



# QUALITÉ DE L'AIR INTÉRIEUR DANS LES BÂTIMENTS. SÉANCE 1

Présentation de la thématique

Thierry DUFORESTEL, EDF R&D, Décembre 2022



# PRÉAMBULE

- **Première séance d'un module d'enseignement peu pratiqué dans un Master. → On navigue un peu à vue.**
- **Un domaine scientifique complexe, mais peu établi.**
  - De nombreuses approches qui relèvent encore de la R&D.
  - Un développement terrain encore faible.
  - Mais un intérêt accru et des réglementations naissantes.
- **Le but de cette première séance est de cerner les contours et les enjeux de cette nouvelle discipline de la physique du bâtiment.**

■ Q

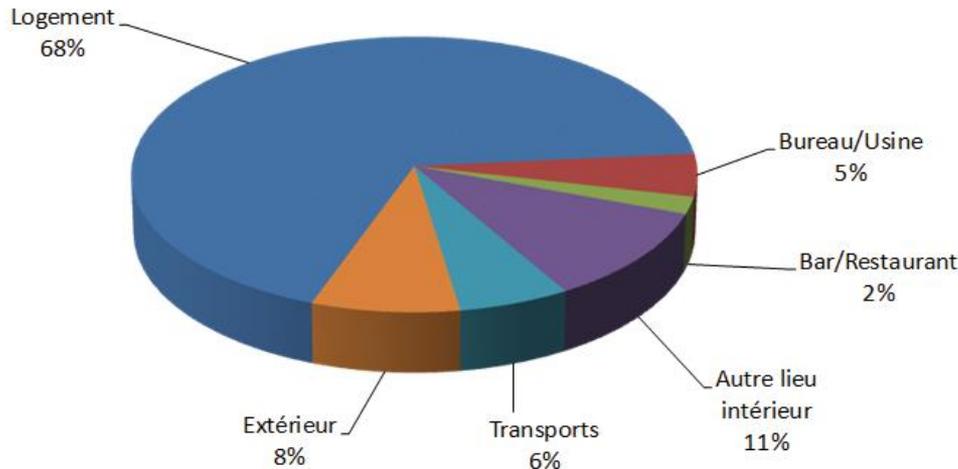
■ A

■ |

■ **Bâtiment**

# DESCRIPTION DU DOMAINE

## ■ Qualité



- Il va donc falloir définir des critères de qualité de l'air intérieur.
- Plusieurs critères d'appréciation sont possibles.
  - Ressenti (odeurs).
  - Santé (impact des polluants).
    - Concentrations (très faibles).
    - Durées (très longues).
    - Notion d'exposition (donc intégration de critères sociaux et humains).
  - Sécurité (certains polluants sont potentiellement très dangereux).
    - Radon.
    - CO
- Peu de recul car domaine encore jeune.
- Le problème n°1 tient au temps passé dans les espaces intérieurs.

# DESCRIPTION DU DOMAINE

■ **Qualité**

■ **Air**

- Ce domaine est donc très proche de celui de l'aéraulique du bâtiment.
- Problématique d'échelle (on y reviendra).
  - Du bâtiment complet monozone à la CFD.
- Un domaine très lié à deux disciplines techniques mieux connues dans le bâtiment :
  - La ventilation.
  - Le conditionnement d'air.
- Qui s'intéresse aux constituants de l'air.
  - Dimensions physique, chimique et biologique.

# DESCRIPTION DU DOMAINE

■ Qualité

■ Air

■ Intérieur

- Ce qui introduit la multitude des polluants, appareils et activités qui peuvent se rencontrer à l'intérieur d'un bâtiment.
- Air extérieur
- Parois et revêtements.
- Ameublement.
- Equipements.
- Décorations.
- Habitants et animaux de compagnie.
- Produits d'entretien.
- Activités.
- ....

