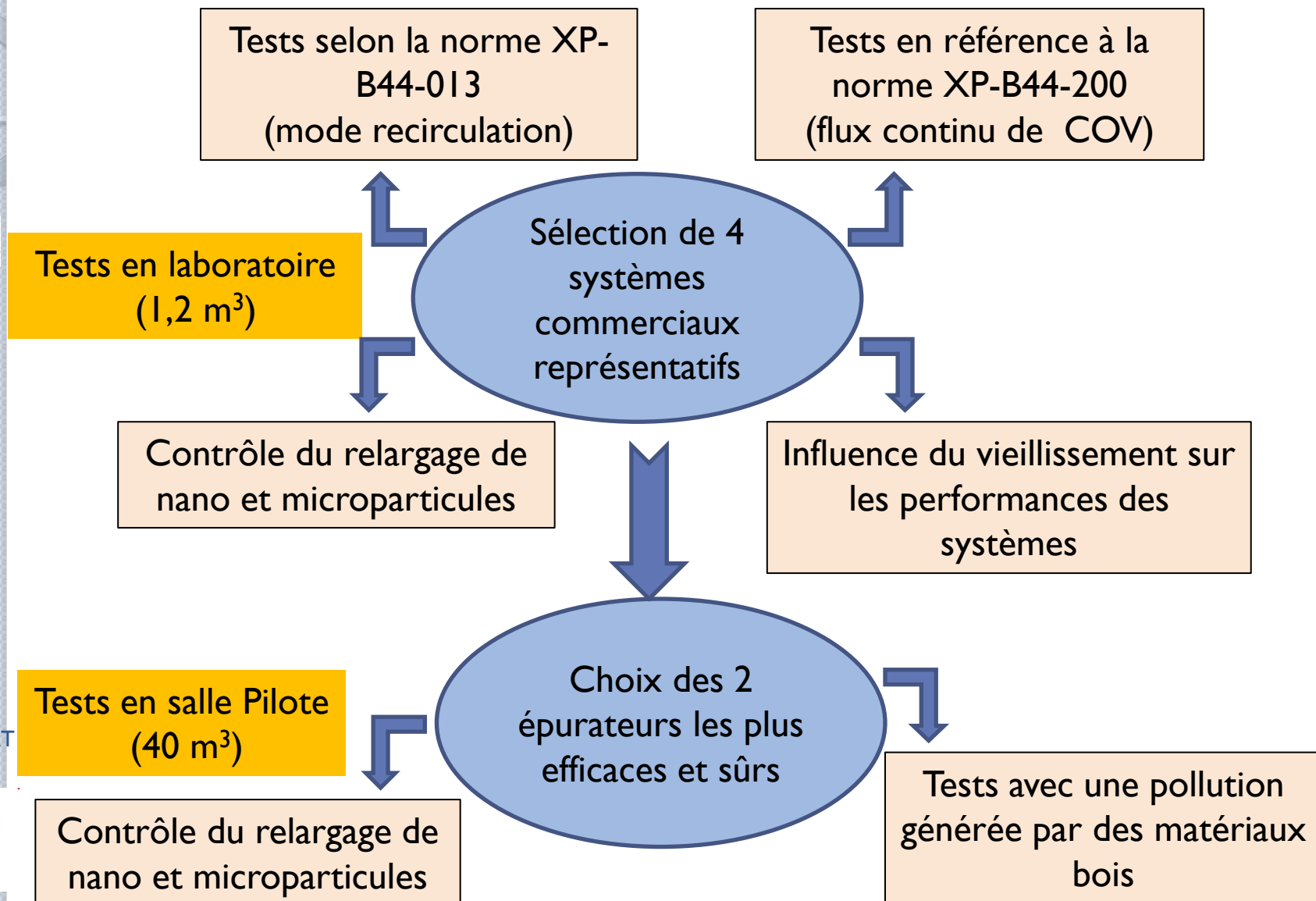
## Résultats du CADR (Clean Air Delivery Rate) :



$\ln(C/C_0) = -(k_n + \text{CADR}/V) \cdot t$  avec  $k_n = 0$  (aucune fuite)  
 $\rightarrow \ln(C/C_0) = f(t) \rightarrow \text{pente} = -\text{CADR}/V$

1 ppmv	Acetaldehyde	Acetone	n-heptane	Toluene	o-xylene	Σ VOC
CERTECH (22° C)	10,61 ± 0,21	3,64 ± 0,08	2,65 ± 0,16	5,94 ± 0,24	11,18 ± 0,22	4,51 ± 0,09
IPREM (26 ± 2° C)	8,03 ± 1,61	3,18 ± 0,06	2,35 ± 0,07	5,75 ± 0,11	10,30 ± 1,44	4,35 ± 0,09

# Déroulement de l'étude



# Critères de sélection des systèmes

- 1) **Disponibilité**
- 2) **Dimension/Débit : contrainte imposée pour la norme XP B44-013** ( $V_{\text{système}}/V_{\text{chambre}} < 0,25$  et débit maximum = 1 000 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>)
- 3) **Débit d'air** : paramètre décisif, débit suffisant permettant un renouvellement d'air satisfaisant (pour une pièce de 40 m<sup>3</sup>, un débit d'air de l'ordre de 200 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> assure environ 5 renouvellements d'air par heure )
- 4) **Certification** mentionnée par le fournisseur
- 5) **Puissance/consommation** : la plupart des systèmes ont une consommation maximale donnée < 100 W
- 6) **Types de traitement** : fonction uniquement photocatalytique ou fonctions mixtes
- 7) **Type de lampe** : systèmes ayant des types d'éclairage différents,
- 8) **Critère qualitatif**, annoncé par le fournisseur (innocuité par rapport à l'usage)
- 9) **Données techniques** fournies pour la maintenance
- 10) **Coût** : non considéré comme un critère décisif dans le choix des systèmes (coûts variables: moins de 200 € à plus de 1 500 €)

# Test normalisé en enceinte fermée (Norme AFNOR XP B44-013)

Systèmes autonomes

Test de relargage système ON – sans COV

Test avec 1 ppm des 4 COV  
(acétaldéhyde, acétone, n-heptane, toluène)

