

Le 8 juillet 2009 - Université de La Rochelle

Analyse multicritère des stratégies de ventilation en maisons individuelles

Juslin Koffi

Directeur de thèse: Francis Allard

Co-encadrement: Jean-Jacques Akoua, Jacques Ribéron

○ Contexte

- ☑ Sources de polluants de l'air intérieur: occupant (métabolisme et activité), équipement (meubles, revêtements, produits d'entretien), matériaux de construction, sols...

➔ **Rôle de la ventilation: produire un renouvellement d'air suffisant en vue d'assurer une bonne qualité d'air intérieur (QAI)**

- ☑ Importance grandissante des déperditions énergétiques

➔ Différentes stratégies de ventilation visant à réduire les coûts liés au renouvellement d'air

○ Objectif

- ☑ Comparer les performances de différentes stratégies de ventilation pour les maisons individuelles

○ Démarche

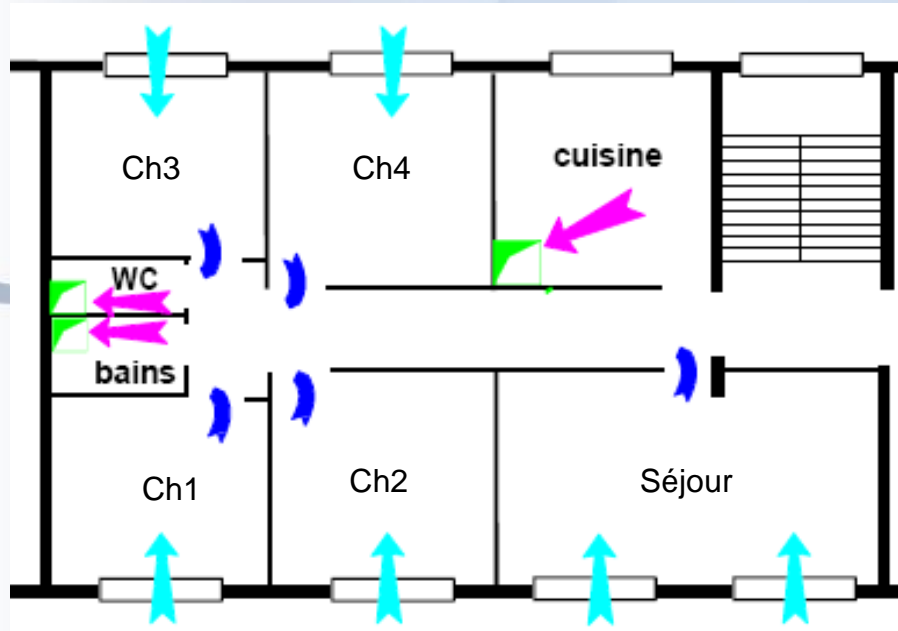
- ☑ Approches expérimentale et numérique

- La ventilation dans les logements
- Etudes expérimentales
- Modélisation thermo-aéraulique du bâtiment
- Evaluations numériques
- Conclusion et perspectives

La ventilation des logements

○ Principe de ventilation

- ☑ Ventilation générale et permanente ou principe de balayage

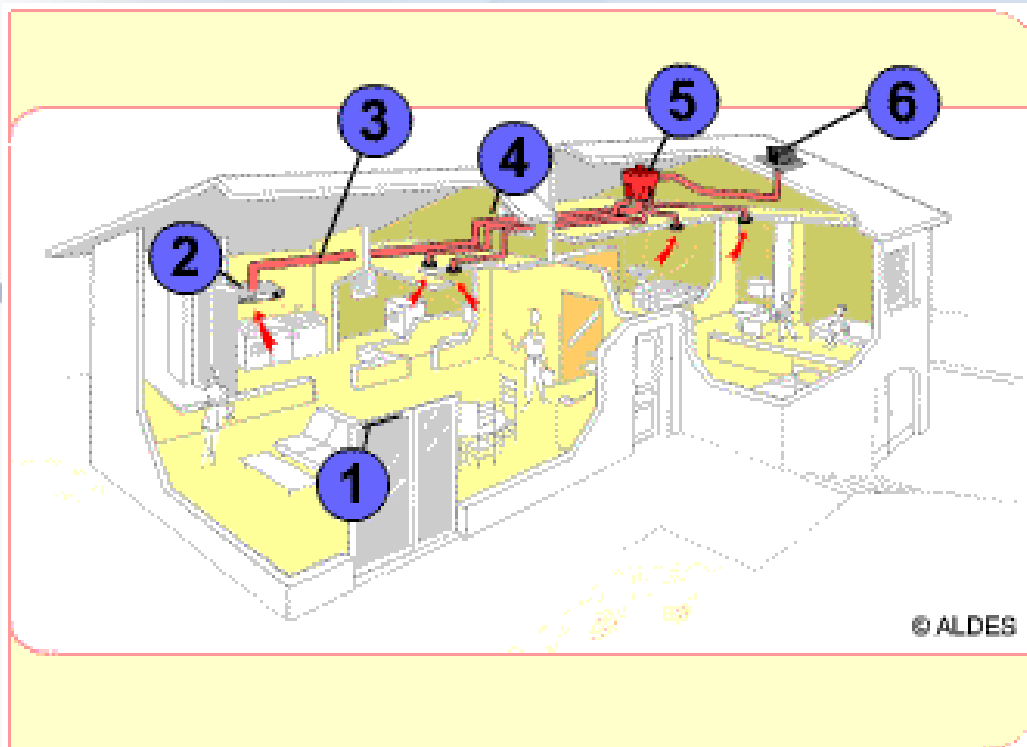


**L'air doit pouvoir circuler librement
des pièces principales
(séjour, chambres)
vers les pièces de service
(cuisine, salle de bain, douche, WC)**

- ➔ Maitrise des transferts de polluants
- ➔ Utilisation dans les pièces de service de l'air chauffé des pièces principales

○ Systèmes de ventilation

- ☑ Ventilation Mécanique Contrôlée (VMC) simple flux



→ Autoréglable:

Entrées d'air fixes ou autoréglables +
Bouches d'extraction fixes

→ Hygroréglable A:

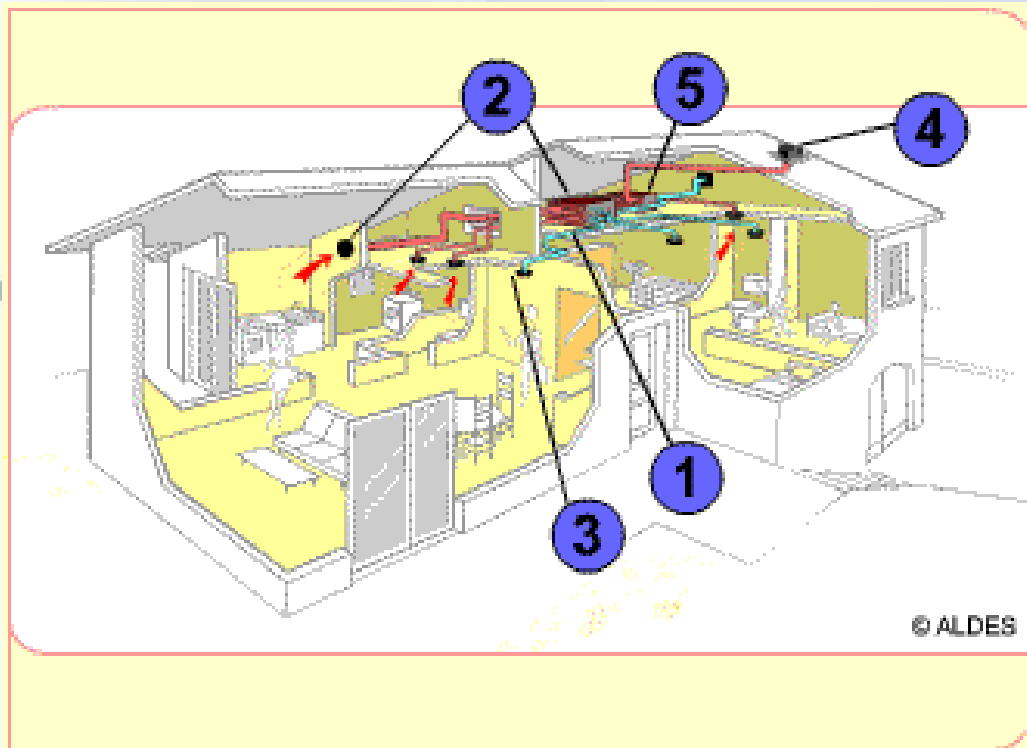
Entrées d'air autoréglables +
Bouches d'extraction hygroréglables

→ Hygroréglable B:

Entrées d'air hygroréglables +
Bouches d'extraction hygroréglables

○ Systèmes de ventilation

- ☑ VMC double flux



→ Autoréglable:

Bouches de soufflage fixes +
Bouches d'extraction autoréglables

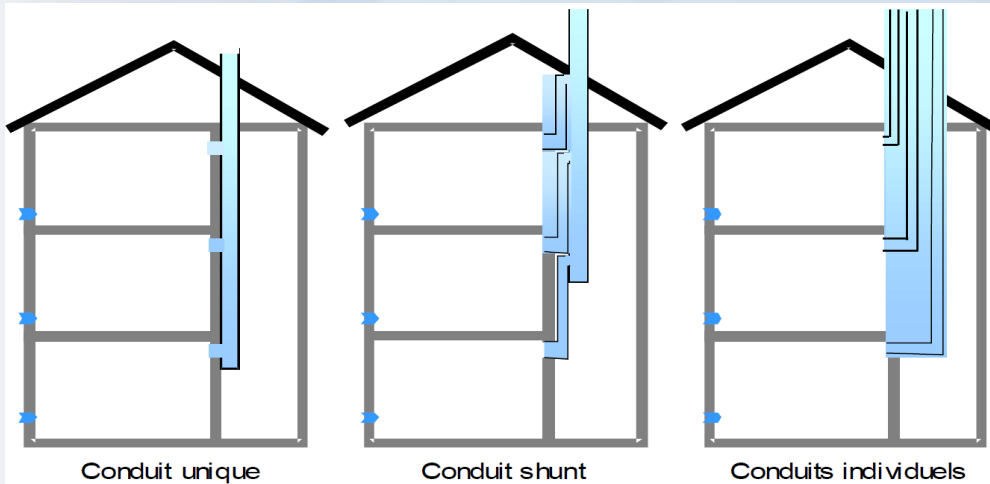
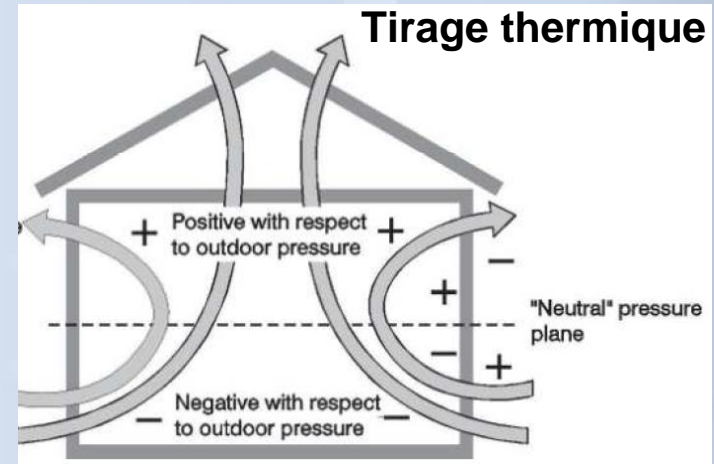
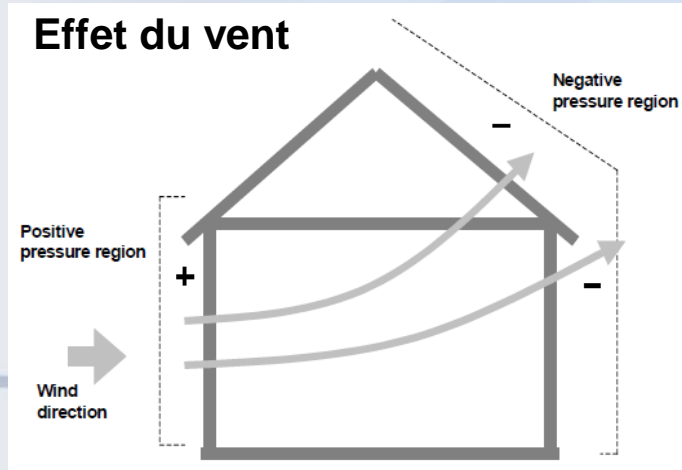
→ Echangeur

Récupération de chaleur sur l'air repris
Préchauffage de l'air neuf

→ Filtrage de l'air neuf

○ Systèmes de ventilation

☑ Ventilation naturelle



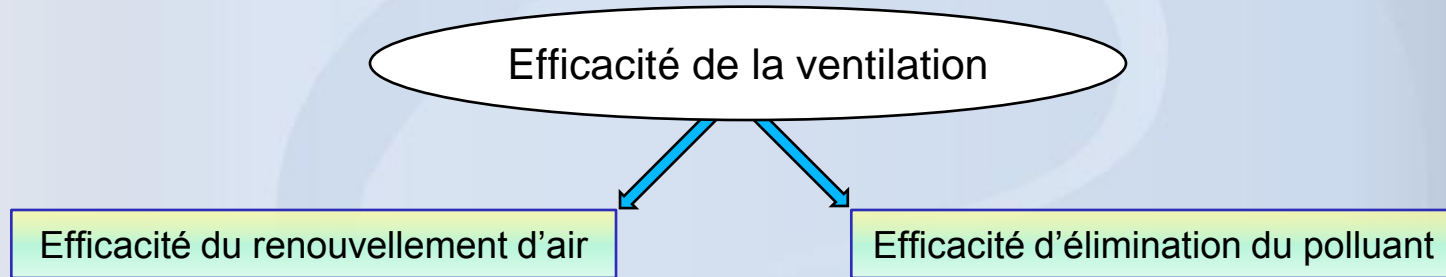
➔ par ouverture de fenêtre

➔ par conduits:

Entrées d'air fixes ou autoréglables +
Grilles d'extraction fixes

○ Evaluation des systèmes de ventilation

☑ Efficacité de la ventilation



→ Indices

$$\varepsilon_a = \frac{\tau_n}{\tau_r} = \frac{\tau_n}{2\langle \bar{\tau}_a \rangle}$$

$$\varepsilon_c = \frac{C_e - C_s}{\langle C \rangle - C_s}$$

Taux de renouvellement d'air

$$N = \frac{Q_v}{V} = \frac{1}{\tau_n}$$

☑ Impact énergétique de la ventilation

→ Consommation des ventilateurs

→ Déperditions par renouvellement d'air (chaleur sensible)

Systemes simple flux

$$\dot{Q} = \dot{m}_{\text{air}} \times c_p \times (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}})$$

Systemes double flux

$$\dot{Q}_{\text{DF}} = (\dot{m}_{\text{inf}} \times +(1 - \varepsilon_{\text{ech}}) \times \dot{m}_{\text{mv}}) \times c_p \times (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}})$$

○ Evaluation de la qualité de l'air intérieur

☑ Exposition

$$E_{\text{moy}} = \frac{1}{t_1 - t_2} \int_{t_1}^{t_2} C(t) \cdot dt$$

⇒ Valeurs seuils: Valeur à Risques Limités (VRL),
Valeurs à Risques Importants (VRI)...