# DESCRIPTION DU DOMAINE

■ **Qualité**

■ **Air**

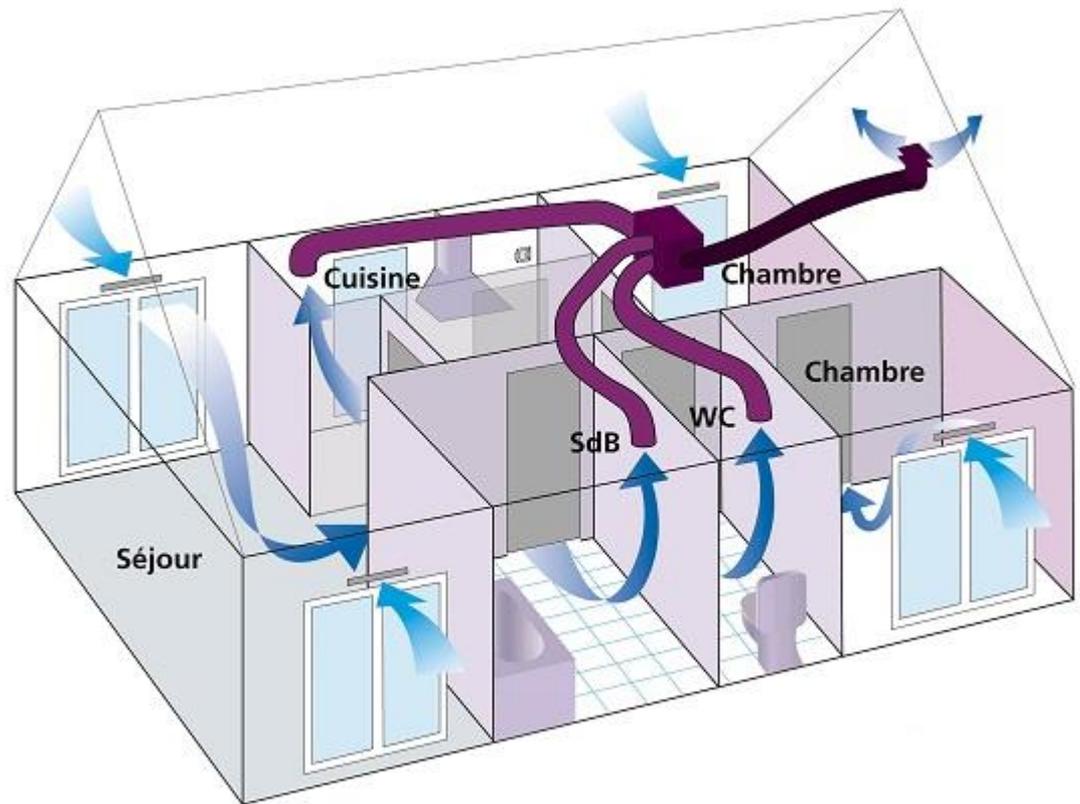
■ **Intérieur**

■ **Bâtiment**

- Ce domaine doit donc tenir compte des réalités de ce secteur complexe qui intègre plusieurs visions différentes.
- Secteur économique de premier plan.
  - 8% du PIB, 1,7 M d'emplois.
- **Activité sociale.**
- **Activité d'investissement (patrimoine, économie tertiaire).**
- **Activité à fort impact énergétique et environnemental.**
  - 1<sup>er</sup> secteur consommateur d'énergie (exploitation).
  - 1<sup>er</sup> secteur consommateur de matériaux (construction).

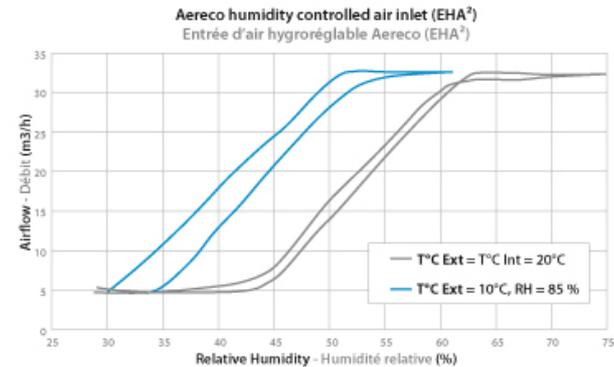
# LA QAI VUE DU BÂTIMENT.

- **Assurée par le renouvellement d'air via la ventilation.**
  - L'air extérieur est réputé propre et sain.
  - Impact énergétique fort.
    - L'énergie nécessaire au conditionnement de l'air neuf est le premier poste de dépense énergétique du bâtiment neuf.
- **Résultat incertain.**
- **Enjeu premier : Concilier QAI et efficacité énergétique.**

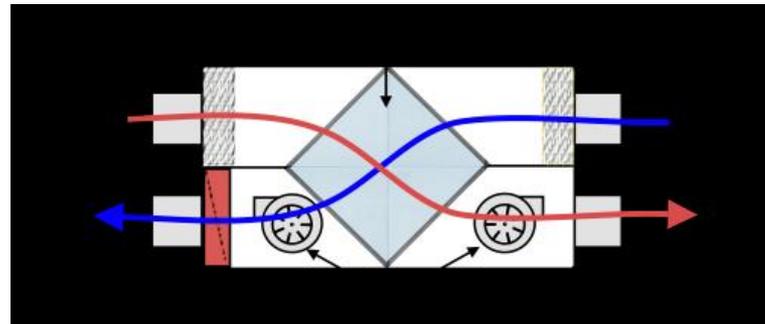


# CONCILIER QAI ET EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

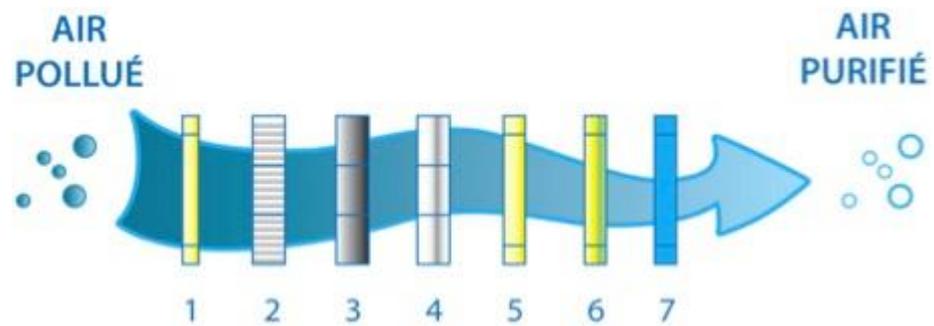
- Moduler les débits en fonction du lieu et du besoin.



- Récupérer l'énergie sur l'air extrait.