Test avec 250 ppb  
des 4 COV

Test avec 250 ppb des  
4 COV+Formaldéhyde

- Suivi COV en continu (GC-PID)
- Suivi CO<sub>2</sub> en continu (GC-Méthaniseur-FID)

- Suivi COV en continu (GC-PID)
- Suivi Formaldéhyde (norme NF ISO 16000-3)
- Suivi COV secondaires (norme NF ISO 16000-6)
- Analyse Ozone/Formaldéhyde (méthode ARMINES-C2MA)

Estimation efficacité d'élimination des COV  
Evaluation de la minéralisation des COV  
Calcul du CADR

Estimation efficacité d'élimination des COV  
Evaluation formation de sous-produits  
Calcul du CADR



# Tests normalisés (AFNOR XP B44-013) avec les 4 systèmes commerciaux sélectionnés

Système	Source d'irradiation	Photocatalyse uniquement	Test de contrôle sans COV		Test avec 4 COV (24 heures maximum)		
			Relargage de COV	Production de CO <sub>2</sub>	Elimination des COV	Minéralisation	Sous-produit final
D1	UVA	Oui	Non	Oui	> 99%	complète	Non
D2	UVC	Non (ionisation, filtration/charbon actif)	Oui	Non	<20%	<5%	HCHO
D3	UVC	Non (filtration/charbon actif)	Non	Oui	> 99%	non déterminé	Non
D4	Non spécifié	Non (ionisation, filtration)	Oui	Non	48 to 99%	<5%	HCHO

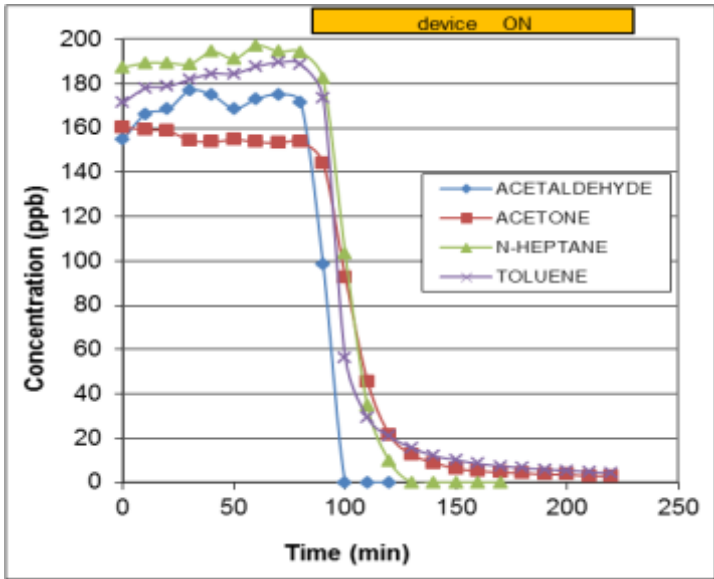
Les systèmes peuvent être répartis en deux classes:

- **classe 1 pour les systèmes efficaces:** élimination élevée des COV, minéralisation correcte, pas de sous-produit émis
- **classe 2 pour les systèmes inefficaces et peu sûrs:** relargage de sous-produits même en absence de COV, faible élimination des COV et faible minéralisation

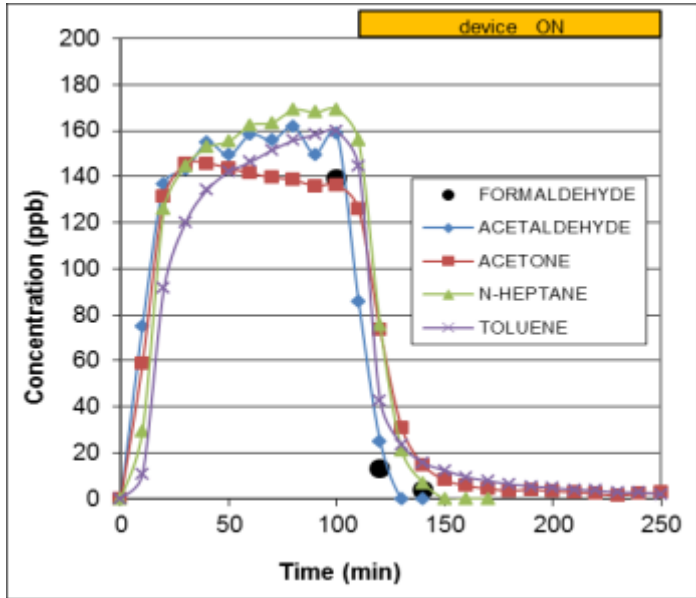


# Exemple pour le système DI

4 COV  $\approx$  250 ppb



5 COV  $\approx$  250 ppb



Temps (après start)	Formaldéhyde test 1	Formaldéhyde test 2
T 5-20 min	-----	14 ppb
T 15-30 min	8 ppb	-----
T 30-45 min	-----	5 ppb
T 45 min-1h	<DL	-----

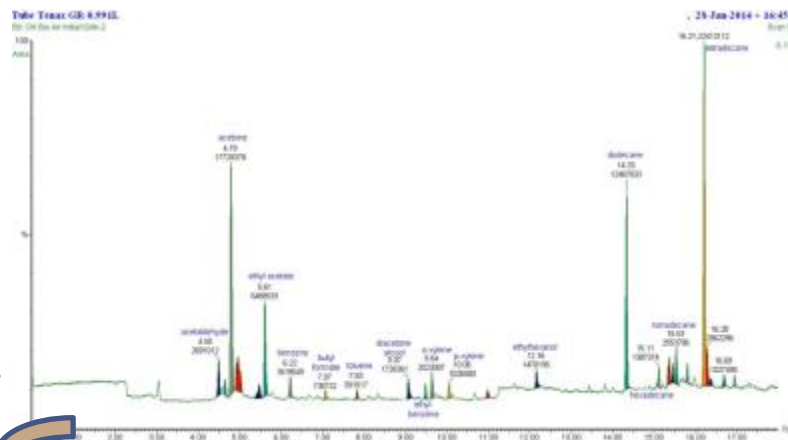
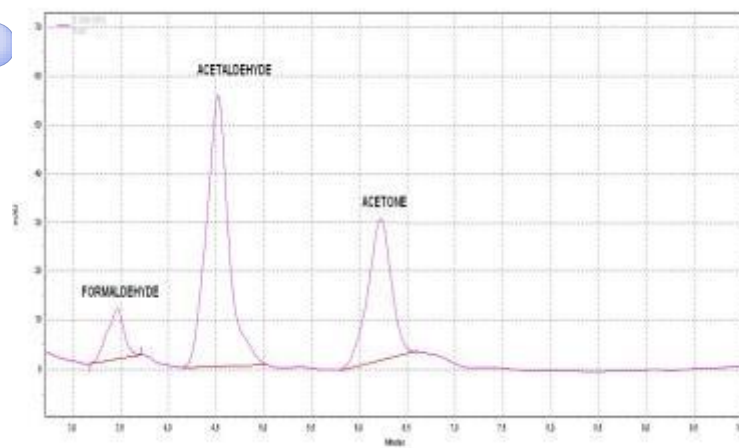
Formaldéhyde : seul sous-produit transitoire détecté en faible quantité