→ CO2

- Humidité: <80%HR (préservation du bâti, moisissures)
- Alpha-pinène: VRL=1000 mg/m³

Confinement	1830 mg/m ³ (1000 ppm)
Confinement toléré	2380 mg/m ³ (1300 ppm)
Base+ 2 x 700 ppm	3200 mg/m ³ (1750 ppm)
VRL	4500 mg/m ³ (2460 ppm)

☑ Indices de QAI

$$I_{\text{IAQ}} = \frac{\langle C \rangle - C_s}{C_{\text{seuil}} - C_s}$$

$$I_{\text{NORM}} = \frac{I_{\text{SYST, K}}}{I_{\text{SYST, REF}}} \quad \text{où:} \quad I_{\text{SYST, K}} = \frac{\bar{C}_{\Delta T}}{\bar{C}_{\text{INOCC}, \Delta T}}$$

Etudes expérimentales des stratégies de ventilation

○ La maison MARIA

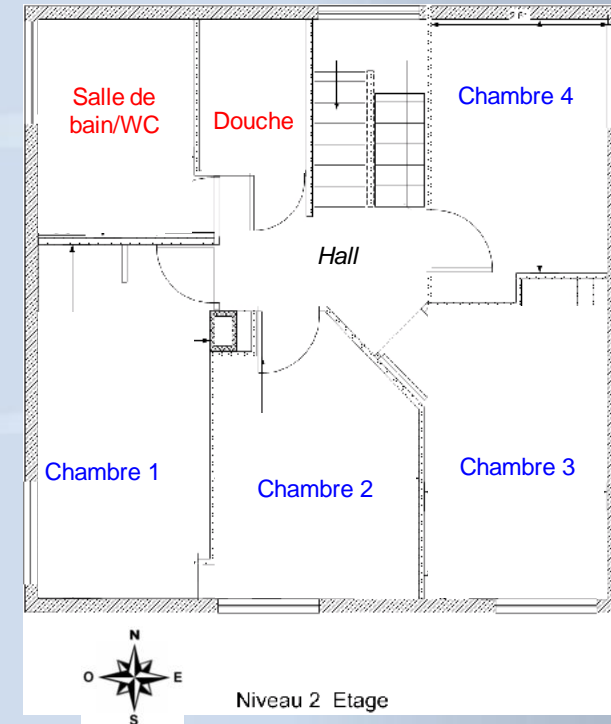
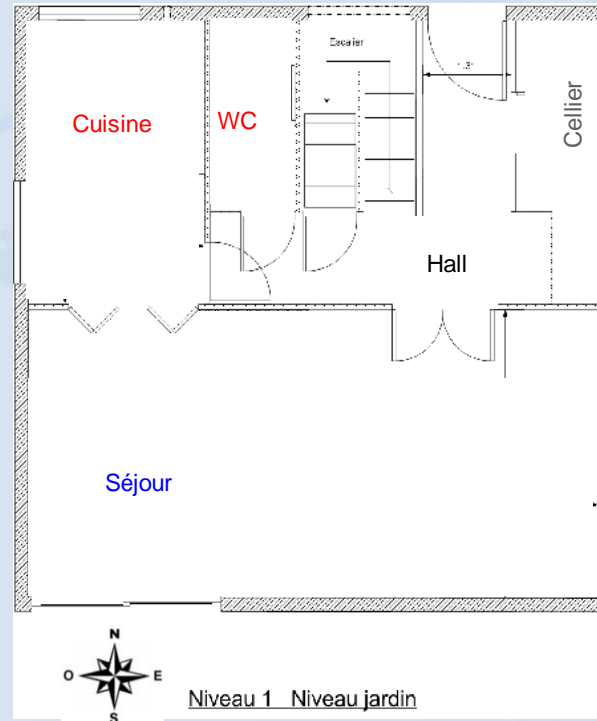
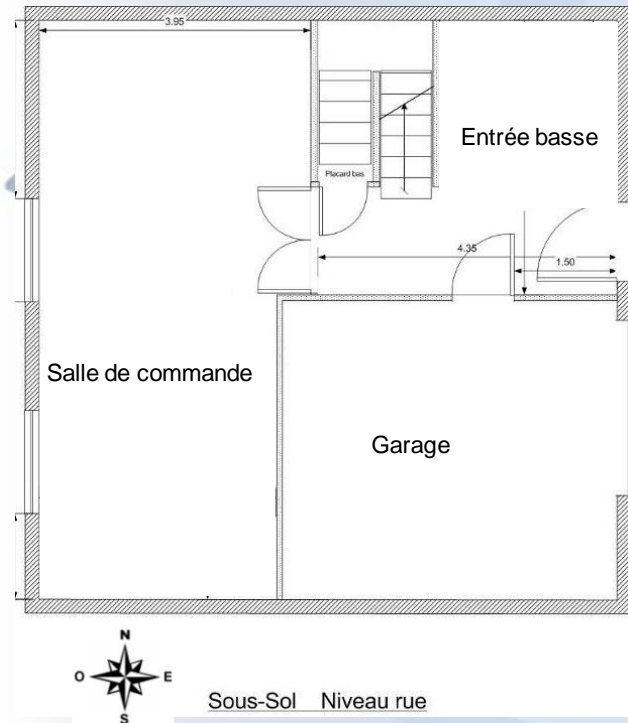
- ☑ Maison Automatisée pour des Recherches Innovantes sur l'Air
 - ➔ Etude des problématiques de QAI,
 - ➔ Evaluation de stratégies de ventilation,
 - ➔ Cadrage de méthodes de terrain
 - ➔ Calage de modèles de calcul ...



○ La maison MARIA

- ☑ 1 séjour, 4 chambres
- ☑ 1 cuisine, 1 salle de bain/WC, 1 douche, 1 WC
- ☑ 1 sous-sol avec garage

142 m² habitables sur deux niveaux



○ Systèmes de ventilation étudiés

☑ VMC simple flux

EA autoréglables: $M=30 \text{ m}^3/\text{h}$ sous 20 Pa

BE fixes: $\Phi 125 \text{ mm}$ (cuisine) et $\Phi 80 \text{ mm}$



☑ VMC double flux

Bouches de soufflage $\Phi 80 \text{ mm}$

BE autoréglables $\Phi 125 \text{ mm}$

Echangeur de chaleur + Filtre



☑ Ventilation naturelle

EAA: $M=30 \text{ m}^3/\text{h}$ sous 20 Pa

Grille d'extraction 100 cm^2

Conduits individuels $\Phi 160 \text{ mm}$



○ Protocole expérimental

☑ Méthodes des gaz traceurs

Phase 1, Injection de SF_6 : $S_p=2$ ml/s, $\Delta t_{em}=5$ heures

Phase 2: décroissance de la concentration

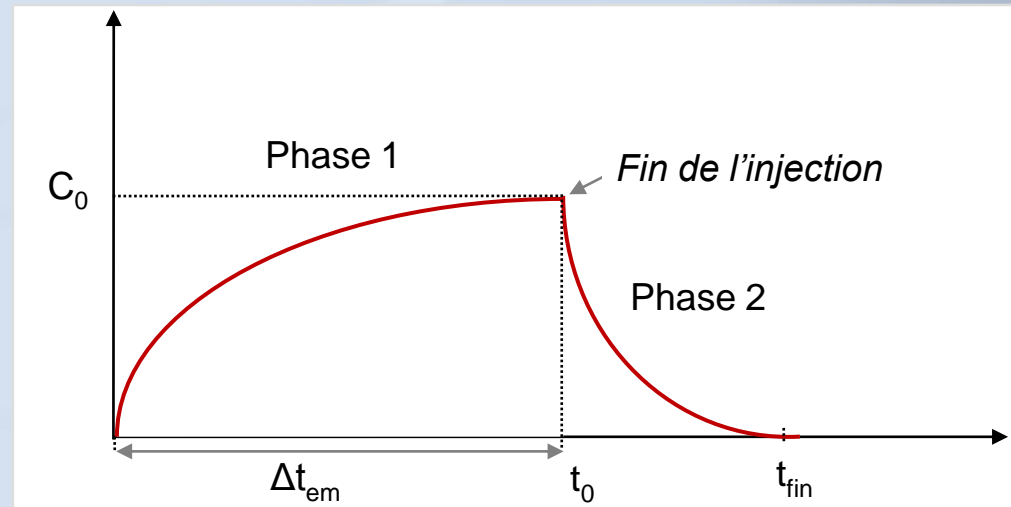
☑ Scénarios de pollution

Sources: séjour, cuisine, chambre 3, sous-sol

Mesures: séjour, cuisine, hall, chambre 3,
chambre 4 (ou sous-sol), salle de bain/WC

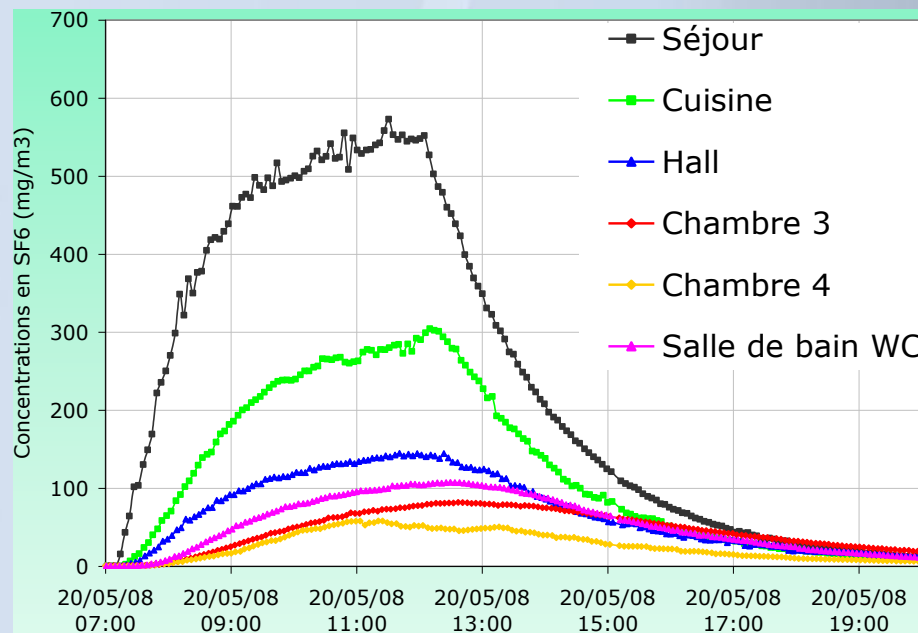
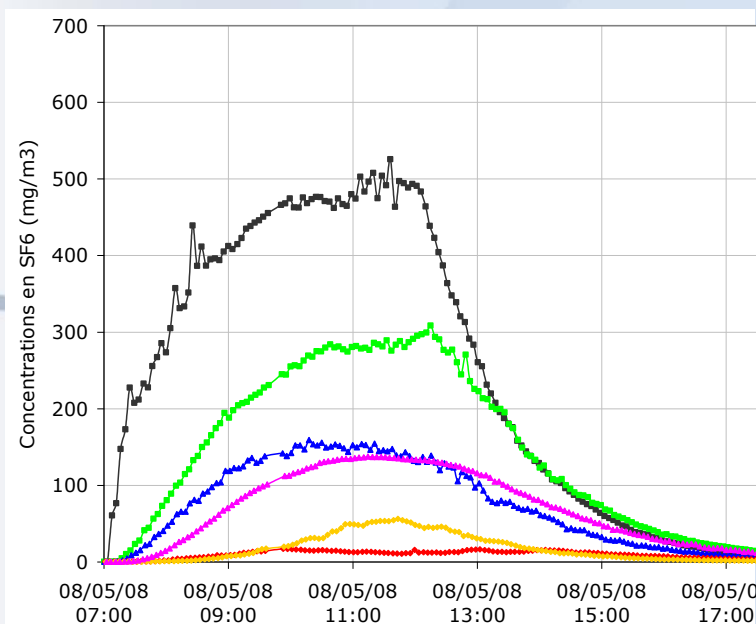
➔ Efficacité de la ventilation: mesure
dans le conduit d'extraction

☑ Paramétrage par ouverture/fermeture des portes intérieures
marche/arrêt du chauffage



○ Résultats: VMC simple flux, portes fermées (émission séjour)

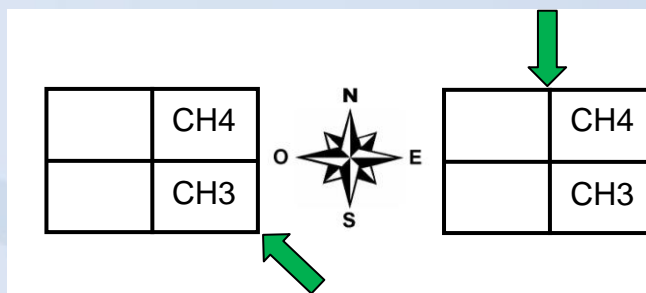
- ➔ fonctionnement passable du principe de balayage: chambres relativement polluées
- ➔ effets traversants du vent



$U_w = 2-5 \text{ m/s}$

Séjour:

$N = 0,73 \text{ vol/h (65 m}^3\text{/h)}$



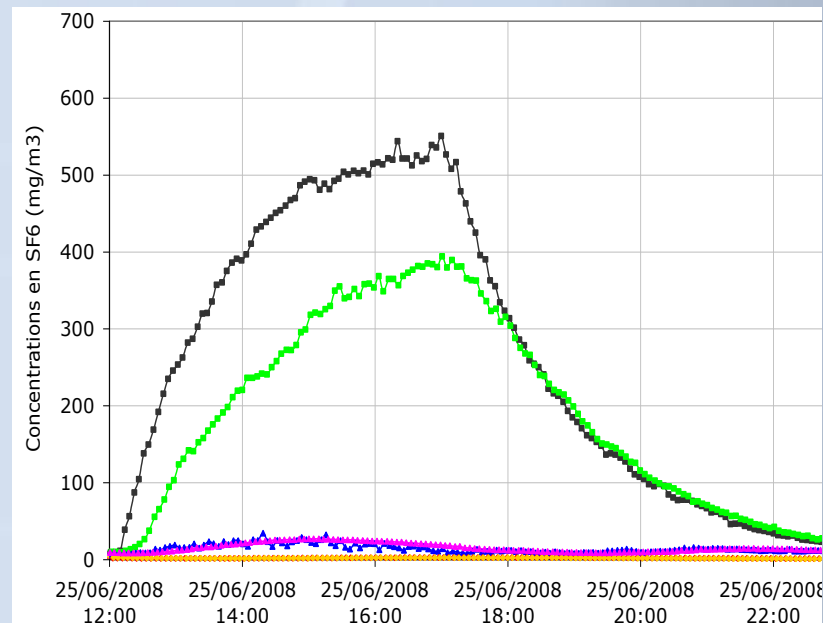
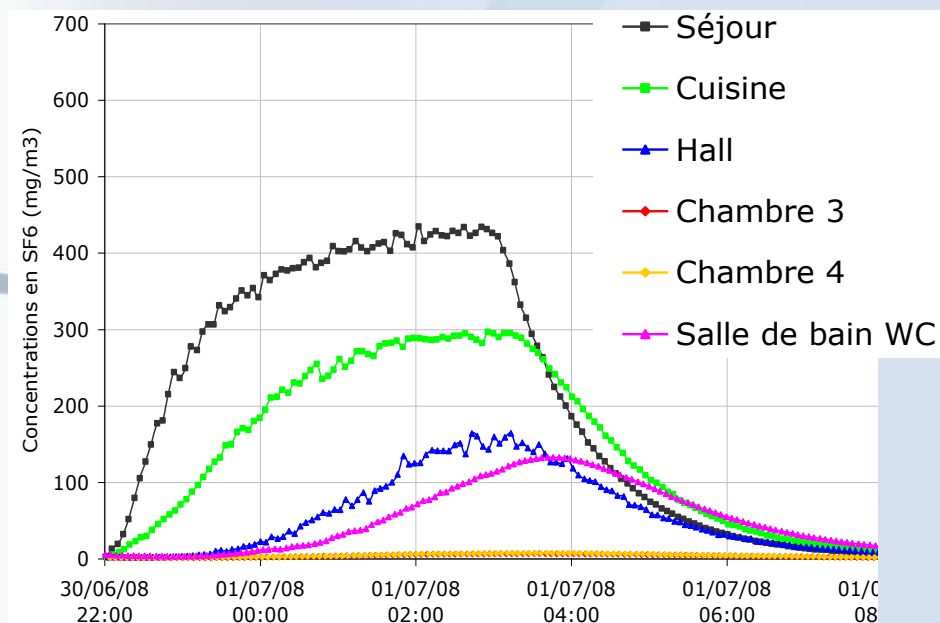
$U_w = 2-7 \text{ m/s}$

Séjour:

$N = 0,50 \text{ vol/h (44 m}^3\text{/h)}$

○ Résultats: VMC double flux, portes fermées (émission séjour)

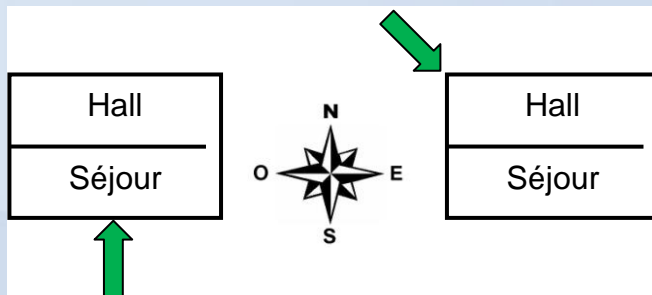
- ➔ bon fonctionnement du principe de balayage: chambres non polluées
- ➔ effets traversants du vent : protection du reste du logement



$U_w = 2 \text{ m/s}$

Séjour:

$N = 0,87 \text{ vol/h (77 m}^3\text{/h)}$



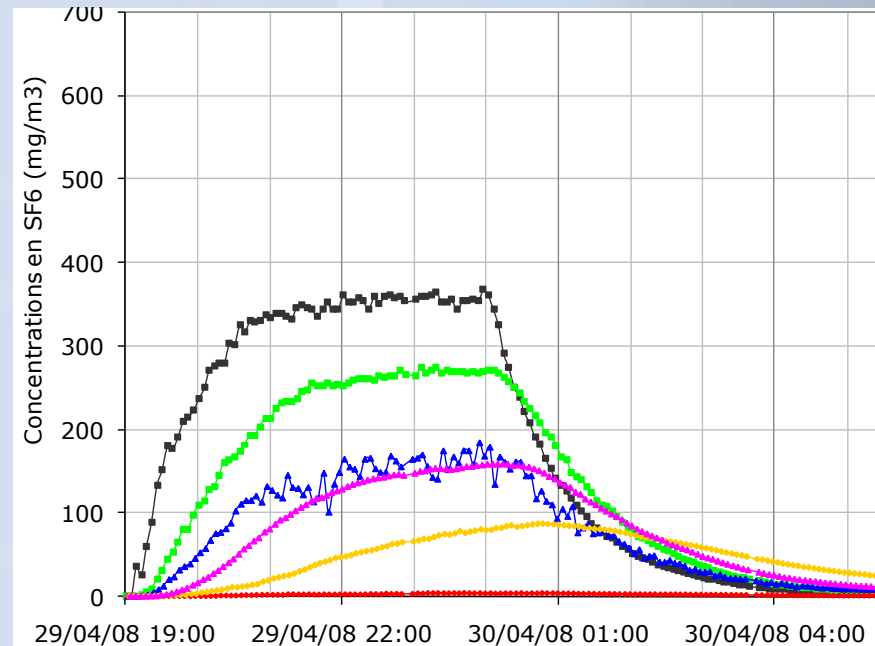
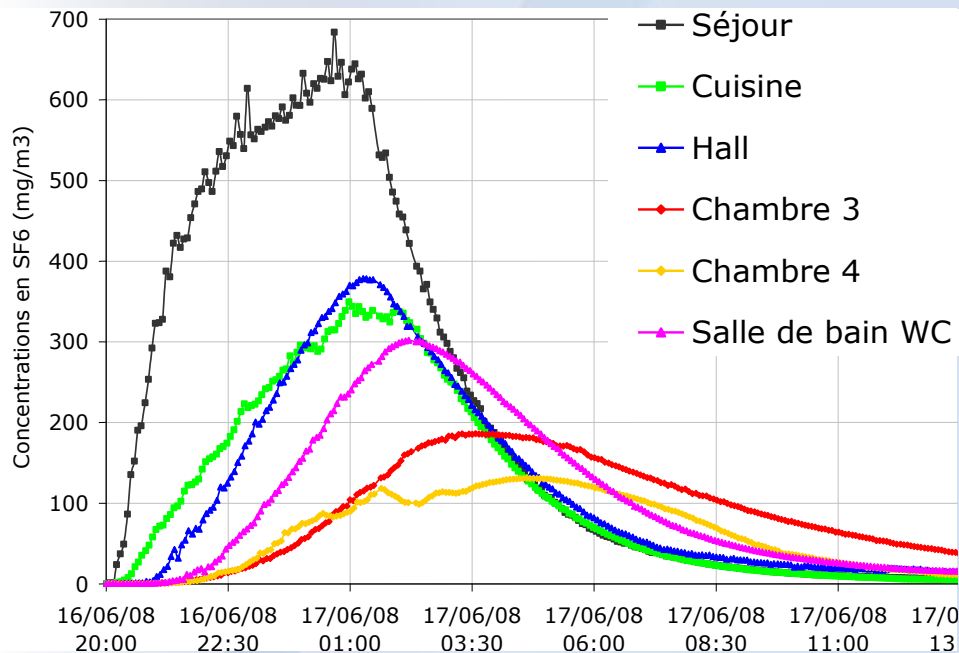
$U_w = 2-6 \text{ m/s}$

Séjour:

$N = 0,56 \text{ vol/h (49 m}^3\text{/h)}$

○ Résultats: Ventilation naturelle, portes fermées (émission séjour)

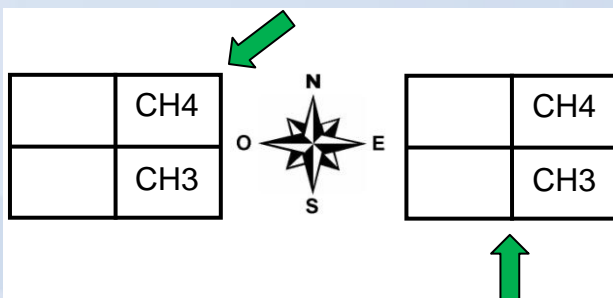
- ➔ mauvais fonctionnement du principe de balayage: chambres fortement polluées
- ➔ fortement soumis au vent



$U_w = 2-4 \text{ m/s}, \Delta T = 5-9^\circ \text{ C}$

Séjour:

$N = 0,46 \text{ vol/h (41 m}^3\text{/h)}$



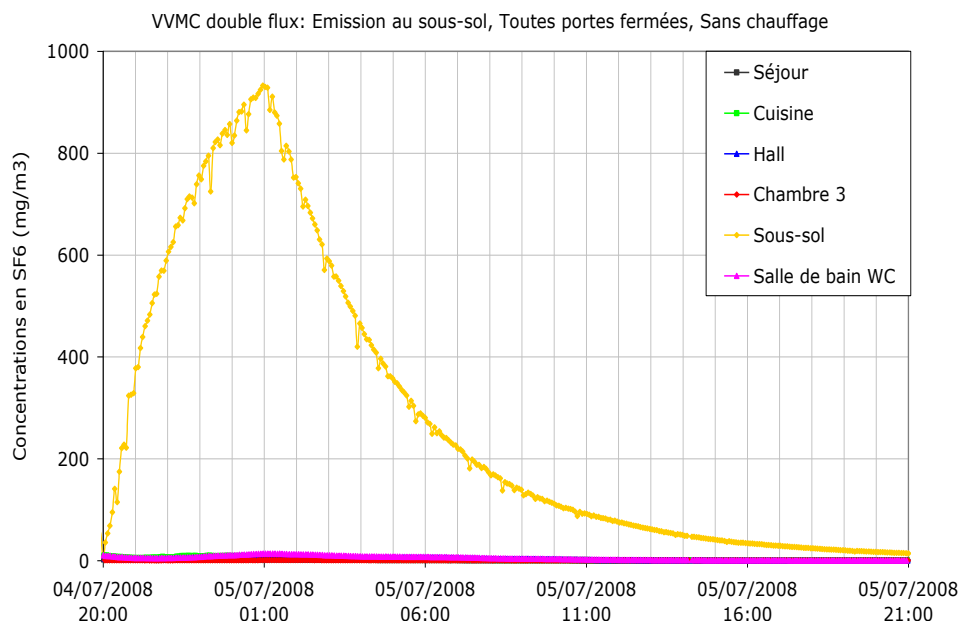
$U_w = 3-6 \text{ m/s}, \Delta T = 11-14^\circ \text{ C}$

Séjour:

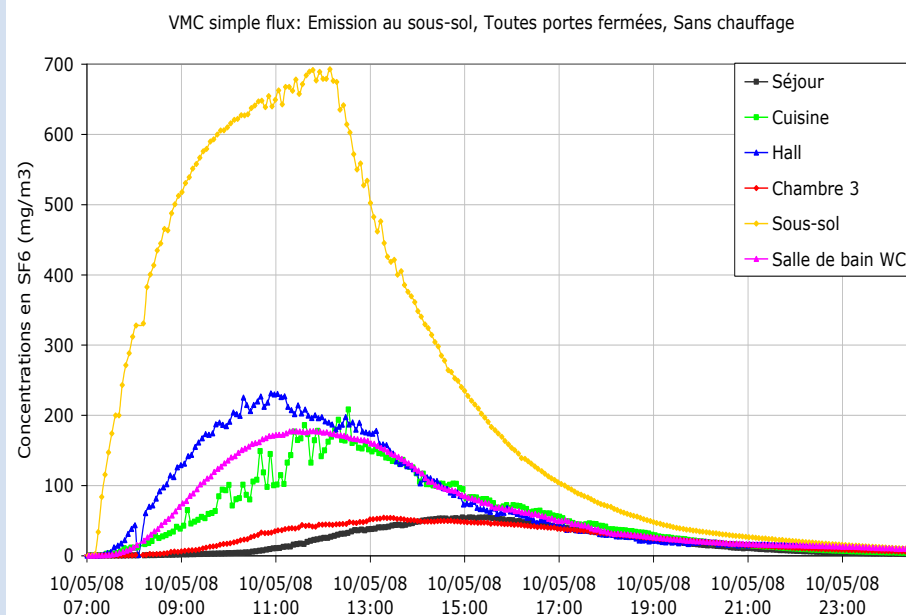
$N = 0,92 \text{ vol/h (82 m}^3\text{/h)}$

○ Résultats: portes fermées (émission sous-sol)

- ➔ VMC double flux, système équilibré: pas de pollution
- ➔ VMC simple flux, système en dépression: pollution de l'étage



VMC double flux, sous-sol

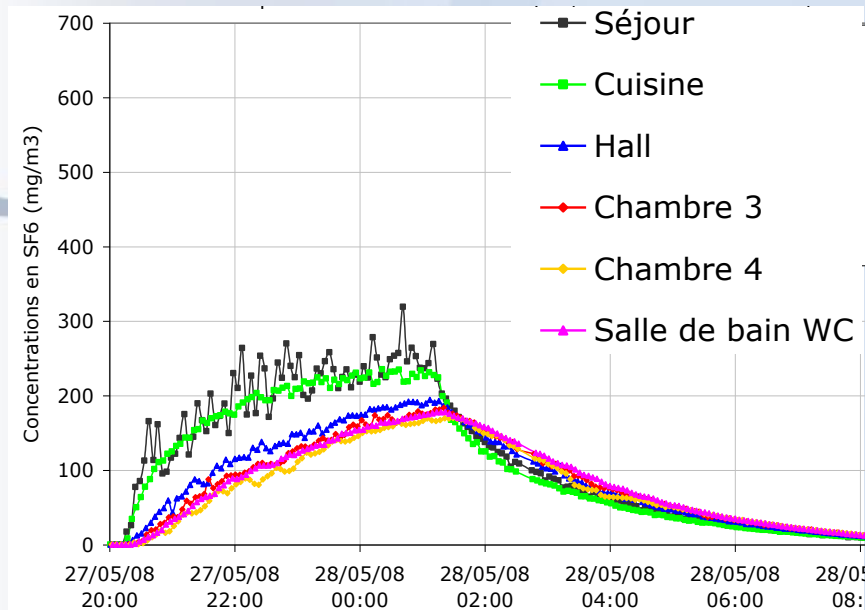


VMC simple flux, sous-sol

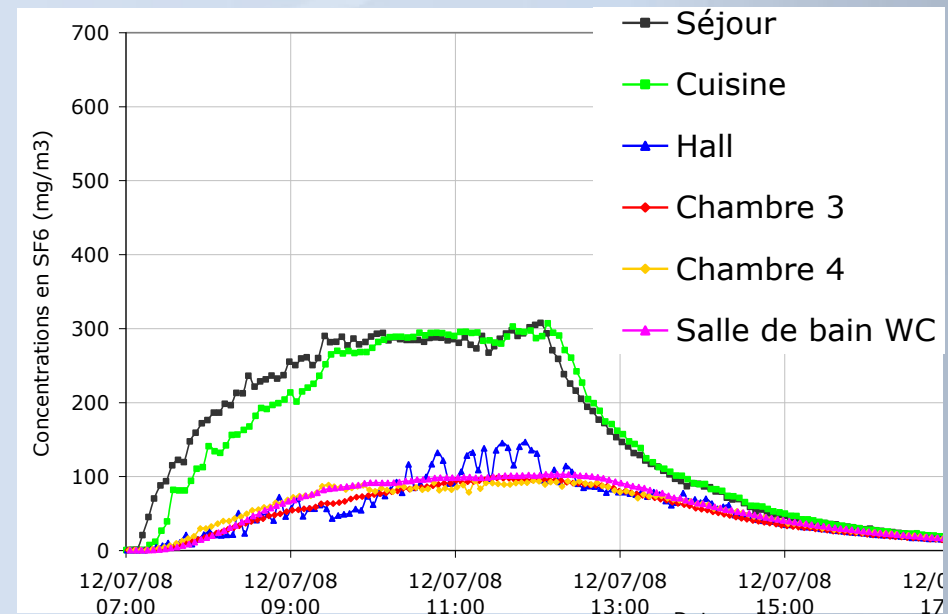
- ➔ Système équilibré,
polluant évacué via la colonne centrale