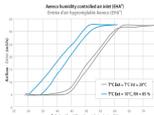


- Epurer l'air intérieur.

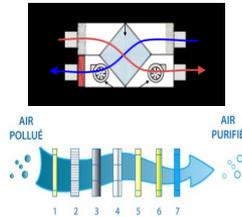


# MAÎTRISE DE LA QAI

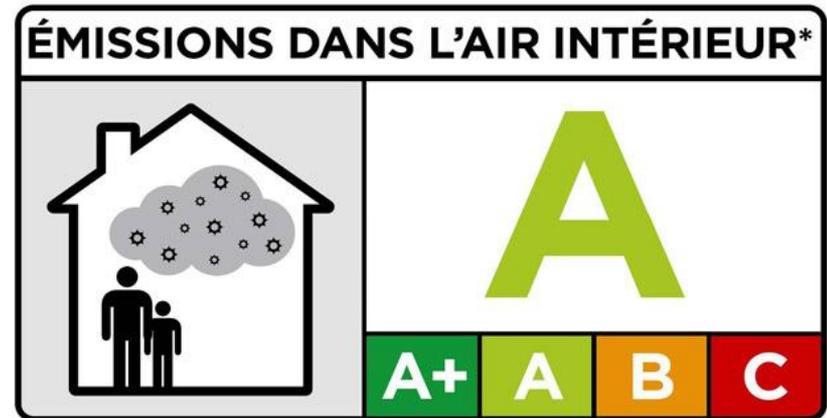
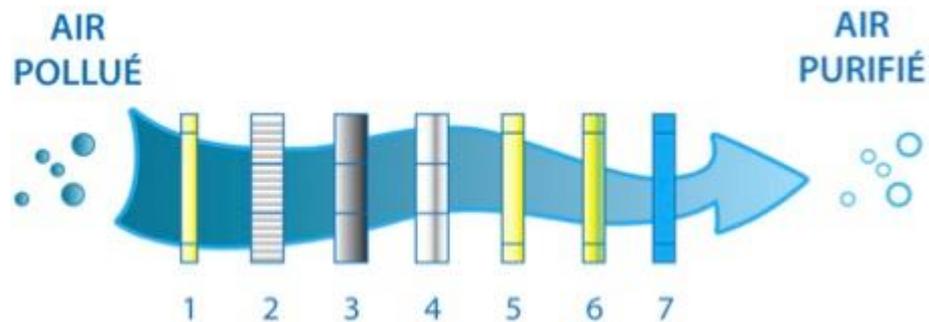
- Maîtrise des émissions à la source.



- Ventiler le bâtiment.

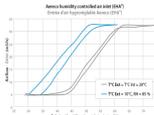


- Epurer l'air intérieur.

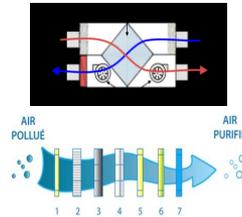


# MAÎTRISE DE LA QAI

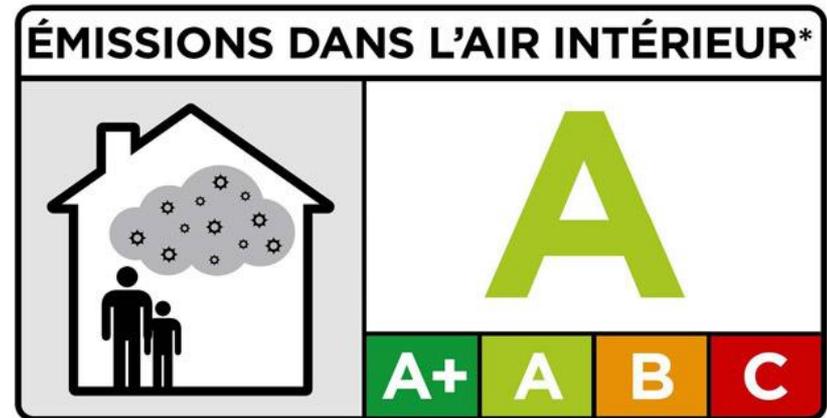
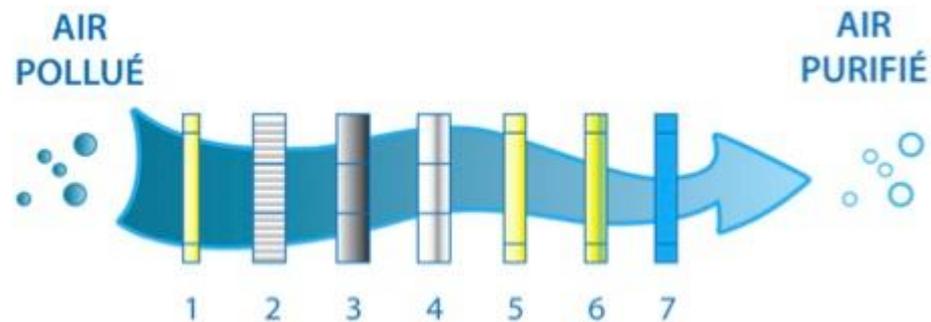
- Maîtrise des émissions à la source.



- Ventiler le bâtiment.



- Epurer l'air intérieur.