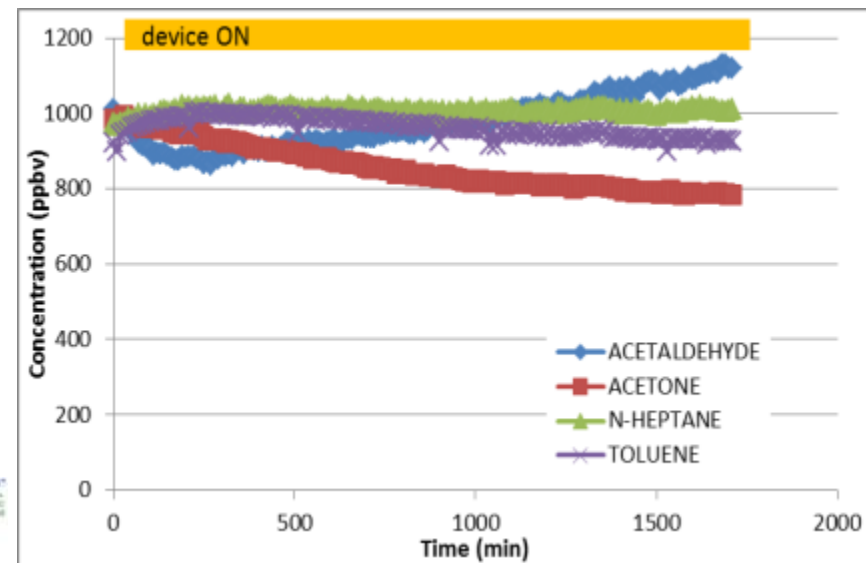
Elimination complète des 5 COV incluant HCHO avec le système ON

# Exemple pour le système D2

sans COV ajoutés



avec le mélange de COV

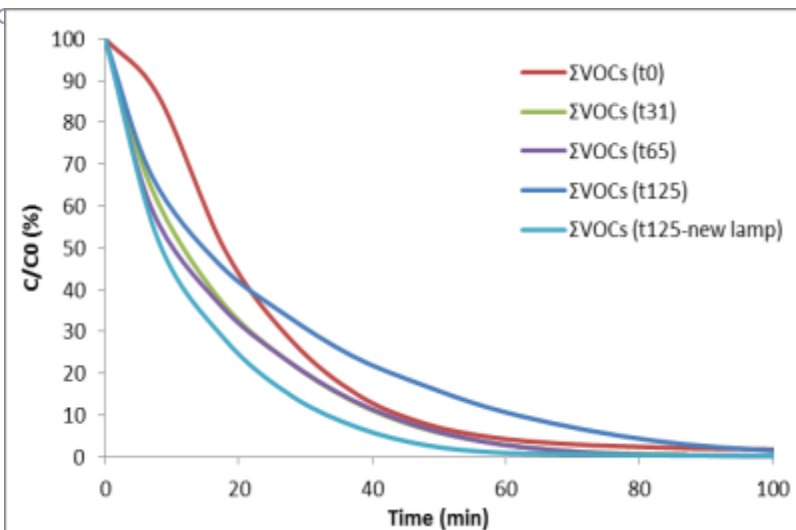


Pas de diminution des COV  
avec le système ON

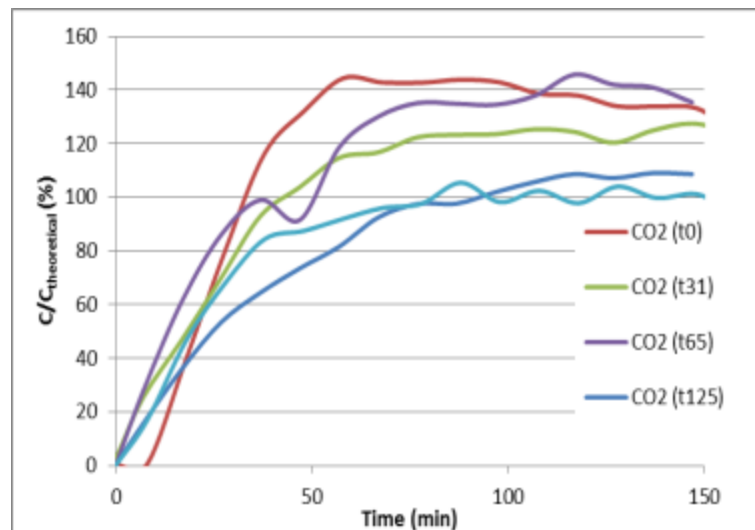
Formaldéhyde/acétaldéhyde/acétone  
et autres COV relargués par le réacteur

# Influence du vieillissement sur les résultats - DI

## Diminution des COV (I ppmV)



## Minéralisation



## CADR

CADR	Acétaldéhyde	Acétone	n-heptane	Toluène	Σ COV
T 4 mois (lampe neuve)	10,3±1,0	2,9±0,2	4,3±0,2	13,2±0,6	5,4±0,4
T 4 mois	5,2±0,3	1,4±0,1	1,9±0,1	8,3±0,1	2,6±0,1
T 2 mois	9,49	2,51	2,76	11,8	3,9
T 1 mois	10,0±0,7	2,8±0,2	2,9±0,3	8,3±0,3	4,1±0,3
T0 (neuf)	9,1±0,9	2,8±0,2	2,7±0,2	4,4±0,1	3,7±0,2