○ Résultats: toutes portes ouvertes (émission séjour)

- ➔ Réduction des pertes de charges intérieures
- ➔ Cassure du principe de balayage: fortes pollution dans toute de la maison pour **tous les systèmes** et toutes les sources




VMC simple flux, séjour



VMC double flux, séjour

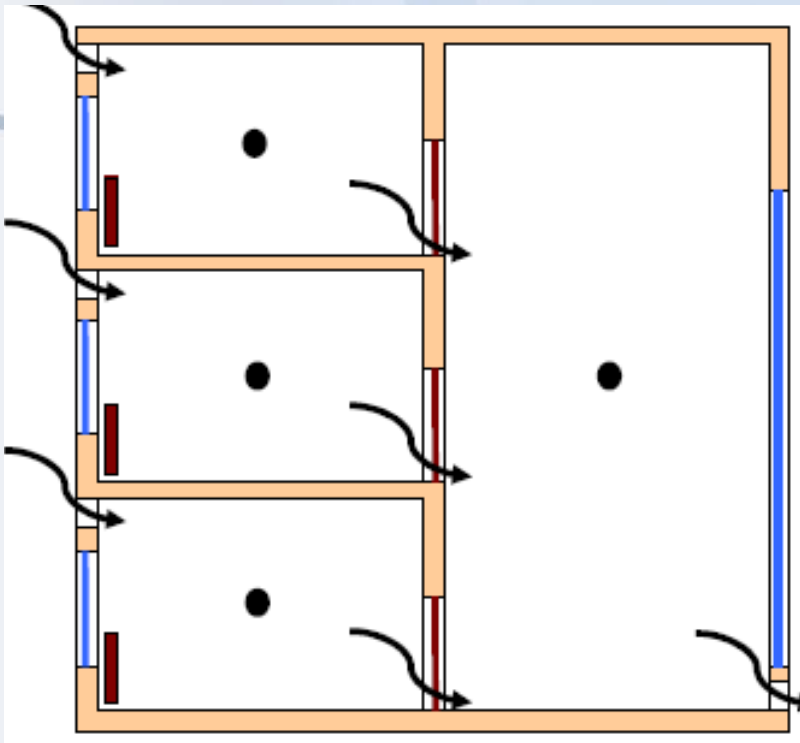
○ Synthèse

- ✓ Fonctionnement du principe de balayage
 - VMC double flux: bon
 - VMC simple flux: moins bon
 - Ventilation naturelles: médiocre
- ✗ perturbations: vent, tirage thermique
- ✗ balayage inexistant avec l'ouverture des portes intérieures
- ✗ Efficacité proche de 1 pour la ventilation mécanique:
hypothèse du mélange parfait validé 
- ✓ Réserves
 - Résultats spécifiques à MARIA
 - essais réalisés en période chaude (où le potentiel de la ventilation naturelle est minime): tests complémentaires à effectuer en période hivernale

Développement d'un modèle thermo-aéraulique et multizone de bâtiment

○ Principe : méthode multizone (nodale)

- subdivision du bâtiment en zones
- 1 nœud par variable d'état: température, concentration, pression de référence
- mélange parfait instantané



Modélisation adaptée : taille du bâtiment, étude sur de longues périodes, précision recherchée

- environnement Matlab/Simulink
- existant:
modèle thermique SIMBAD
composants aérauliques de ventilation hybride

Modèles: Distribution de pression

Masse volumique de l'air

$$\rho = \left(\frac{\rho_0 T_0}{T} \right) \times \frac{P}{P_0} \times \frac{1 + \omega}{1 + \frac{M_a}{M_v} \times \omega}$$

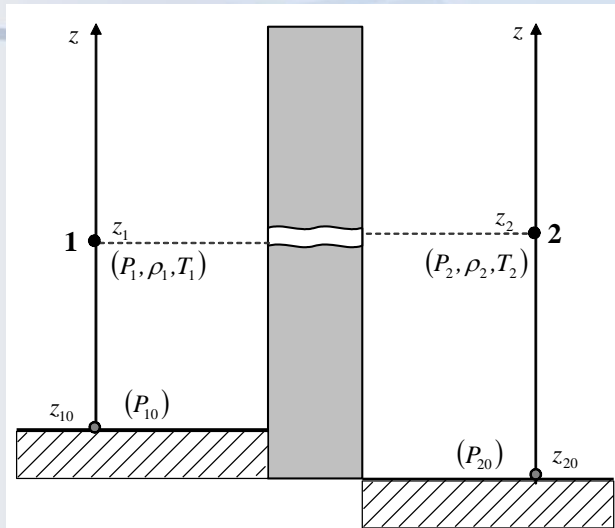
Pression intérieure

$$p_i = p_{i,0} - \rho_i \times g \times z_i$$

Pression totale

$$\Delta p_{tot} = p_w + \Delta p_{th} - p_{i,0}$$

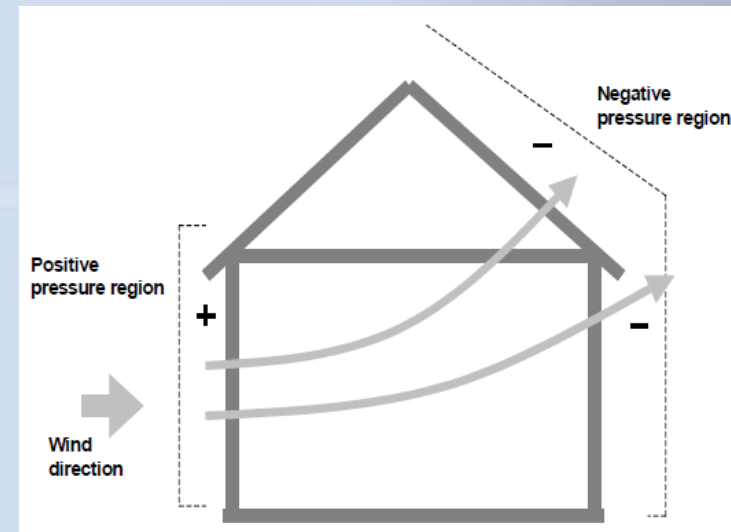
☒ Tirage thermique



$$\Delta p_{th} = -\rho_2 g(z_2 - z_{20}) + \rho_1 g(z_1 - z_{10})$$

☒ Effet du vent

$$p_w = C_p \times \frac{1}{2} \rho_{ext} U_w^2$$



Modèles

- Modèle de petites ouvertures

$$\dot{m} = \rho \times K \times \Delta p^n \quad \text{où} \quad \rho = \begin{cases} \rho_{\text{int}} & \text{si } \Delta p < 0 \\ \rho_{\text{ext}} & \text{si } \Delta p \geq 0 \end{cases}$$

n: régime de l'écoulement

K: géométrie, température d'air, viscosité

- Perméabilité à l'air

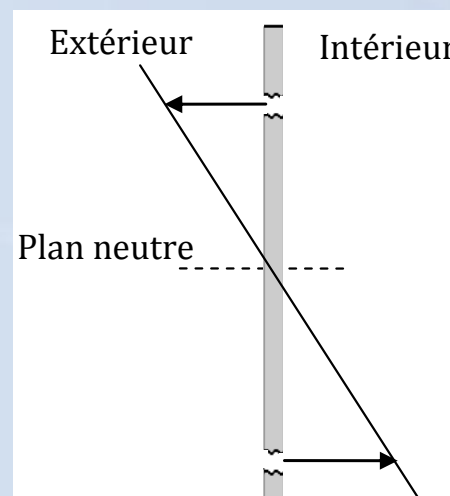
Défauts d'étanchéité des façades

Perméabilité entre zones

$$\dot{m} = \text{signe}(\Delta p) \times P_{\Delta p} \times A_{\text{façade}} \times \rho \left(\frac{|\Delta p|}{\Delta p_0} \right)^n$$

- Pour MARIA, $P_{\Delta p} = 0,9 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ déterminée expérimentalement

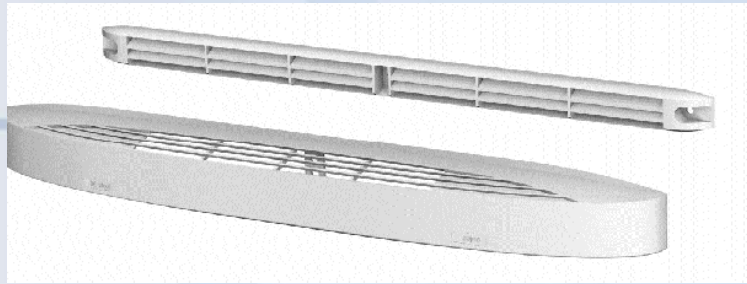
détalonnage des portes
entrées d'air fixes
bouches d'extraction fixes
bouches de soufflage



○ **Modèles:** Entrées d'air et bouches d'extraction autoréglables

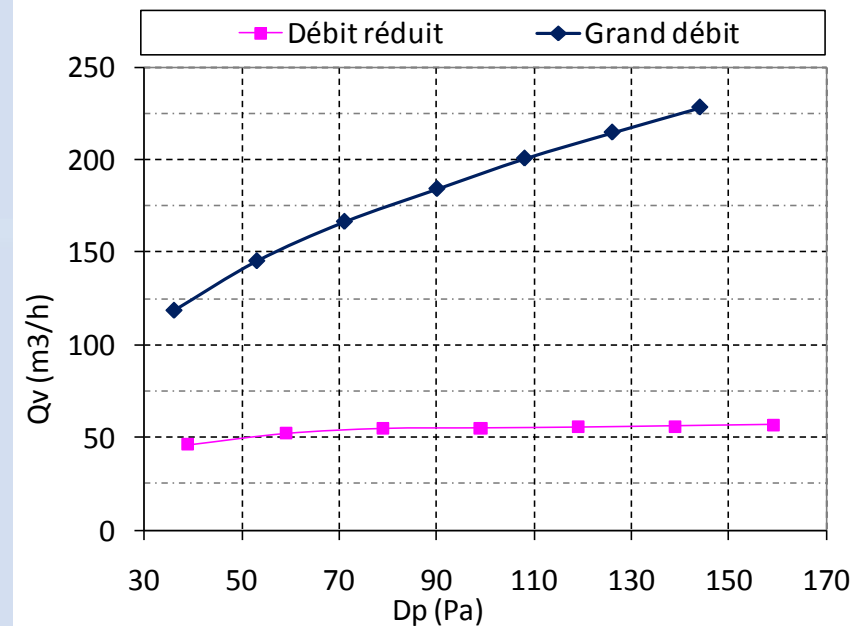
→ la section de passage se modifie automatiquement pour limiter les variations du débit d'air indépendamment des variations de différence de pression

→ Entrée d'air : limite les débits en présence de vent
protection contre courants d'air froid et bruit



$$\dot{m} = \begin{cases} -\frac{\rho_0 \cdot q_{v,inf}}{\sqrt{\Delta p_{inf}}} \sqrt{\frac{\rho_{int}}{\rho_0} |\Delta p|} & \text{si } \Delta p < 0 \\ +\frac{\rho_0 \cdot q_{v,inf}}{\sqrt{\Delta p_{inf}}} \sqrt{\frac{\rho_{ext}}{\rho_0} \Delta p} & \text{si } 0 \leq \Delta p < \Delta p_{inf} \\ +\sqrt{\rho_0 \rho_{ext}} [a \cdot \Delta p + b] & \text{si } \Delta p_{inf} \leq \Delta p \leq \Delta p_{sup} \\ +\frac{\rho_0 \cdot q_{v,sup}}{\sqrt{\Delta p_{sup}}} \sqrt{\frac{\rho_{ext}}{\rho_0} \Delta p} & \text{si } \Delta p_{sup} < \Delta p \end{cases}$$

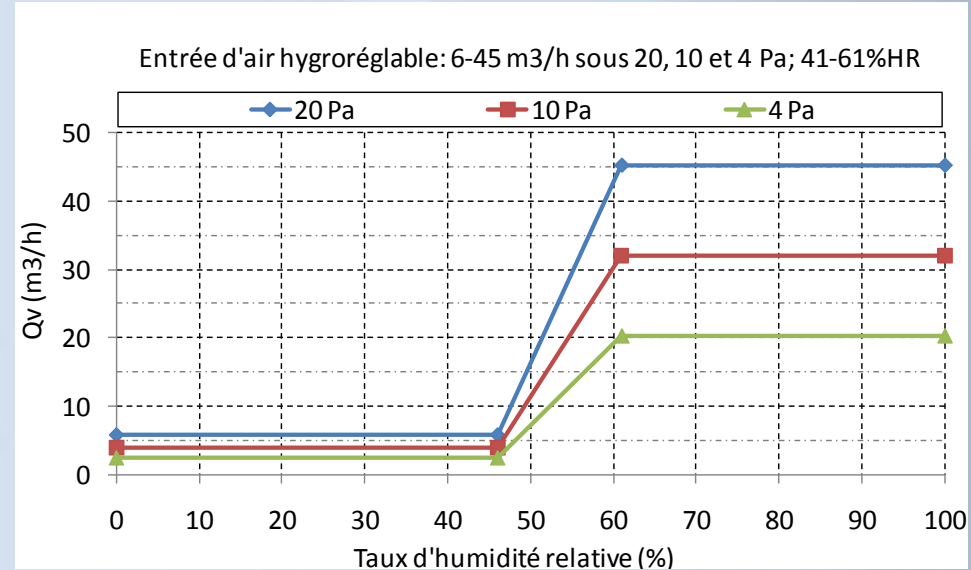
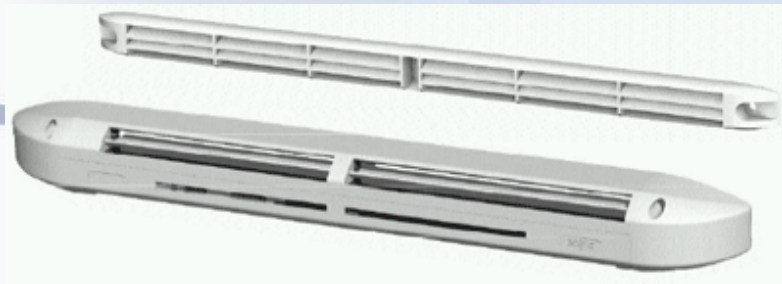
Bouche d'extraction autoréglable 45/135 m³/h sous 50-150 Pa