Pour la maîtrise conjointe de l'énergie et de la QAI, la récupération de chaleur et l'épuration sont au cœur de la problématique

# LES INDICES DE CARACTÉRISATION DE LA QAI

## ■ Multitude d'indices proposés, selon :

- Les pays ou zones géographiques.
- Les secteurs d'activité.
- Les polluants ou types de polluants.

## ■ Plusieurs objectifs différents.

- Suivre la QAI d'un bâtiment dans le temps.
- Comparer des solutions entre elles.
- Situer une solution par rapport à un référentiel.

2.1	Indoor Air Pollution Index, Indoor Discomfort Index, Indoor Environmental Index 13	
2.1.1	Indoor Air Pollution Index.....	13
2.1.2	Indoor Discomfort Index.....	15
2.1.3	Indoor Environmental Index.....	16
2.1.4	Symptômes des occupants.....	16
2.1.5	Discussion.....	17
2.2	Indice LHVP.....	19
2.3	Indice « Aéroport de Paris ».....	19
2.4	Indice CLIM 2000.....	21
2.5	Indice IAQ et Indice BILGA.....	21
2.6	Indice GAPI.....	22
2.7	Indoor Environment Index.....	23
2.8	Méthode d'estimation multicritère.....	26
2.8.1	Recueil des données.....	27
2.8.2	Classement des bâtiments critère par critère.....	27
2.8.3	Agrégation et classement des bâtiments.....	28
2.9	Indice semi-quantitatif de l'exposition à l'humidité et aux moisissures.....	28
2.9.1	Surveillance épidémiologique.....	29
2.9.2	Evaluation environnementale.....	29
2.9.3	Association entre l'IEI et les symptômes respiratoires.....	30
2.9.4	Discussion.....	31
2.10	Indice humidité.....	32
2.10.1	Symptômes des occupants.....	32
2.10.2	Evaluation de l'environnement intérieur.....	32
2.10.3	Indice.....	33
2.11	Evaluation du caractère irritant de l'air intérieur.....	34

[http://www.oqai.fr/userdata/documents/483\\_Inventaire\\_OQAI\\_Indices\\_2006.pdf](http://www.oqai.fr/userdata/documents/483_Inventaire_OQAI_Indices_2006.pdf)

# LES INDICES DE CARACTÉRISATION DE LA QAI (SUITE)

- **Plusieurs contenus différents.**
  - QAI seulement
  - Qualité des environnements intérieurs (QAI, Confort thermique, Luminosité, ...)
- **Les propositions concernent surtout le secteur tertiaire.**
  - Ce qui introduit de fait un biais méthodologique dans la démarche.
  - Enjeu économique de rendement des employés qui y travaillent.
    - Masse salariale : premier coût des bâtiments tertiaires.

<b>2.1</b>	<b>Indoor Air Pollution Index, Indoor Discomfort Index, Indoor Environmental Index 13</b>	
2.1.1	Indoor Air Pollution Index.....	13
2.1.2	Indoor Discomfort Index.....	15
2.1.3	Indoor Environmental Index.....	16
2.1.4	Symptômes des occupants.....	16
2.1.5	Discussion.....	17
<b>2.2</b>	<b>Indice LHVP.....</b>	<b>19</b>
<b>2.3</b>	<b>Indice « Aéroport de Paris ».....</b>	<b>19</b>
<b>2.4</b>	<b>Indice CLIM 2000.....</b>	<b>21</b>
<b>2.5</b>	<b>Indice IAQ et Indice BILGA.....</b>	<b>21</b>
<b>2.6</b>	<b>Indice GAPI.....</b>	<b>22</b>
<b>2.7</b>	<b>Indoor Environment Index.....</b>	<b>23</b>
<b>2.8</b>	<b>Méthode d'estimation multicritère.....</b>	<b>26</b>
2.8.1	Recueil des données.....	27
2.8.2	Classement des bâtiments critère par critère.....	27
2.8.3	Agrégation et classement des bâtiments.....	28
<b>2.9</b>	<b>Indice semi-quantitatif de l'exposition à l'humidité et aux moisissures.....</b>	<b>28</b>
2.9.1	Surveillance épidémiologique.....	29
2.9.2	Evaluation environnementale.....	29
2.9.3	Association entre l'IEI et les symptômes respiratoires.....	30
2.9.4	Discussion.....	31
<b>2.10</b>	<b>Indice humidité.....</b>	<b>32</b>
2.10.1	Symptômes des occupants.....	32
2.10.2	Evaluation de l'environnement intérieur.....	32
2.10.3	Indice.....	33
<b>2.11</b>	<b>Evaluation du caractère irritant de l'air intérieur.....</b>	<b>34</b>

[http://www.oqai.fr/userdata/documents/483\\_Inventaire\\_OQAI\\_Indices\\_2006.pdf](http://www.oqai.fr/userdata/documents/483_Inventaire_OQAI_Indices_2006.pdf)

## Beaucoup reste à faire sur ce terrain

# LES ENJEUX DE LA QAI ET LES PROBLÉMATIQUES CORRESPONDANTES.

- Sécurité
  - **Confinement (CO, Radon)**
- Santé
  - **Expositions chroniques et aiguës.**
- Economie
  - **Syndrome des bâtiments malsains.**
- Energie
  - **Ventilation et épuration.**
- Confort
  - **Humidité, Comportements.**