## Irradiance

Gamme de longueur d'onde	300-550 nm Lampe 1 - haut	300-550 nm Lampe 2 - bas
Système neuf	5,7 mW cm <sup>-2</sup>	5,8 mW cm <sup>-2</sup>
Système vieilli 4 mois	2,2 mW cm <sup>-2</sup>	2,3 mW cm <sup>-2</sup>

# Test en référence à la norme AFNOR XP B44-200

Systèmes autonomes  
(non insérés de façon étanche dans l'enceinte)

Test de relargage système ON – sans COV

Débit  
≈3 L/min

Test avec 4 COV + Formaldéhyde en  
continu 250 à 500 ppb

- Suivi COV en continu (GC-PID)
- Suivi CO + CO<sub>2</sub> en continu (GC-méthaniseur-FID)
- Suivi Formaldéhyde (norme NF ISO 16000-3)
- Suivi NO + NO<sub>2</sub> (analyseur chimiluminescence)
- Analyse Ozone/Formaldéhyde (méthode ARMINES-C2MA)

Estimation efficacité d'élimination des COV  
Evaluation formation de sous-produits



# Tests en référence à la norme AFNOR XP-B44-200

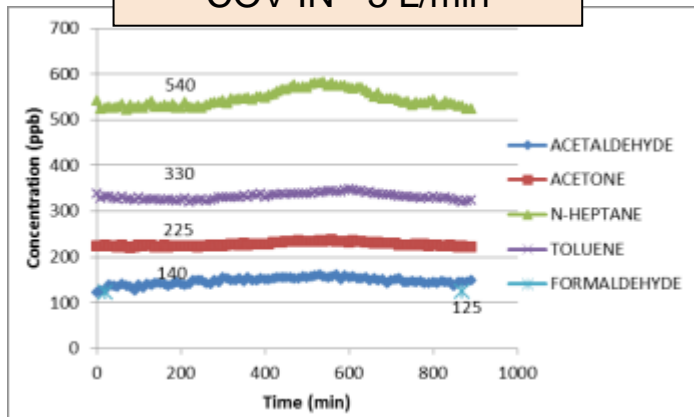
Système	Test de contrôle sans COV		Test avec 4 COV ajoutés en continu (24 heures maximum)		
	NO <sub>x</sub> produit	O <sub>3</sub> généré	COV éliminés	Minéralisation	Sous-produits
<b>D1</b>	Oui	Non	> 99%	Oui	NO <sub>x</sub>
<b>D3</b>	Non	Non	> 99%	Oui	Non
<b>D4</b>	Oui	Non	acétone et toluène résiduels (≈20 ppbv)	Non	Formaldéhyde NO <sub>x</sub>



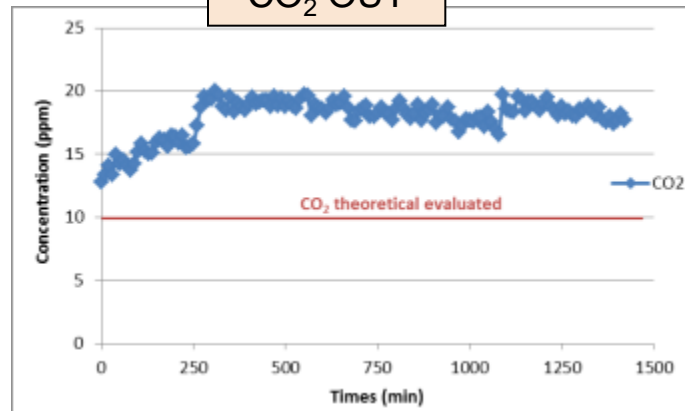
2 systèmes/3 sont efficaces pour l'élimination des COV et leur minéralisation  
Seul le système D3 ne relargue ni COV ni NO<sub>x</sub>