Modèles: Entrées d'air et bouches d'extraction hygroréglables

→ Débit variable en fonction du taux d'humidité relative « vue » par la bouche

→ Réduction des débits d'air



$$\dot{m} = \text{signe}(\Delta p) \times C_k \times \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}} |\Delta p|$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \bullet \text{HR} < \text{HR}_{\text{inf}} \Rightarrow C_k = \frac{\rho_0 \cdot q_{v,\text{inf}}}{\sqrt{\Delta p_0}} \\ \bullet \text{HR}_{\text{inf}} \leq \text{HR} \leq \text{HR}_{\text{sup}} \Rightarrow C_k = \frac{\rho_0}{\sqrt{\Delta p_0}} \left[q_{v,\text{inf}} + (q_{v,\text{sup}} - q_{v,\text{inf}}) \frac{\text{HR} - \text{HR}_{\text{inf}}}{\text{HR}_{\text{sup}} - \text{HR}_{\text{inf}}} \right] \\ \bullet \text{HR}_{\text{sup}} < \text{HR} \Rightarrow C_k = \frac{\rho_0 \cdot q_{v,\text{sup}}}{\sqrt{\Delta p_0}} \end{array} \right.$$

Modèles: Réseau de ventilation

→ Conduits

$$\Delta p_{\text{tot}} = \left(\lambda \frac{L}{D_H} + \sum_i \zeta_i \right) \times \frac{1}{2} \rho \left(\frac{\dot{m}}{\rho A} \right)^2$$

→ Ventilateurs

Pression totale

$$\Delta p_{\text{ventil}} = A_0 + A_1 \cdot \dot{m}_{\text{tot}} + A_2 \cdot \dot{m}_{\text{tot}}^2 + \dots$$

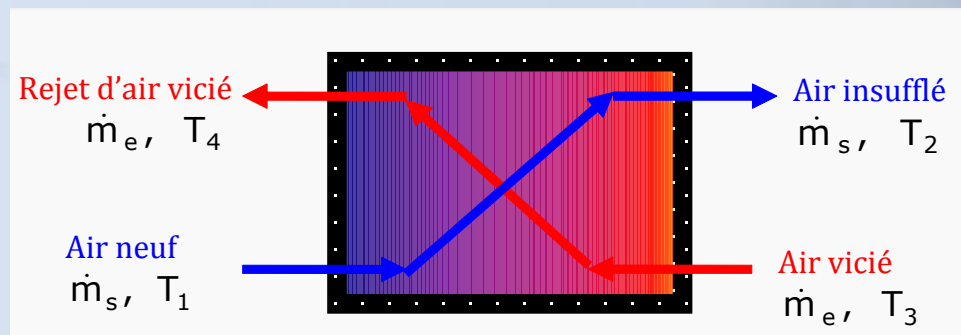
Puissance consommée

$$\dot{Q}_{\text{ventil}} = \frac{\dot{m}_{\text{tot}} \times \Delta p_{\text{ventil}}}{\rho \times \eta_{\text{tot}}}$$

→ Echangeur de chaleur

$$\varepsilon_{\text{ech}} = \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_1} \times \frac{\dot{m}_s}{\min(\dot{m}_s, \dot{m}_e)}$$

$$\Delta p_{\text{ech+filtre}} = \zeta_{\text{ech+filtre}} \times \frac{1}{2} \rho \left(\frac{\dot{m}}{\rho A} \right)^2$$



Modèles: Réseau de ventilation

VMC simple flux

EA Autoréglables 30 m³/h sous 20 Pa

BE 30, 15, 45/135 m³/h

Débit total extrait: 120/210 m³/h

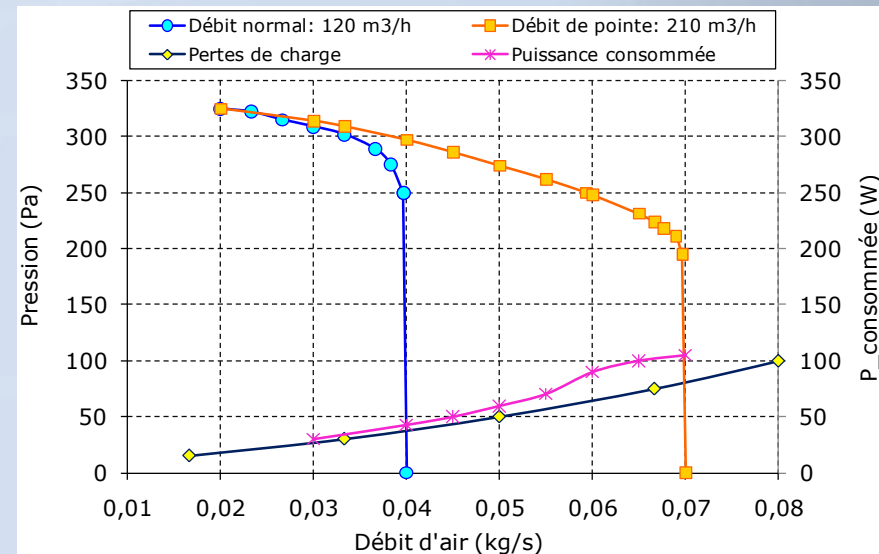
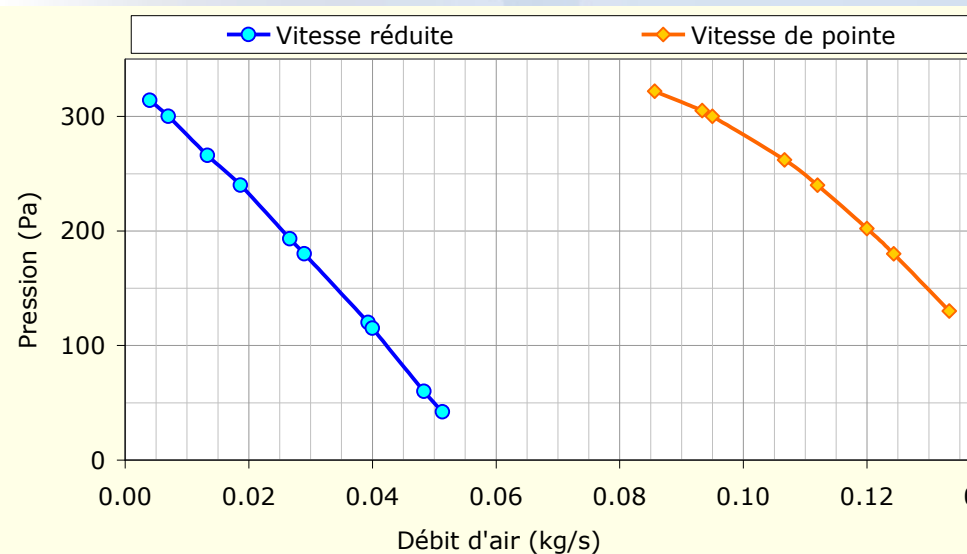
VMC double flux

Bouches de soufflage 20/35 m³/h

BE autoréglables 30, 15 et 45/135 m³/h

Débit total extrait: 120/210 m³/h

Débit total insufflé: 120/210 m³/h



Ventilation naturelle par conduits individuels

EA Autoréglables 30 m³/h sous 20 Pa

Grilles d'extraction 100 cm²; Conduits Φ 160 mm

Modèles: Réseau de ventilation

VMC simple Hygro A

EA Autoréglables 30 m³/h sous 20 Pa

Σ modules = 180 m³/h

VMC simple Hygro B

EA Hygroréglables 6-45 m³/h à 46-61%HR

Σ modules = 36-270 m³/h

Bouches d'extraction

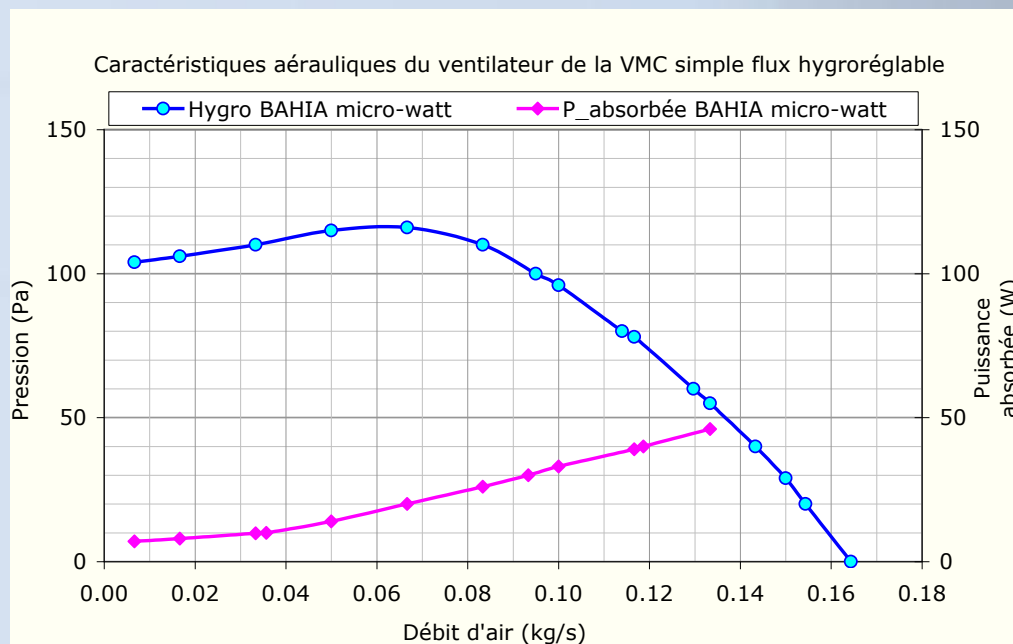
SDB/WC	Humidité	5-45 m ³ /h	29-69%HR
	Présence	30 m ³ /h	-

Douche	Humidité	5-45 m ³ /h	29-69%HR
--------	----------	------------------------	----------

Cuisine	Humidité	20-60 m ³ /h	29-69%HR
	mode pointe	135 m ³ /h	-

WC	Absence/présence	6/30 m ³ /h	-
----	------------------	------------------------	---

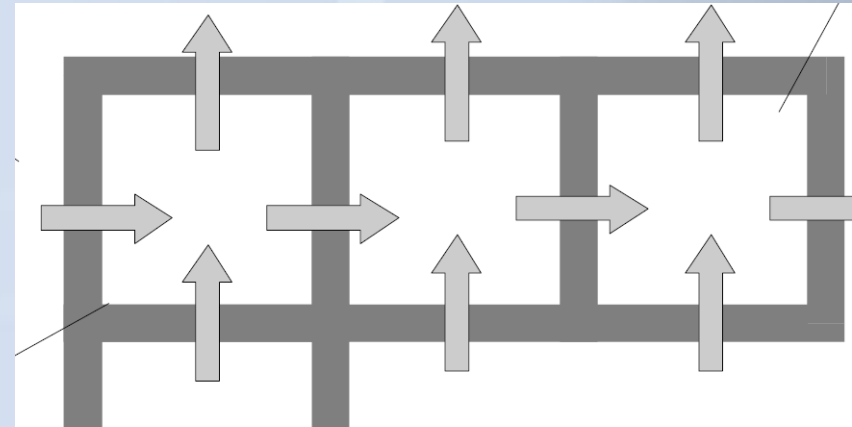
Débit total extrait: 36-180 m³/h



○ Résolution: Modèle aéraulique du bâtiment

- ☑ Bilan de conservation de la masse d'air par zone

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\sum_{j=0}^{Nz} \sum_{k=1}^{Nk(1,j)} \dot{m}_{j,1,k}(t) \right) - \left(\sum_{j=0}^{Nz} \sum_{k=1}^{Nk(1,j)} \dot{m}_{1,j,k}(t) \right) = 0 \\ \dots \\ \left(\sum_{j=0}^{Nz} \sum_{k=1}^{Nk(Nz,j)} \dot{m}_{j,Nz,k}(t) \right) - \left(\sum_{j=0}^{Nz} \sum_{k=1}^{Nk(Nz,j)} \dot{m}_{Nz,j,k}(t) \right) = 0 \end{array} \right.$$



→ $\dot{m}_{j,1,k} = f(\Delta p^n)$

→ Système de Nz équations non linéaires à Nz inconnues: les **pressions de références** $p_{i,0}$

→ méthode de Newton-Raphson

$$P_k = P_{k-1} - \frac{f(P_{k-1})}{J(P_{k-1})}$$

⇒ Matlab/Simulink: « Algebraic constraint »