*« Ensemble de symptômes respiratoires, oculaires, cutanés et sensoriels apparaissant chez les sujets travaillant en atmosphère climatisée plusieurs heures par jour, sans critères vraiment objectifs. »*

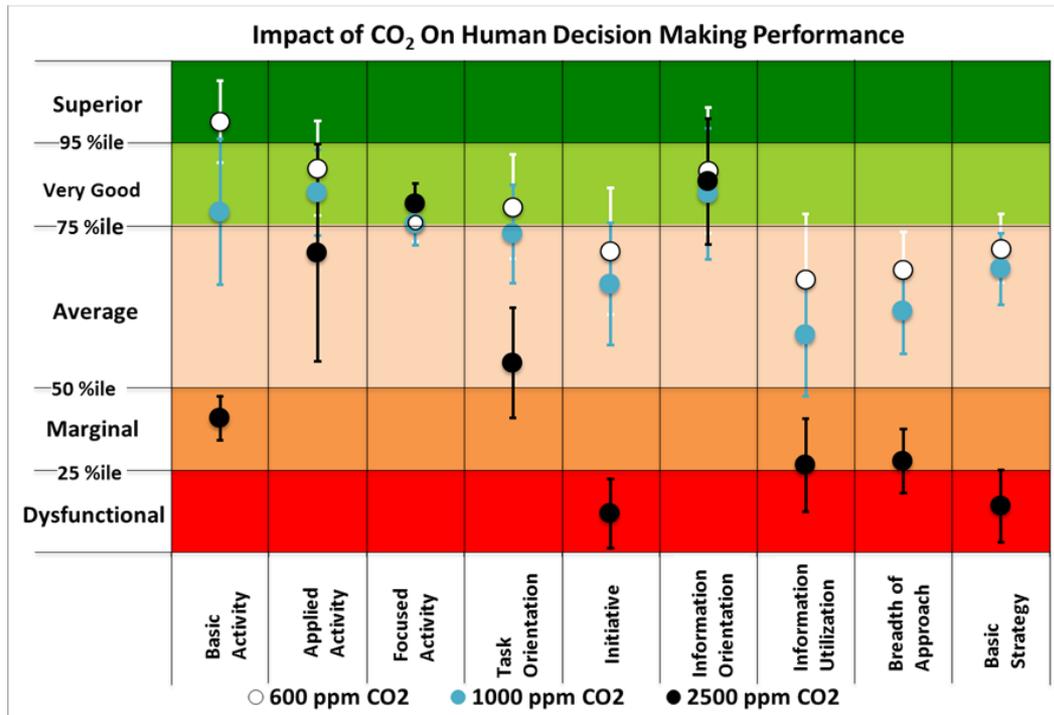
# LES ENJEUX DE SANTÉ ET LES ENJEUX ÉCONOMIQUES ASSOCIÉS

- « Pour la France seule, le coût annuel de la pollution de l'air intérieur s'élève à près de 19 milliards d'euros. » Chiffrage de l'ANSES en 2014.
- « Une étude réalisée en fonction des indicateurs globaux de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), parue en 2011, a évalué le coût de la pollution de l'air intérieur entre 12,8 et 38,4 milliards de dollars ».

	Benzène	TCE	Radon	CO	Particules	Fumée de tabac environnementale	Total
<b>Nombre de décès</b>	342	20	2 074	98	16 236	1 114	19 884
<b>Coût externe</b>							
Coût mortalité	-437	-26	-2 089	-237	-5 760	-322	-8 871
Coût qualité vie	-369	-7	-309	0	-7 350	-837	-8 872
Coût production	-36	-2	-282	-72	-1 102	-85	-1579
<i>Total coût externe</i>	<i>-842</i>	<i>-35</i>	<i>-2680</i>	<i>-309</i>	<i>-14 212</i>	<i>-1 244</i>	<i>-19322</i>
<b>Finances publiques</b>							
Coût des soins	-18	-4	-61	-3	-236	-37	-360
Coût recherche	-	-	-	-	-	-	-11
Retraites non versées	10,2	0,61	49	4	136,5	8	+209
Total finances publiques	-7,8	-3,4	-12	0,9	-99,5	-29	-163
Effet FP sur BE	-9,4	-4	-14,4	1,1	-119,4	-35	-195
<b>Variation de BE</b>	<b>-851</b>	<b>-39</b>	<b>-2694</b>	<b>-308</b>	<b>-14 331</b>	<b>-1 279</b>	<b>-19 516</b>