# Tests en référence à la norme AFNOR XP-B44-200 : exemple du système DI

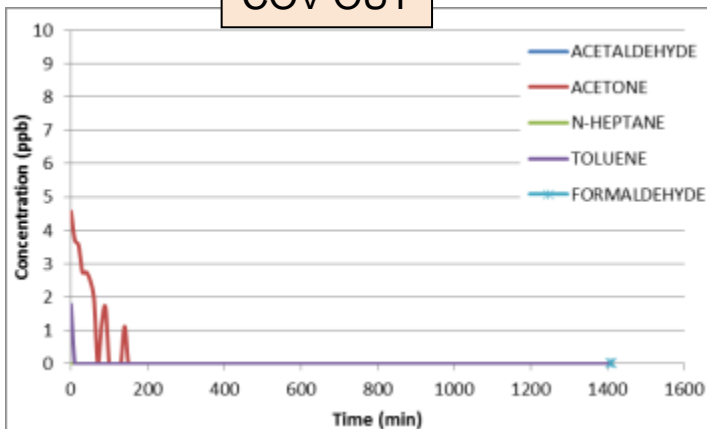
COV IN - 3 L/min



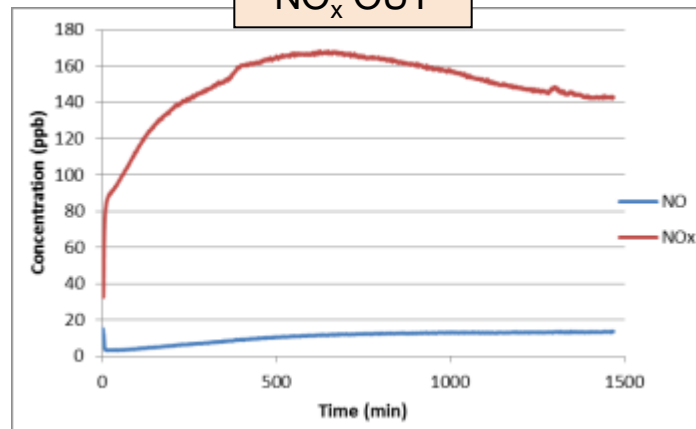
CO<sub>2</sub> OUT



COV OUT



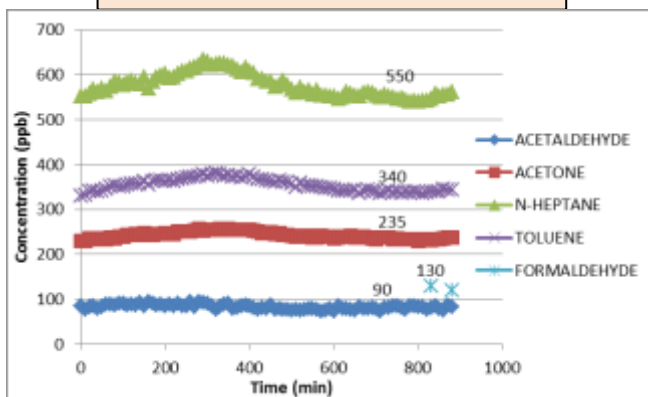
NO<sub>x</sub> OUT



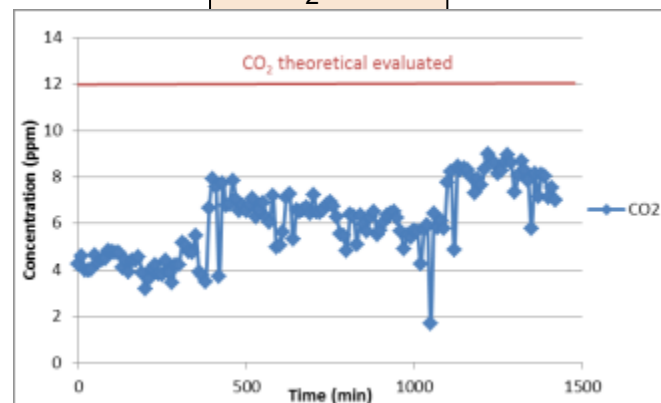
Pas de COV résiduel  
Minéralisation correcte des COV mais : relargage de NO<sub>x</sub>  
par le système (dû au filtre à particules)

# Tests en référence à la norme AFNOR XP-B44-200 : exemple de système D4

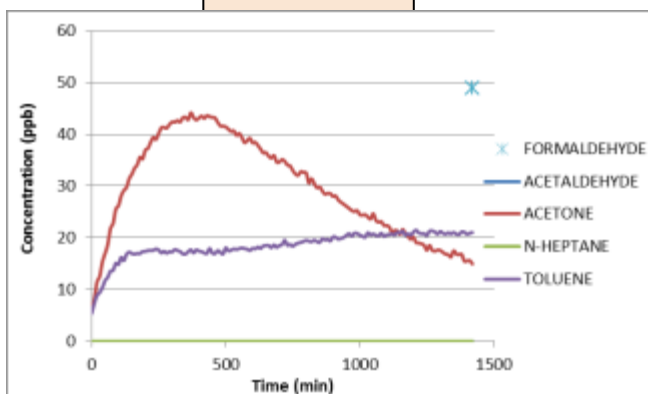
COV IN - 3 L/min



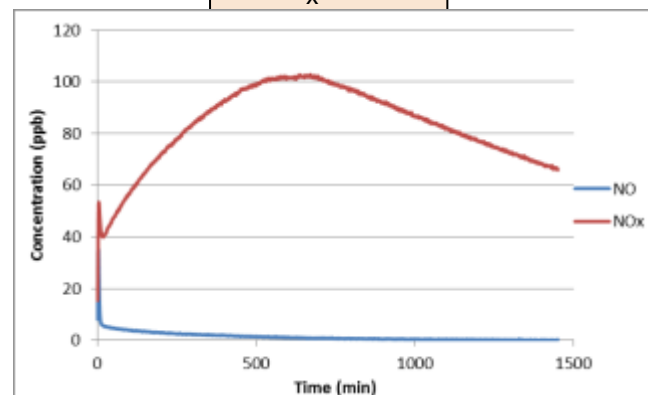
CO<sub>2</sub> OUT



COV OUT



NO<sub>x</sub> OUT



COV résiduels : quelques ppbv  
Pas de minéralisation des COV  
Relargage de NO<sub>x</sub> par le système

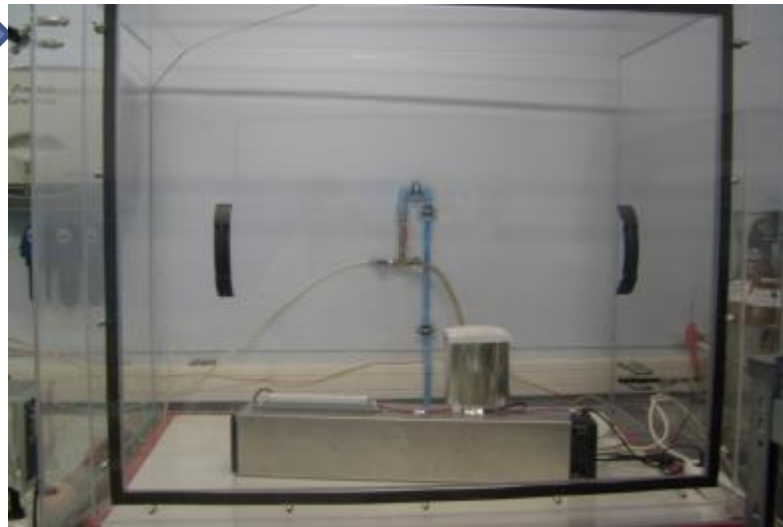
# Equipment pour la mesure de nano-microparticules

Air comprimé de qualité  
ISO8573-1 Class I.1.1  
Particules < 0.1  $\mu\text{m}$

Impacteur électrique  
basse pression (ELPI)