○ Résolution: Couplage bâtiment-réseau



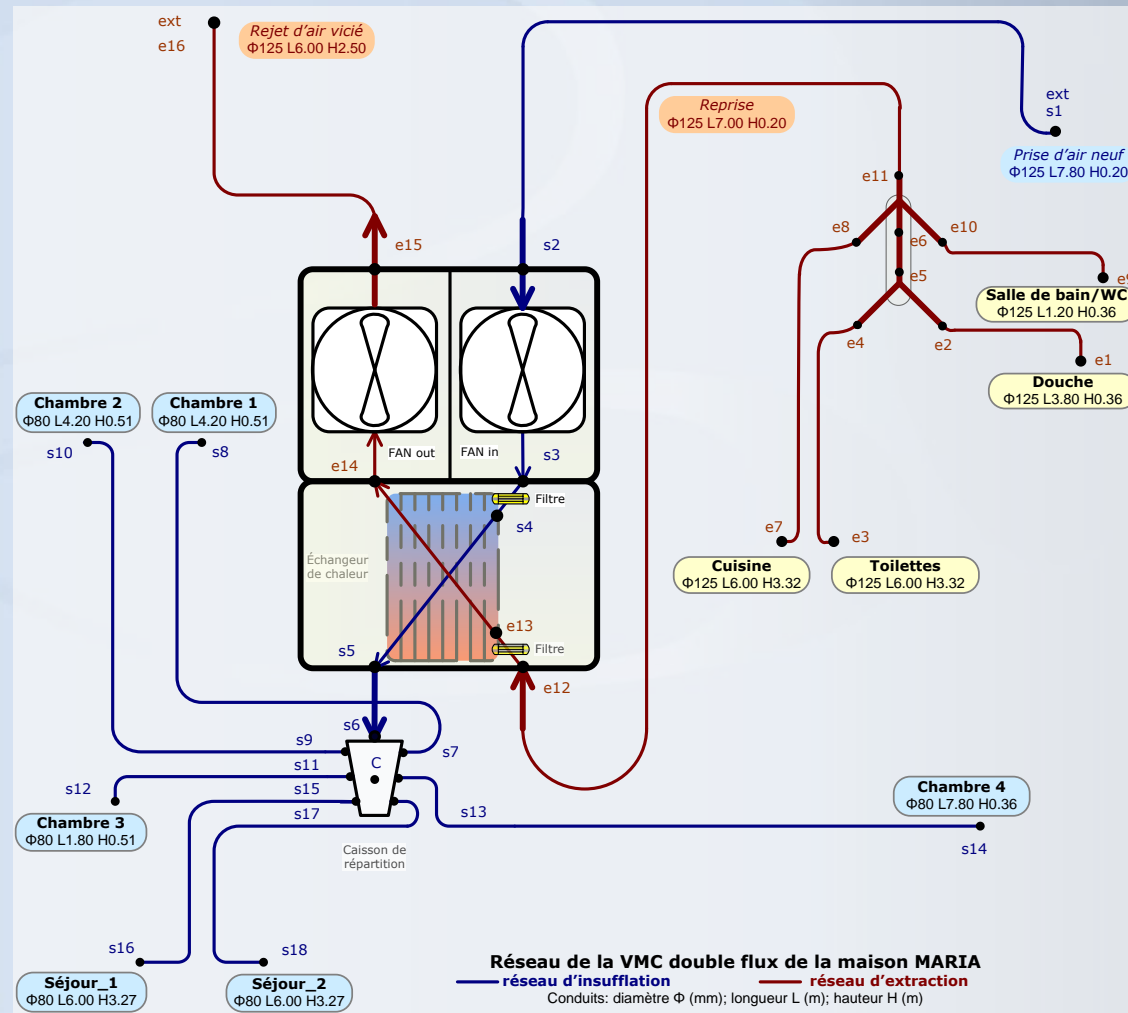
→ Principe de résolution :

déterminer p_B à partir de la pression extérieure (p_{ext}) et les pertes de charge

$$\Delta p_{totale} = \Delta p_1 + \dots + \Delta p_{Nk} = p_B - p_{ext}$$

→ Couplage avec le bâtiment à travers la pression à la bouche (p_B) et la pression intérieure (p_{int})

$$\dot{m}_B = \rho \times K \times (p_B - p_{int})^n$$



○ Résolution: Couplage thermo-aéraulique

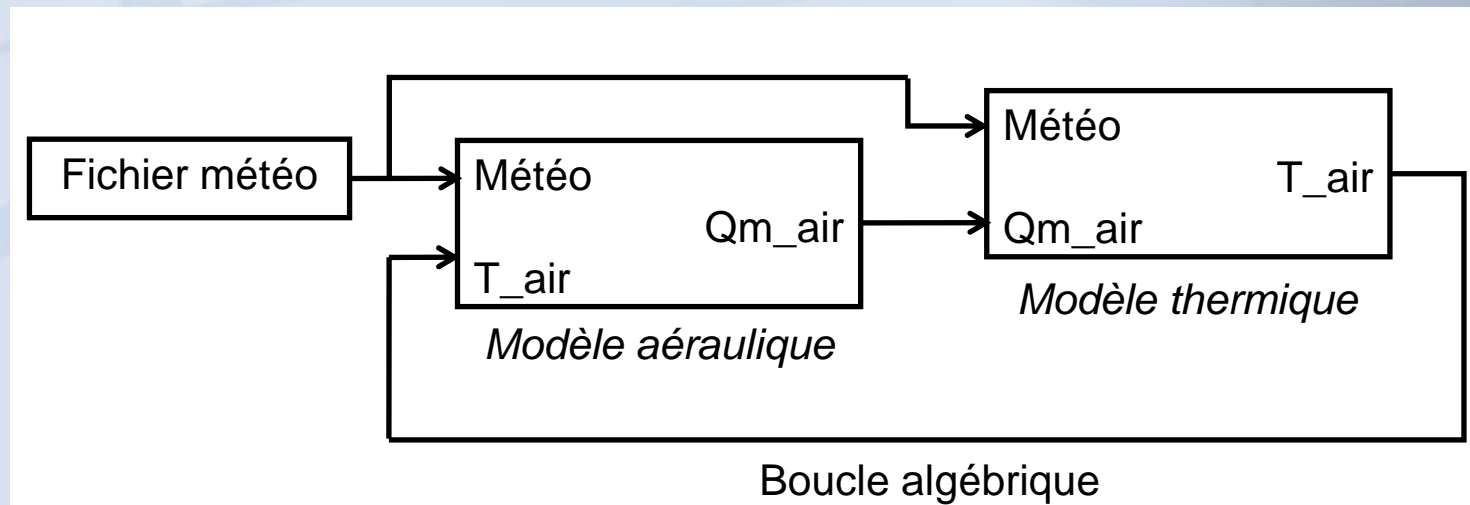
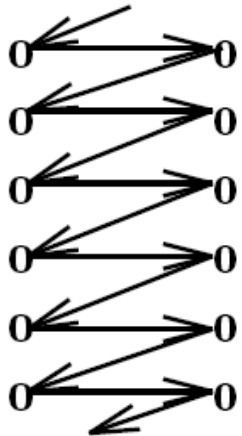
☑ Méthode découplée (ping-pong)

➔ Itérations séquentielles

➔ Chaque modèle utilise les résultats de l'autre u pas de temps précédent

ping-pong

flow thermal



○ Résolution: Transferts de polluants

- Métabolisme: H_2O , CO_2
- Activités (cuisson, douche, lessive): H_2O
- Activités: polluant spécifique à la cuisson (KP)
- Équipements: Alpha-pinène (C_5H_8)₂

- Conservation de la masse de polluant

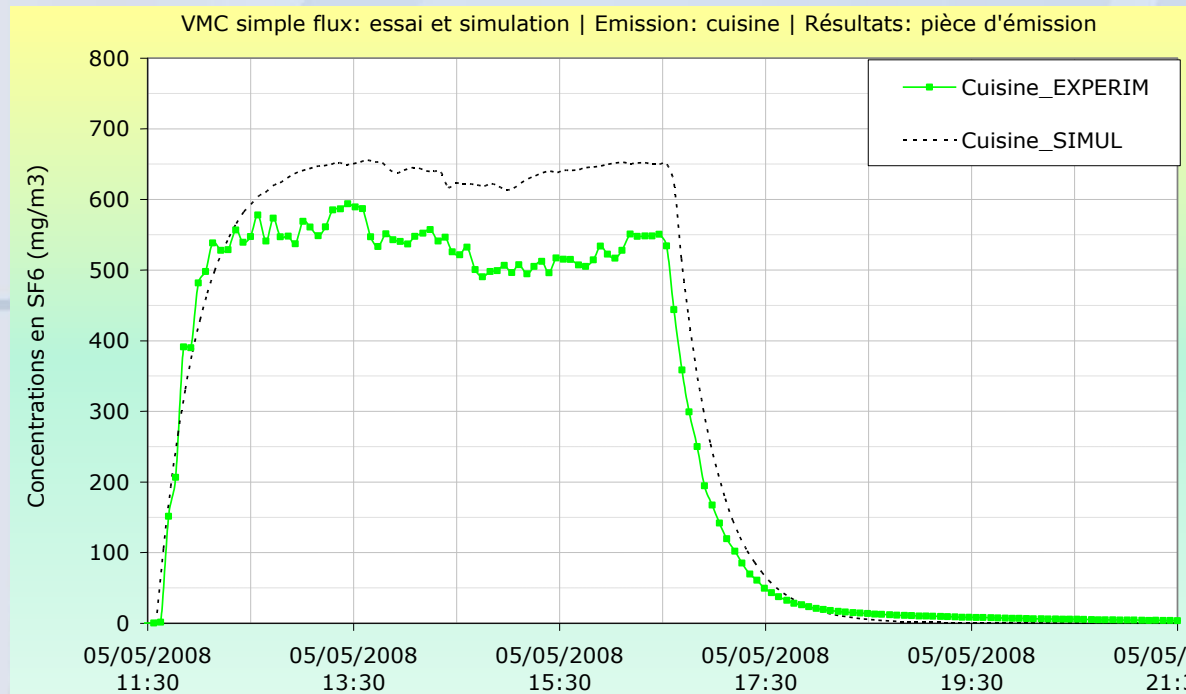
$$\underbrace{\frac{dm_i}{dt}}_{\text{Variation de la masse (kg/s)}} = \underbrace{S_i}_{\text{Production interne (kg/s)}} + \underbrace{\sum_{j=0}^{Nz} \sum_{k=1}^{Nk(j,i)} \dot{m}_{jik} \times \frac{(1 - \eta_{jik}) \times C_j}{\rho_j}}_{\text{Transport aéraulique (kg/s)}} - \underbrace{\sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^{Nk(i,j)} (\dot{m}_{ijk} + k_i) \times \frac{C_i}{\rho_i}}_{\text{réactivité}} - \underbrace{\varepsilon_C \times \dot{m}_{\text{extract}}}_{\text{Efficacité du système}}$$

Annotations:
 - η_{jik} : coefficient de filtration
 - k_i : réactivité
 - $\varepsilon_C \times \dot{m}_{\text{extract}}$: Efficacité du système

- Terme supplémentaire efficacité de la ventilation

○ Résultats:

- Ecart importants: surestimation des résultats numériques
- Dynamique des concentrations similaires entre le modèle et les essais

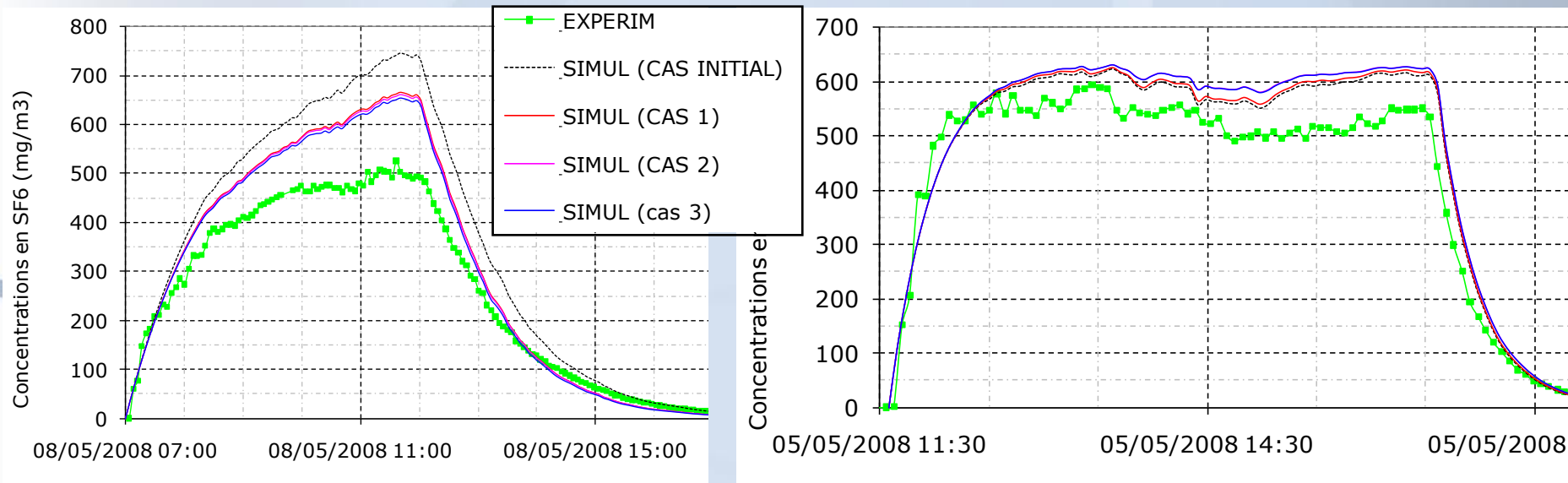


- ✓ Pas d'influence notable du débit de polluant
- ✓ Impact du C_p non négligeable, mais pas déterminant

○ Etude paramétrique: Influence de la perméabilité à l'air



→ Perméabilité à l'air (interne et externe): facteur déterminant



→ Représentation de MARIA, déterminer:

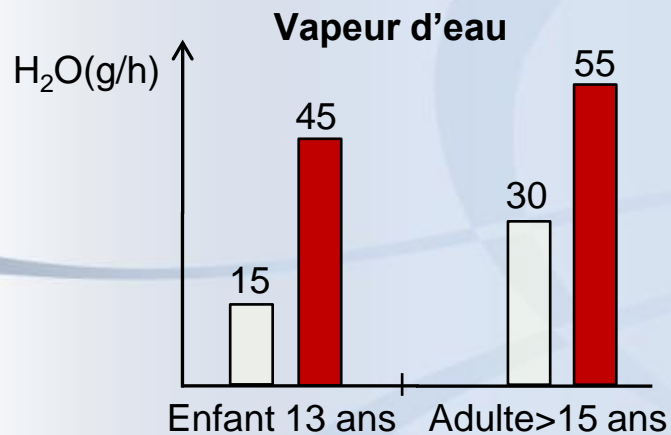
- les perméabilités entre pièces et
- la répartition de la perméabilité et les C_p par façade

→ Comparaisons numériques des stratégies de ventilation
- perméabilité globale et détalonnages mesurés

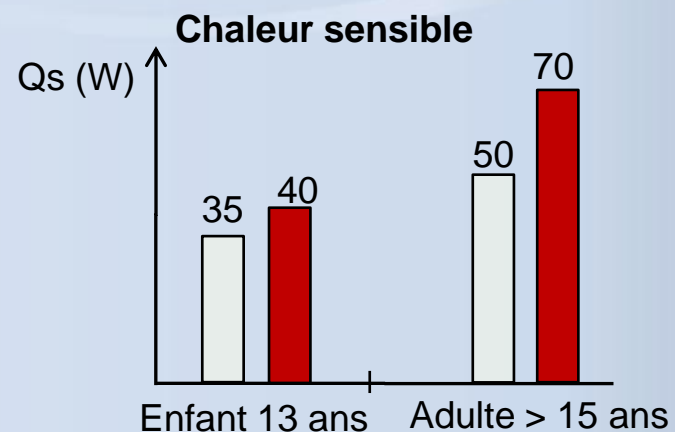
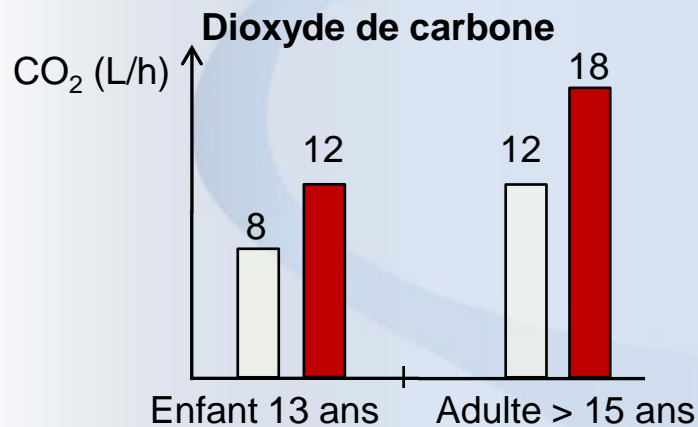
Comparaisons numériques des performances des stratégies de ventilation