*Extrait de l'étude de l'ANSES (2014)*

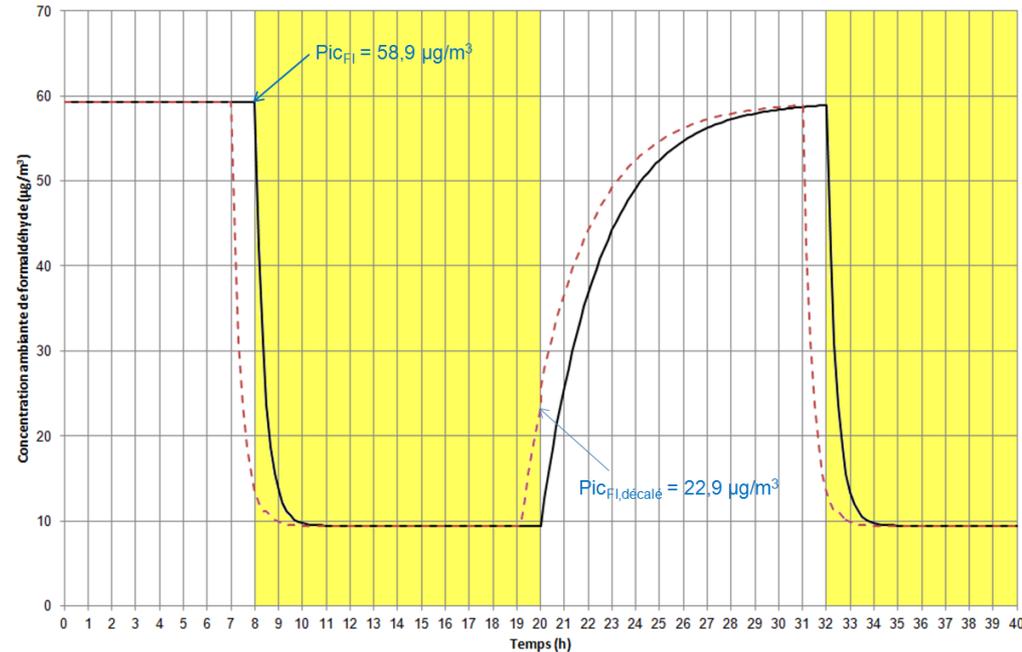
# LES ENJEUX DE SANTÉ ET LES ENJEUX ÉCONOMIQUES ASSOCIÉS



*Extrait d'une étude du Lawrence Berkeley Laboratory (2013)*

# LA NOTION D'EXPOSITION

- Quelque soit le polluant, un risque QAI s'estime toujours par une combinaison entre une concentration et une durée. C'est l'exposition.
- On distingue alors classiquement :
- L'exposition chronique.
  - Moyenne des concentrations qui sont imposées sur de longues périodes.
- L'exposition aiguë.
  - Valeurs de pointe des concentrations qui peuvent être de courte durée, mais cependant très nocives.



Le temps est souvent la variable à privilégier pour la gestion des expositions aiguës

# LA MESURE DE LA QAI

- C'est certainement le problème n°1 de ce domaine d'étude.
  - Très faibles concentrations dans les bâtiments.
  - Multitude des polluants → multiplicité des « capteurs ».
  - Cas spécifique des micro-organismes.
  - Evolution dans l'espace et dans le temps.
- Certes, on voit apparaître de nombreux « objets », connectés ou pas, censés mesurer la QAI.
- Mais la mesure de la QAI est une activité fatalement délicate et, probablement pour longtemps encore, au coût très élevé.



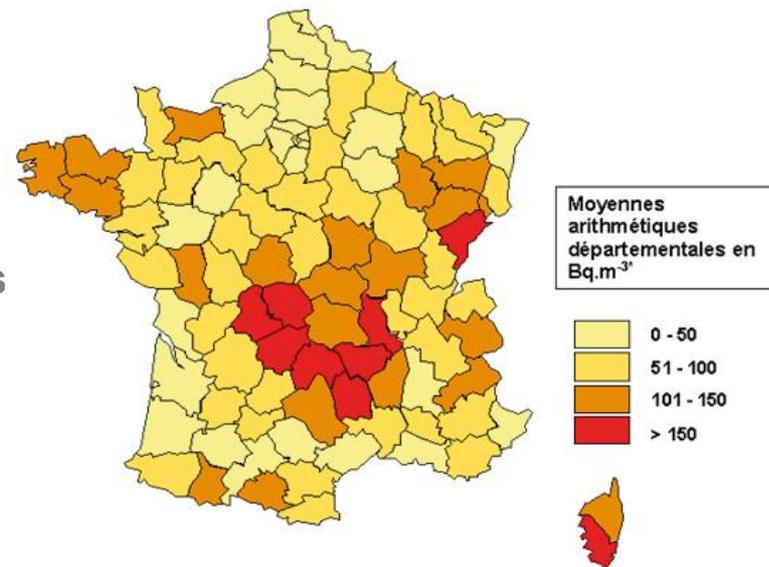
« Que Choisir », 13 avril 2013

# LES INSTITUTIONS DE LA QAI (NON EXHAUSTIF)

- **OQAI ([www.oqai.fr](http://www.oqai.fr)). Observatoire de la QAI.**
  - Création en 2001. Mission : développer des campagnes de mesure de la QAI dans les bâtiments. Etablir des BDD des résultats obtenus.
- **InVS ([www.invs.sante.fr](http://www.invs.sante.fr)). Institut National de Veille Sanitaire**
  - Etablissement public du Ministère de la Santé créé en 1998. Mission : Surveillance, vigilance et alerte dans tous les domaines de la santé publique.
- **PNSE ([www.sante.gouv.fr](http://www.sante.gouv.fr)). Plan National Santé et Environnement**
  - Plan National du Ministère de la santé (depuis 2004). Aujourd'hui PNSE 3 : 2015-2019. Mission : répondre aux interrogations des Français sur les conséquences sanitaires à court et moyen terme de l'exposition à certaines pollutions
- **INERIS ([www.ineris.fr](http://www.ineris.fr)). Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques**
  - Etablissement public de recherche créé en 1990. Mission : prévention des risques que les activités économiques font peser sur la santé, la sécurité des personnes et des biens, et sur l'environnement
- **INRS ([www.inrs.fr](http://www.inrs.fr)). Institut National de Recherche et de Sécurité**
  - Asso (loi 1901), paritaire, créée en 1947. Missions : Prévention des risques professionnels.
- **ANSES ([www.anses.fr](http://www.anses.fr)). Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail.**
  - Créée en juillet 2010. Mission : Veille, expertises et recherches sur la santé humaine, animale et végétale.