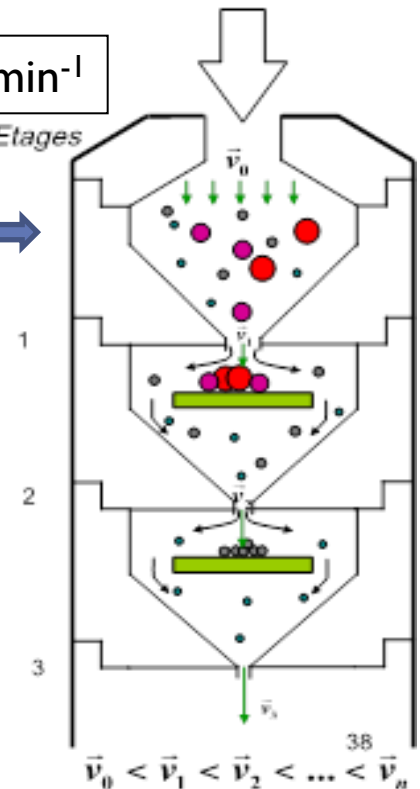


Filtre  
0,01  $\mu\text{m}$



10 L min<sup>-1</sup>

Etages



Collection de particules  
selon la taille

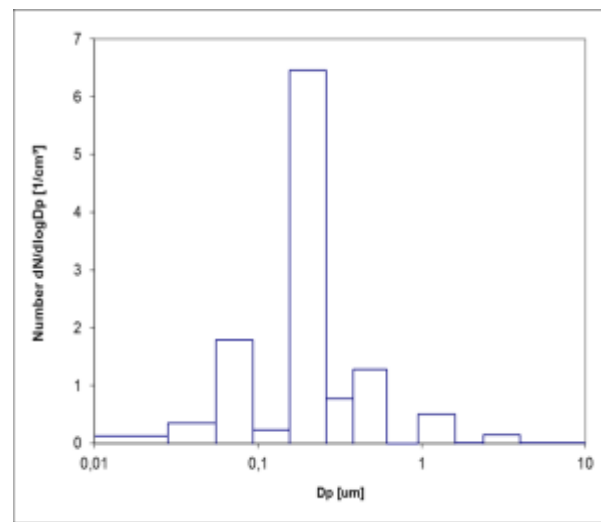
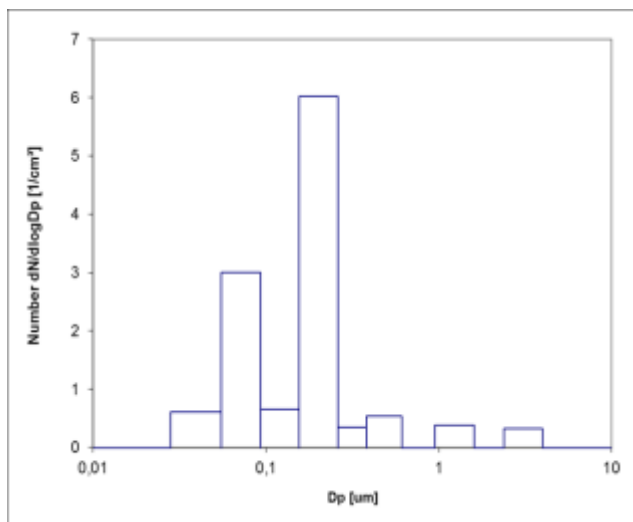
13 étages :  
7 nm – 10  $\mu\text{m}$

# Exemple de résultats de mesure de nanoparticules

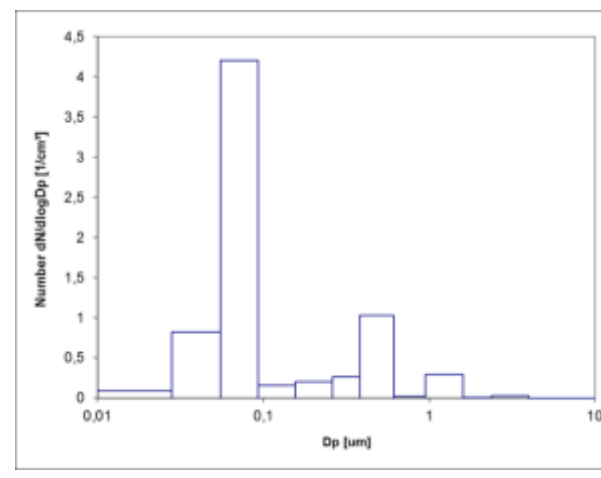
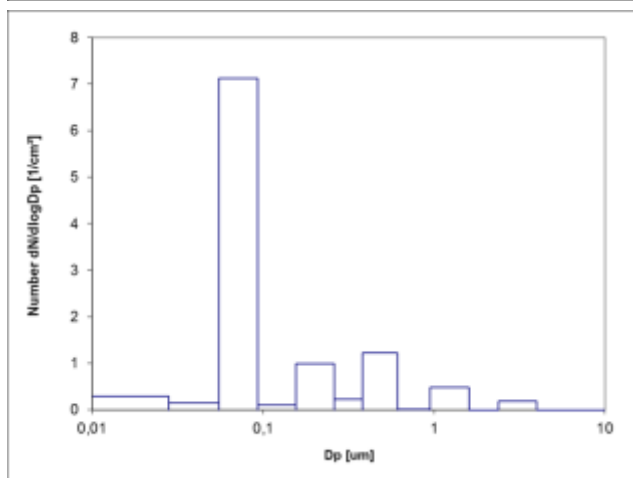
Distribution moyenne du bruit de fond de l'enceinte balayée avec de l'air propre

Distribution moyenne avec le système ON durant 3h30 (D1) et 4h30 (D3)