Occupation et pollution

- Occupation : 2 adultes + 3 enfants de 19, 16 et 13 ans
- Métabolisme humain



- émission et de vapeur d'eau de CO_2 en fonction de l'âge et de l'activité (endormi ou **éveillé**)
- Émission de chaleur sensible en fonction de l'âge et de l'activité (endormi ou **éveillé**)



Occupation et pollution

→ Activités: productions dans la cuisine

☒ Vapeur d'eau lors de la cuisson des aliments

petit déjeuner	: 50 g/pers
déjeuner	: 150 g/pers
dîner	: 300 g/pers

☒ Polluant spécifique KP

1 g/h KP \equiv 2 g/h vapeur d'eau

→ Activités: Douche, 1 fois/jour/pers

Vapeur d'eau: 1800 g/h 10 min/pers

→ Activités: Lessive (SDB/WC), 1 fois/jour

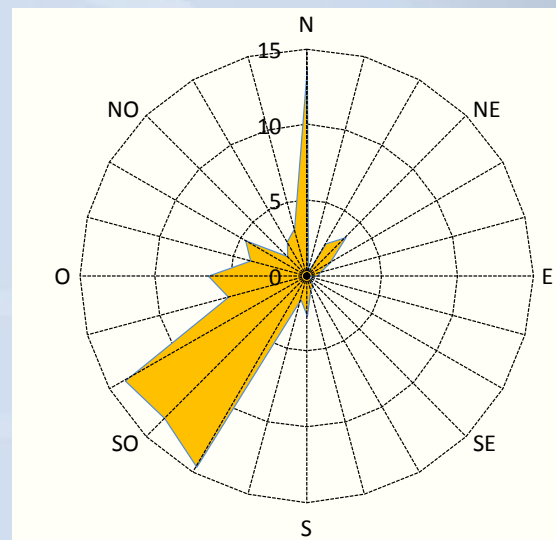
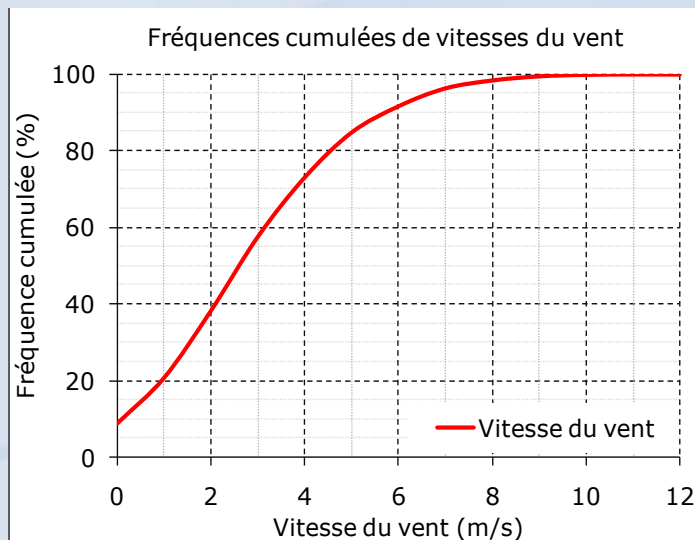
Vapeur d'eau:	200 g/lavage	8-10h
	1000 g/séchage	10-12h

→ Equipements

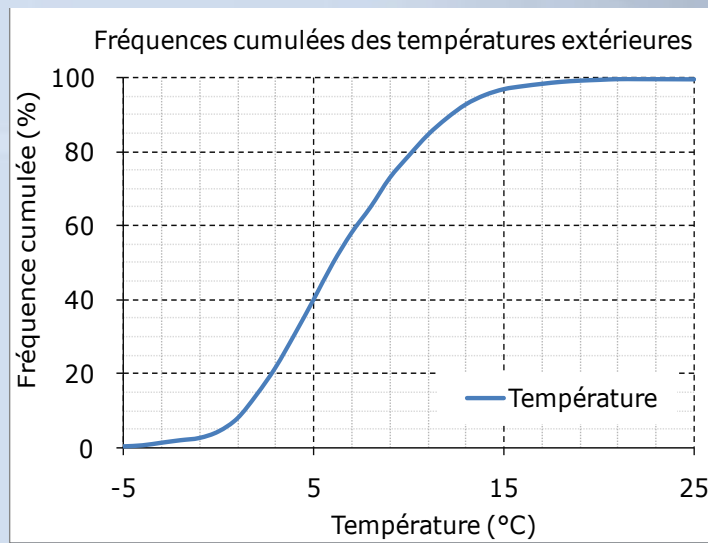
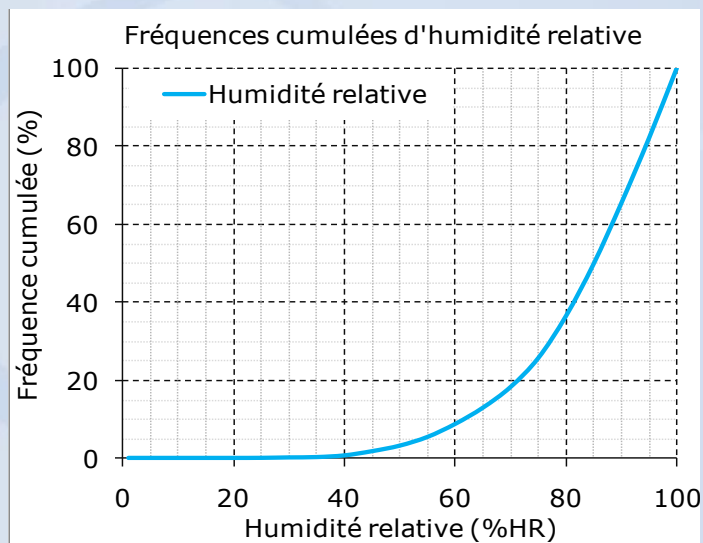
Alpha-pinène (C_5H_8)₂ émis d'un parquet de pin dans les chambres et séjour : S= 0,015 $\mu\text{g/s/m}^2$

Site météo: période de chauffe à Trappes

→ Vent: vitesse et direction



→ Air extérieur: température et humidité relative

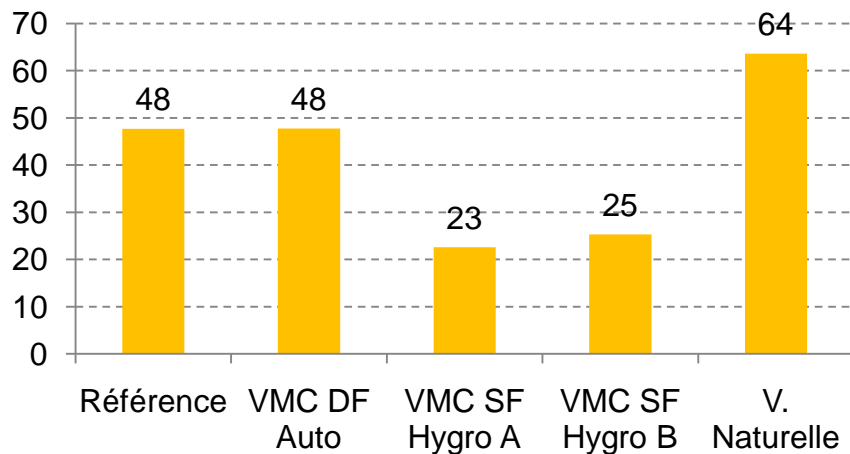


Performances aérauliques

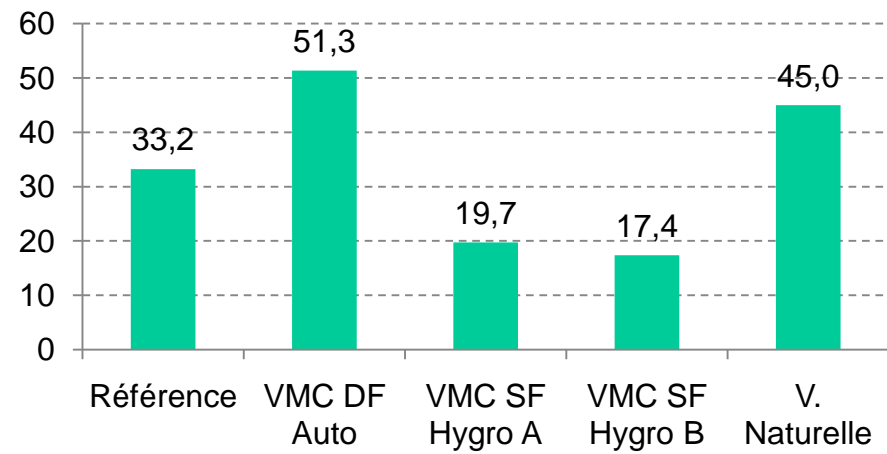
☑ Extraction d'air (pièces de service)

☑ Pièces principales

Débit moyen extrait (kg/s x 10³)



Débit moyen de renouv. d'air (kg/s x 10³)



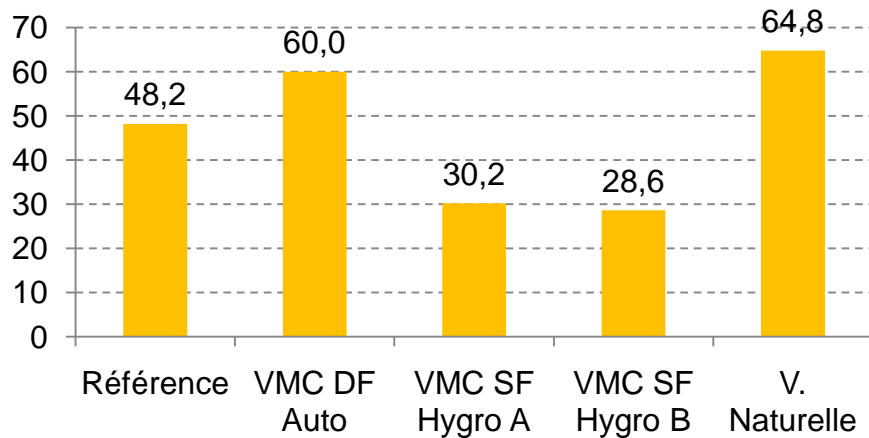
- Extraction d'air identiques entre VMC SF et VMC DF
- Hygro A et B: débits minimums
- Ventilation naturelle semble surdimensionnée

○ Performances aérauliques

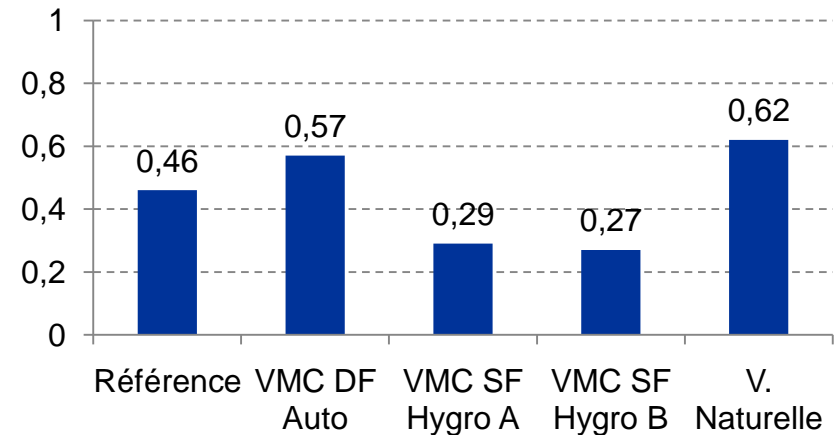


- ☑ MARIA globalement

Renouvellement d'air global (kg/s x 10³)



N_global (vol/h)



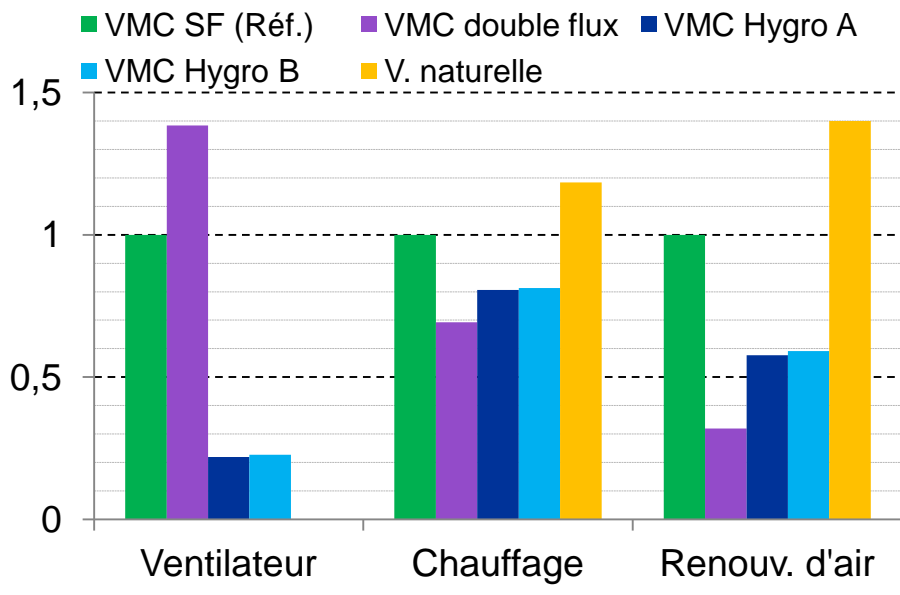
- ➔ Infiltrations et exfiltration avec la VMC double flux
- ➔ Ventilation naturelle surdimensionnée
- ➔ infiltrations plus importantes avec VNAT et la Référence

○ Consommations énergétiques

☑ Saison de chauffage

Système	Chauffage (kWh)	Renouv. d'air (kWh)	Ventilateur (kWh)
VMC SF (Réf.)	7417	3467	252
VMC double flux	5136	1107	348
VMC SF Hygro A	5982	1999	55
VMC SF Hygro B	6031	2050	57
Ventilation naturelle	8786	4854	-

Année complète : Ventilateur (kWh)
[396]
[548]
[87]
[90]
-



Consommations globales

☒ VMC SF (Réf.): 7669 kWh

☒ VMC double flux: - 28,5%

☒ VMC SF Hygro A: - 21,3%

☒ VMC SF Hygro B: - 20,6%

☒ Ventilation Nat : +14,6%

☒ VMC DF ($\epsilon_{ech}=70\%$): -19,9%

⇒ [7813 kWh]

⇒ [-27,2%]

⇒ [-22,3%]

⇒ [-21,7%]