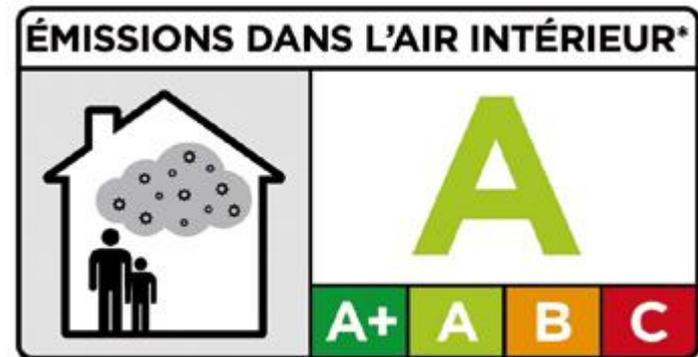
# L'ENCADREMENT RÉGLEMENTAIRE. RÉGLEMENTATIONS HISTORIQUES.

- **Ventilation** : Depuis 1955, des arrêtés (logements) et règlements sanitaires (tertiaire) stipulent des conditions de ventilation minimale des locaux afin d'assurer une qualité de l'air suffisante.
- **Amiante** : Depuis 1996, le Code de la Santé Publique fixe les règles de repérage, de surveillance et d'obligation de travaux pour gérer les risques liés à l'amiante dans tous les bâtiments
- **CO** : Quelques textes techniques (conduits de fumée, installations au gaz ...) existent depuis les années 70. Depuis 2008, des arrêtés et articles du code de la construction définissent les règles de contrôle et d'entretien des systèmes de chauffage au gaz.
- **Radon** : Depuis 2004, un arrêté décrit les procédures de dépistage, réparation et contrôle des lieux ouverts au publics dans les départements prioritaires (>100 Bq/m<sup>3</sup>).



# ENCADREMENT RÉGLEMENTAIRE. ETIQUETAGE DES PRODUITS.

- Depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2012.
- Vise à limiter les émissions de polluants (contrôle à la source).
- Concerne les produits de construction et de décoration.
- Ne s'intéresse qu'aux émissions des produits en œuvre (pas à la pose).
- Basé sur des essais en cellules normalisées, avec renouvellement d'air contrôlé et mesure des concentrations de 10 polluants.
- La valeur la plus défavorable fait le résultat.



Concentrations limites ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) pour chaque polluant et chaque niveau d'étiquetage

CLASSES	C	B	A	A+
Formaldéhyde	> 120	< 120	< 60	< 10
Acétaldéhyde	> 400	< 400	< 300	< 200
Toluène	> 600	< 600	< 450	< 300
Tétrachloroéthylène	> 500	< 500	< 350	< 250
Xylène	> 400	< 400	< 300	< 200
1,2,4-Triméthylbenzène	> 2000	< 2000	< 1500	< 1000
1,4-Dichlorobenzène	> 120	< 120	< 90	< 60
Ethylbenzène	> 1500	< 1500	< 1000	< 750
2-Butoxyéthanol	> 2000	< 2000	< 1500	< 1000
Styrène	> 500	< 500	< 350	< 250
COVT	> 2000	< 2000	< 1500	< 1000

# ENCADREMENT RÉGLEMENTAIRE. POLLUTION GAZEUSE DANS LES ERP.

- **Décret 2015-1000 du 17 Août 2015.**  
Modalités de surveillance de la QAI dans certains ERP (en commençant par les établissements d'accueil collectif d'enfants de moins de 6 ans).
- **Mesure de 3 polluants :**
  - Formaldéhyde : substance irritante.
  - Benzène : substance cancérigène.
  - CO2 : marqueur de confinement.
- **Mesure de contrôle tous les 7 ans (tous les 2 ans si dépassement des valeurs limites).**
- **Si dépassement des valeurs limites, information du préfet et obligation de trouver les sources de pollution (propriétaire ou exploitant).**

Établissements	Dates d'application
Établissements d'accueil collectif d'enfants de moins de six ans et les écoles maternelles	avant le 1 <sup>er</sup> janvier 2015 En fait 2018
Écoles élémentaires	avant le 1 <sup>er</sup> janvier 2018
Accueils de loisirs et les établissements d'enseignement du second degré	avant le 1 <sup>er</sup> janvier 2020
Autres établissements (sanitaires et sociaux, pénitentiaires pour mineurs, piscines couvertes)	avant le 1 <sup>er</sup> janvier 2023