Test  
D1



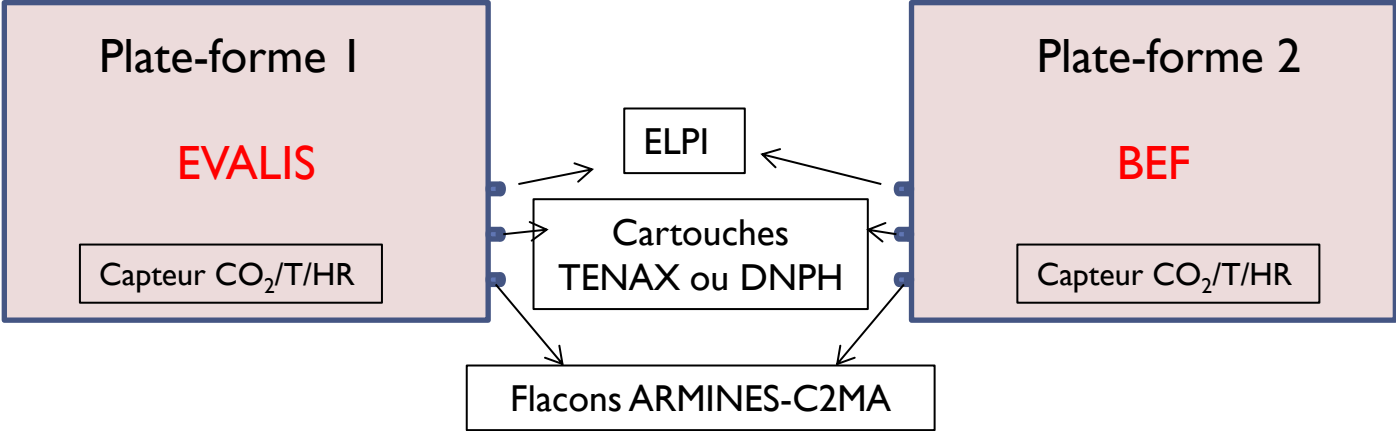
Test  
D3



Aucun relargage de nanoparticules pour les 4 systèmes neufs ou vieillis  
D1/D2/D3/D4

# Test en station expérimentale NOBATEK

Station météo externe



**Matériaux  
constituants  
les modules**

Composants	Type de produits EVALIS	Types de produits BEF
Isolation mur	Laine de verre	Panneau OSB + Fibre de bois + Laine de verre + Pare vapeur
Isolation toiture	Laine de verre	Panneau OSB + Laine de verre x2 + Pare vapeur
Revêtement murs et plafond	Plaque de plâtre	Panneau OSB
Revêtements de sol non collé	Panneau OSB	Panneau OSB
Ouvrants	1 porte bois + 1 fenêtre double vitrage bois	1 porte de bois + Façade double vitrage

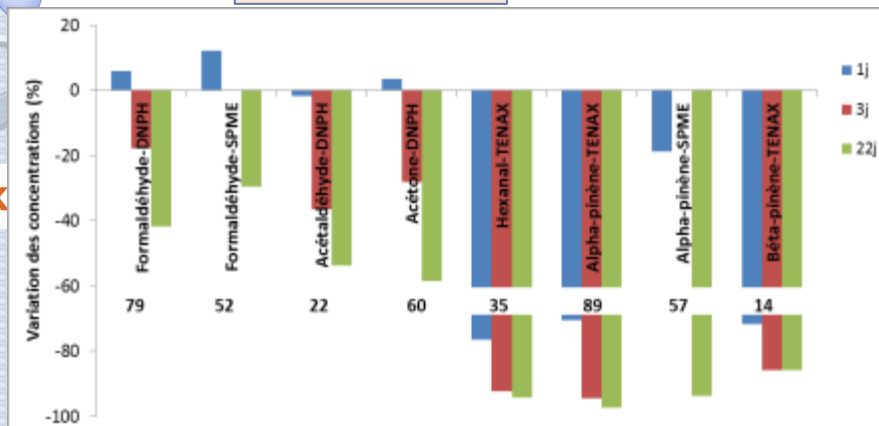
**Conditions pour les  
tests en plateforme**

	EVALIS	BEF
Température	21 °C ± 5°C	20 °C ± 1°C
Taux de renouvellement de l'air	0,02 vol/h ± 0,01 vol/h	0,5 vol/h ± 0,1 vol/h
Simulation de la pollution	Introduction de panneaux et plinthes	Intérieur de la plateforme aménagé avec des panneaux OSB

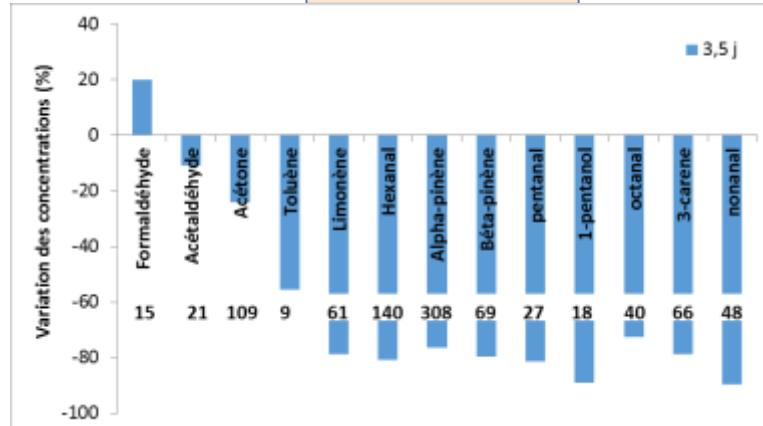


# TESTS A L'ECHELLE PILOTE - BILAN DE L'ETUDE AVEC LE SYSTEME D3

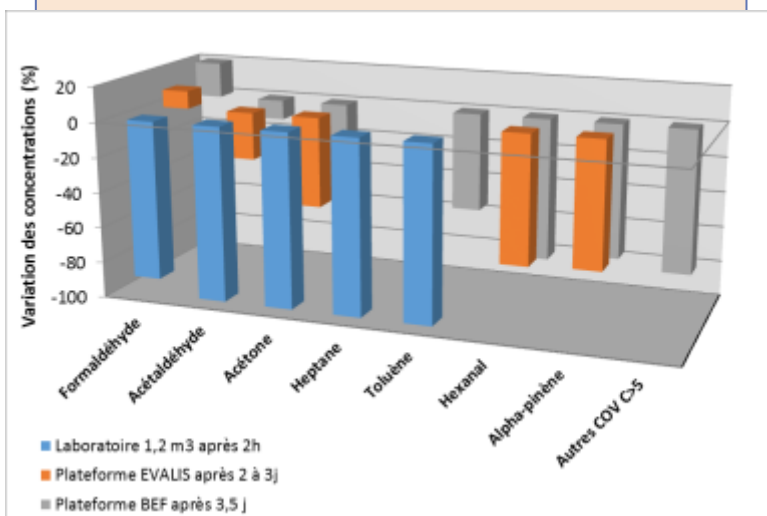
## Résultats EVALIS



## Résultats BEF



## Comparaison tests laboratoire et Plateformes EVALIS/BEF

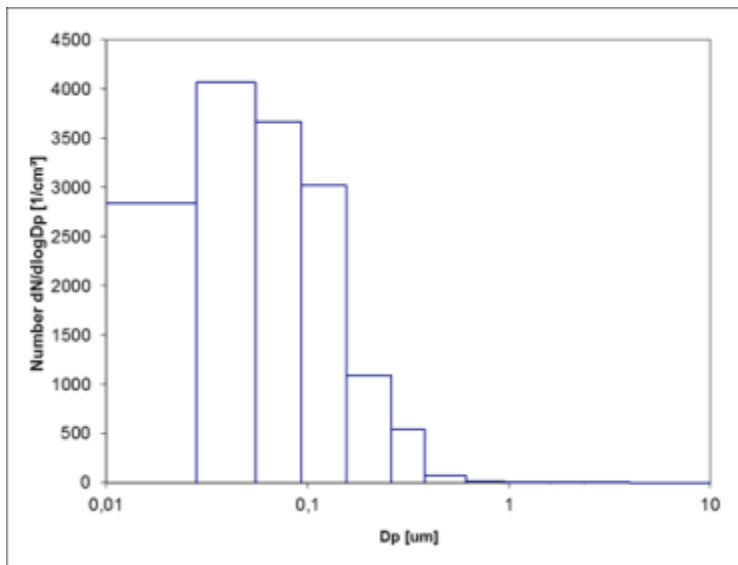


- Stabilisation des concentrations après 3 jours.
- Bonnes performances obtenues sur tous les COV en laboratoire.
- Bonnes performances obtenues sur les COV les plus lourds en plateforme.
- Résultats moins probants avec les COV les plus légers (formaldéhyde/acétaldéhyde)

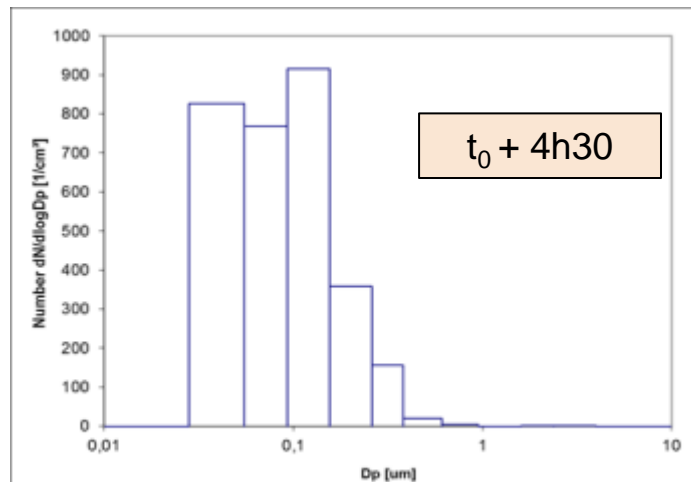
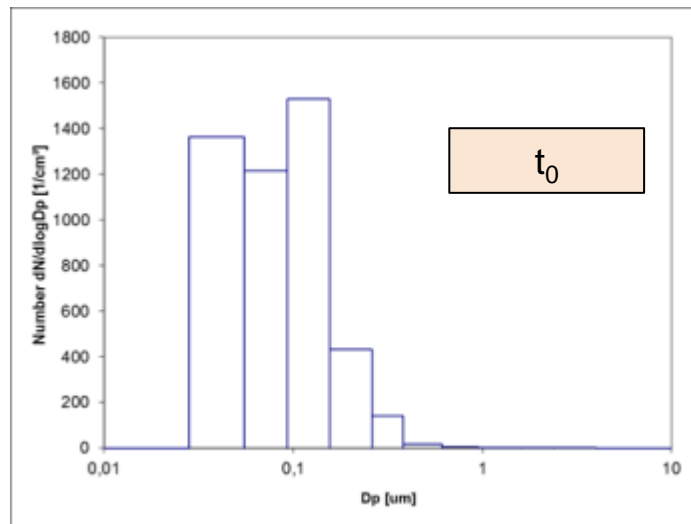
# TESTS A L'ECHELLE PILOTE (EVALIS) - EXEMPLE D'ETUDE AVEC LE SYSTEME D3

Mesures après 30 jours avec le système allumé en continu

Air extérieur EVALIS



Air intérieur EVALIS avec le système ON



- Nano et microparticules mesurées à l'extérieur en quantité supérieure à celles collectées à l'intérieur.
- Baisse des nano et microparticules collectées à l'intérieur avec le système ON entre le début et la fin de l'expérience

# Conclusion

- Grâce aux tests normalisés, élimination rapide à l'échelle laboratoire des systèmes/matériaux commerciaux inefficaces et classement de leurs performances,
- Impact du vieillissement des systèmes pour connaître l'évolution des performances dans le temps,
- Pour tous les systèmes/conditions, pas de relargage de nanoparticules
- Etude en conditions réelles sur deux systèmes sélectionnés: diminution significative des concentrations en COV les plus lourds. Résultats plus contrastés sur les COV les plus légers (formaldéhyde, acétaldéhyde). Mais  $[HCHO] \leq 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (VGAI) sauf pour un test  $[HCHO]_{\text{max}} = 84 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .
- Test en plateformes plus lourds et plus complexes, mais qui confirment les résultats des tests normalisés.
- Certification nécessaire pour ces produits commerciaux

Tous nos résultats sur le site ADEME:  
<http://www.ademe.fr/traitement-lair-interieur-photocatalyse>

# Merci pour votre attention

## Information :

Transfert du savoir-faire de la recherche académique (IPREM) vers le centre technologique partenaire (UT2A)

- Développement d'une nouvelle activité sur la thématique COV chez UT2A (depuis janvier 2016) :
- Proposer aux industriels/collectivités des outils pour **qualifier l'influence de leurs produits ou de leurs procédés** sur la qualité du milieu et leurs répercussions sur l'environnement et la santé.