Substances	Valeur-guide pour l'air intérieur		Valeur-limite
<b>Formaldéhyde</b>	<b>30 µg/m<sup>3</sup></b> pour une exposition de longue durée à compter du 1 <sup>er</sup> janvier 2015	<b>10 µg/m<sup>3</sup></b> pour une exposition de longue durée à compter du 1 <sup>er</sup> janvier 2023	100 µg/m <sup>3</sup>
<b>Benzène</b>	<b>5 µg/m<sup>3</sup></b> pour une exposition de longue durée à compter du 1 <sup>er</sup> janvier 2013	<b>2 µg/m<sup>3</sup></b> pour une exposition de longue durée à compter du 1 <sup>er</sup> janvier 2016	10 µg/m <sup>3</sup>
<b>Dioxyde de carbone</b>			Indice de confinement de niveau 5*

# PRÉVISION RÉGLEMENTAIRE. POLLUTION PARTICULAIRE DANS TOUS LES BÂTIMENTS.

- Avis du Haut Conseil de la Sécurité Publique (HCSP) dans son rapport de juillet 2013.
- Concerne tous les bâtiments.
- Aller progressivement (sur 10 ans) vers des valeurs cibles pour les PM<sub>2,5</sub> et les PM<sub>10</sub>.
- Actions immédiates (identification des sources, correctifs) si dépassement des valeurs d'action rapide.

	Années*	PM <sub>2,5</sub>	PM <sub>10</sub>
Valeurs cibles en µg/m <sup>3</sup>	2025	10	15
Valeurs repères en µg/m <sup>3</sup>	2023	12	18
	2021	14	21
	2019	16	24
	2017	18	27
	2015	20	30

Valeurs d'action rapide :  
50 µg/m<sup>3</sup> pour les PM<sub>2,5</sub>  
75 µg/m<sup>3</sup> pour les PM<sub>10</sub>

Pas de traduction réglementaire pour l'heure.

# LA FORMULE DES GAZ TRACEURS

- La pollution de l'air vue comme une mesure du renouvellement d'air d'un local.

$$V \frac{dC}{dt} = C_e q_e - C q_s + P$$

$$q_e = q_s = q$$

- Mais aussi en matière de pollution, la configuration de référence qui révèle les interactions entre polluants et matériaux et polluants entre eux.

$$C(t) = \left( C_0 - C_e - \frac{P}{q} \right) \exp\left(-\frac{q}{V}t\right) + \left( C_e + \frac{P}{q} \right)$$

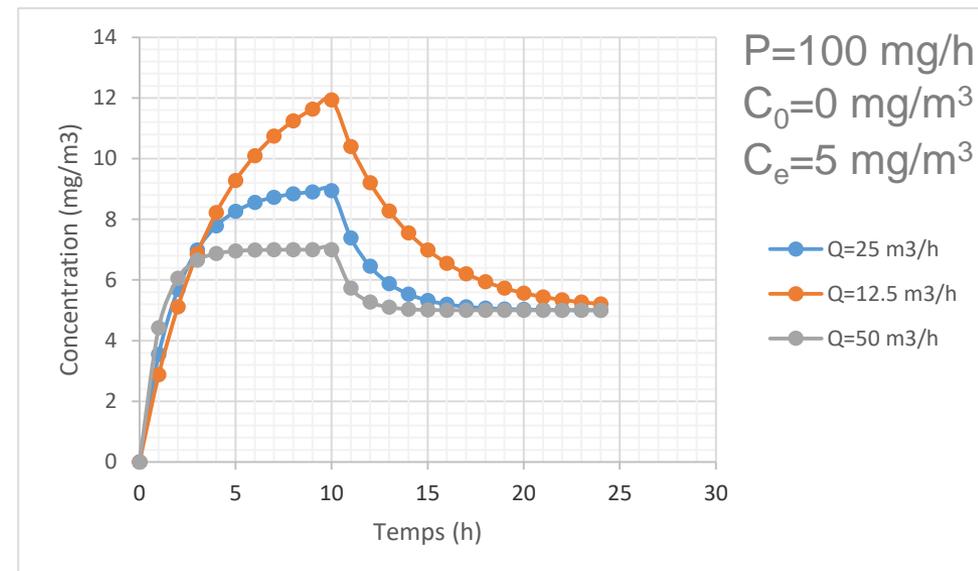
- Equation de conservation du polluant.

- Débit de renouvellement d'air fixe.

- Forme typique des évolutions.

- Utilisation comme mesure du renouvellement d'air.

- Gaz qui ne s'adsorbe pas et ne se produit pas spontanément ( $\text{SF}_6$ ).



# CONCLUSIONS SUR CE CONTEXTE GÉNÉRAL.

- On n'a pas encore vu un polluant, mais c'est déjà compliqué.
- **Domaine en pleine évolution.**
  - Contexte réglementaire
  - Institutions concernées
  - Nombreuses approches empiriques et pragmatiques
- **Deux enjeux majeurs :**
  - Santé
  - Productivité
- **Deux verrous scientifiques majeurs :**
  - La mesure
  - La modélisation

■ Q

■ A

■ |

■ **Bâtiment**

# STRUCTURATION DES 3 PREMIÈRES SÉANCES.

- **Présentation de la thématique.**
- **Les polluants de l'air intérieur.**
  - Catégories, Origines, Impacts, Ordres de grandeur, Traitements possibles ...
- **Evolution des polluants dans l'espace et dans le temps.**
  - Phénoménologie, Modes de représentation...
  - Lois physiques, Approximations, Modes de représentation...