⇒ - 18,8%

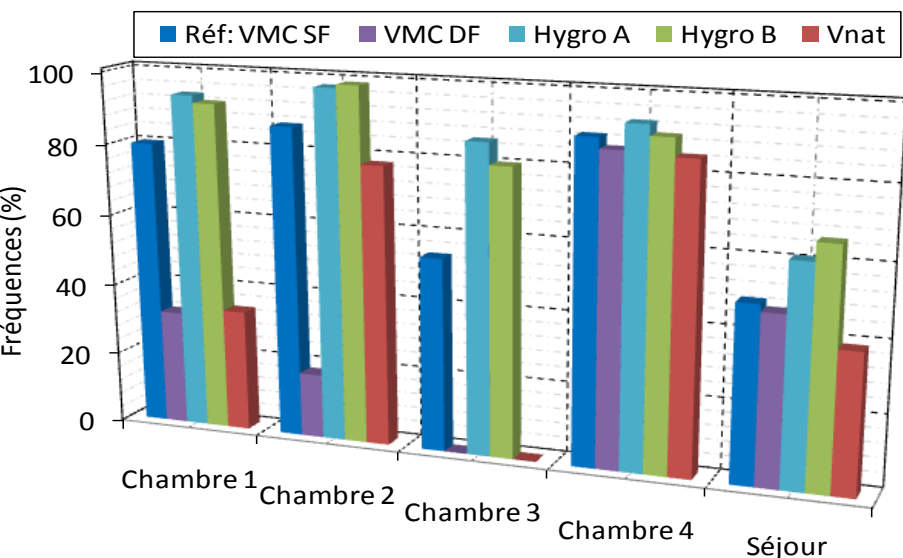
Exposition au CO₂ : Dépassement des valeurs seuils (pièces principales occupées)



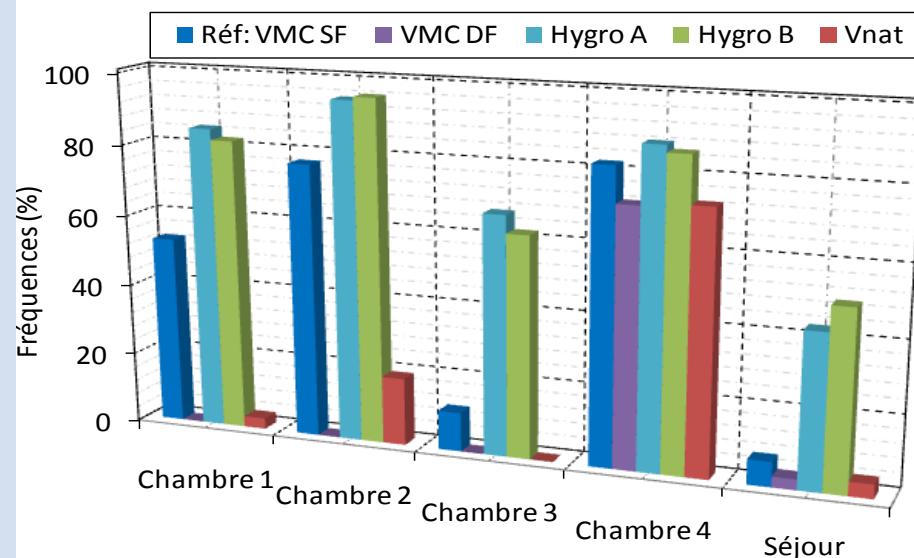
Confinement: 1830 mg/m³ (1000 ppm)

Confinement + tolérance: 2380 mg/m³

MARIA: Fréquences cumulées de dépassement de 1830 mg/m³



MARIA: Fréquences cumulées de dépassement de 2380 mg/m³



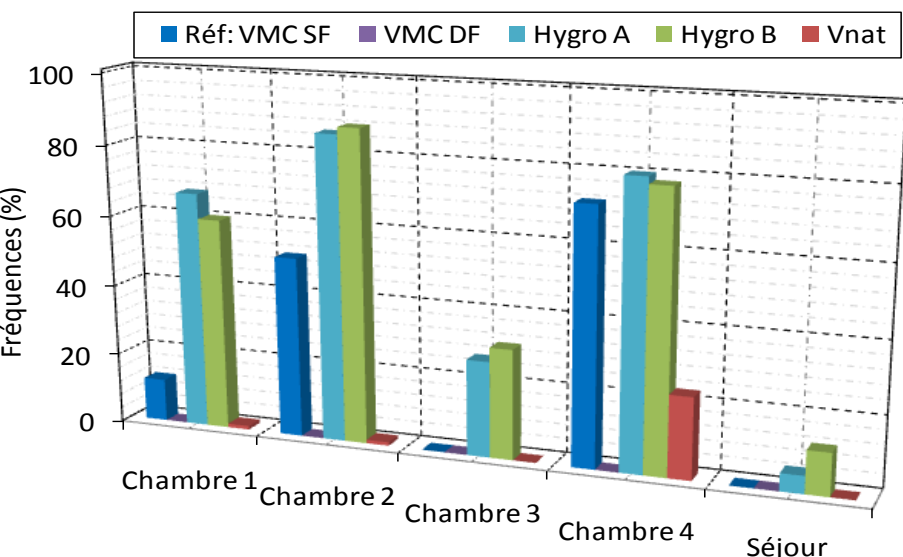
Exposition au CO₂ : Dépassement des valeurs seuils (pièces principales occupées)



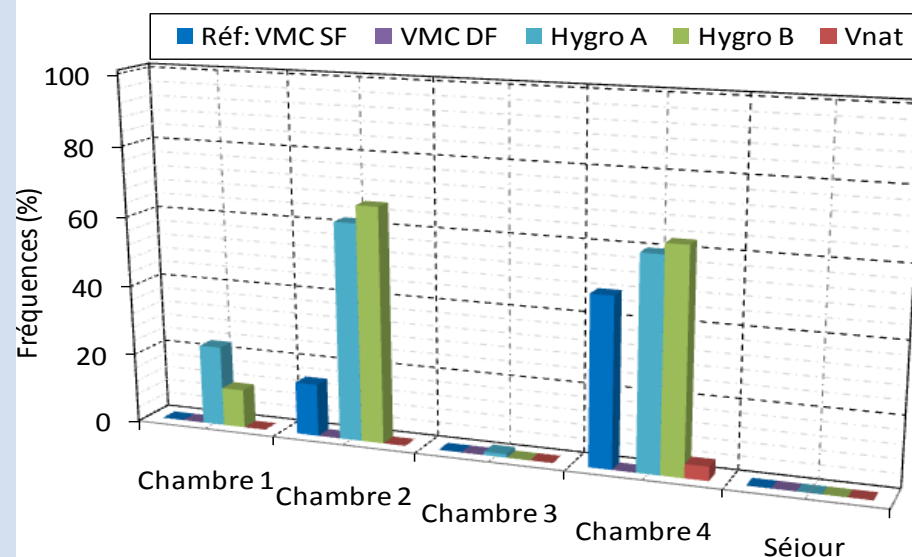
Base+ 2 x 700 ppm: 3200 mg/m³

Valeur à Risque Limité: 4500 mg/m³

MARIA: Fréquences cumulées de dépassement de 3200 mg/m³



MARIA: Fréquences cumulées de dépassement de 4500 mg/m³



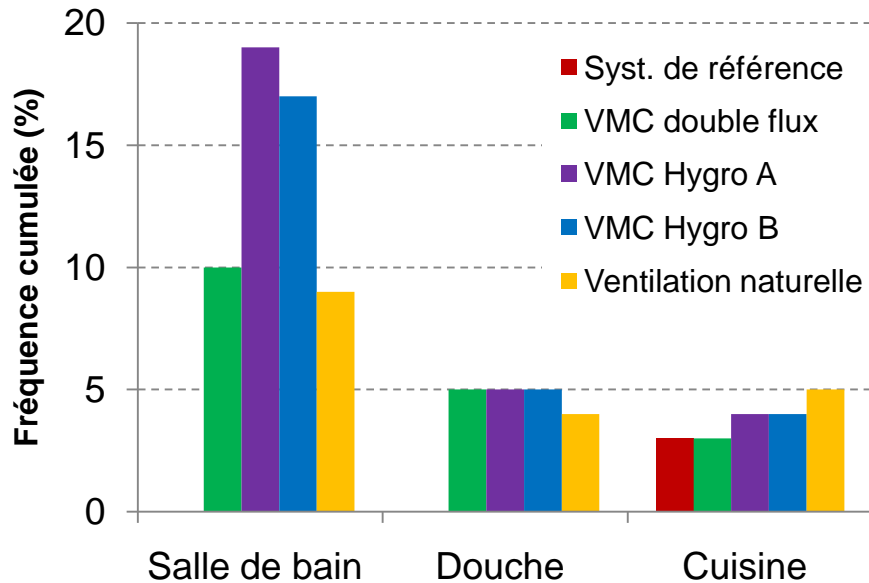
Meilleures performances pour la VMC double flux, puis la VNAT
QAI médiocre avec l'Hygro A et l'Hygro B

Qualité d'Air Intérieur: Humidité relative

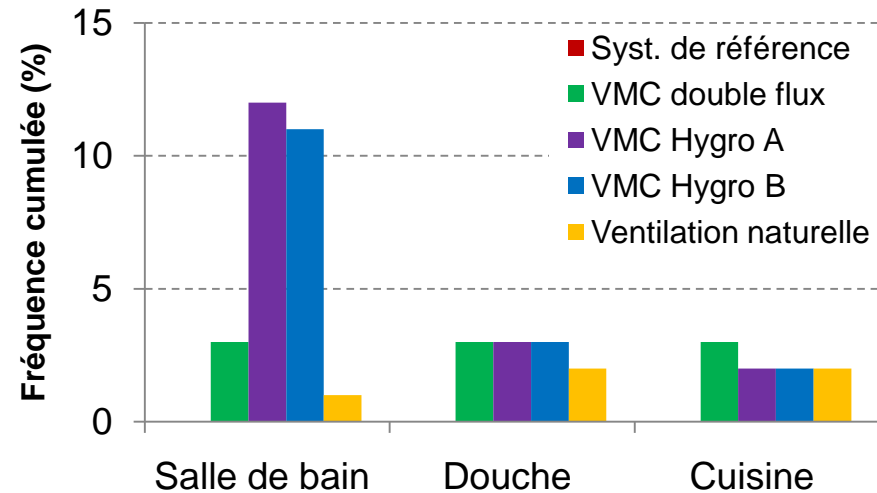
→ Pièces principales: HR < 60%

→ Pièces de service

Dépassement de 80% HR



Dépassement de 100% HR

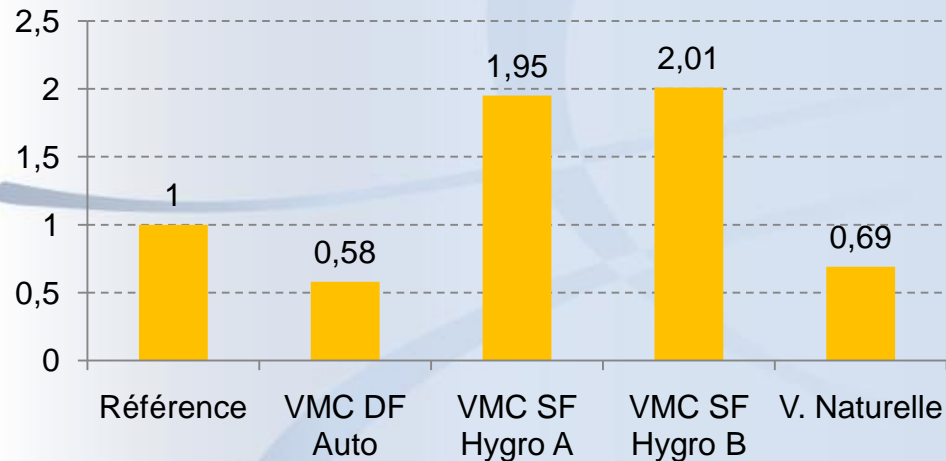


Qualité d'Air Intérieur: polluants spécifiques

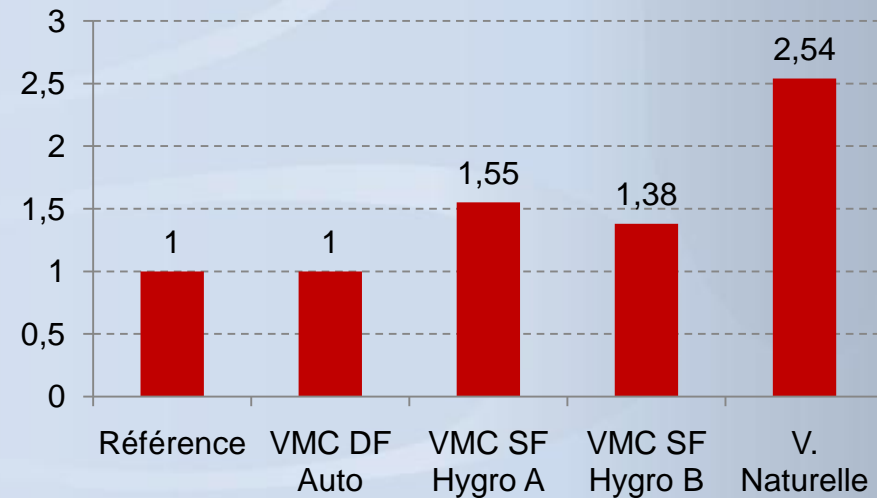
☑ Alpha-pinène (Pièces principales)

☑ KP (pièces de service)

Alpha pinène (C_{moy}/C_{Ref})



Polluant cuisine KP (C_{moy}/C_{Ref})



→ Accumulation avec la VMC Hygro A et B

→ VMC DF et Vnat performants

→ VNAT: mauvaise extraction

→ Concentrations nulles dans les pièces principales

Impact de l'efficacité de la ventilation

→ Polluant KP: concentrations doublées

Systèmes	Concentrations moyennes en KP (mg/m ³)		
	$\epsilon_c=1$	$\epsilon_c=1/2$	Rapport
Réf : VMC SF	298	626	0,48
VMC double flux	298	625	0,48
VMC Hygro A	463	1140	0,41

→ Humidité relative: augmentation des risques de condensation

Systèmes	Efficacité	Fréquences cumulées de dépassement de 80%HR (%)			Fréquences cumulées de dépassement de 100%HR (%)		
		SDB/WC	Douche	Cuisine	SDB/WC	Douche	Cuisine
Réf : VMC SF	$\epsilon_c=1$	0	0	3	0	0	0
	$\epsilon_c=1/2$	29	17	16	14	9	6
VMC double flux	$\epsilon_c=1$	10	5	3	3	3	3
	$\epsilon_c=1/2$	27	16	16	13	9	6
VMC Hygro A	$\epsilon_c=1$	19	5	4	12	3	2
	$\epsilon_c=1/2$	25	19	17	14	10	7

Conclusion et perspectives

○ Principaux résultats

- ✓ Expérimental
 - ✗ Bon fonctionnement du balayage avec la VMC double flux
 - ✗ Balayage moyen avec la VMC simple flux et médiocre avec la Vnat
 - Influence notable du vent
 - ✗ Ouverture des portes : balayage inhibé
- ✓ Numérique
 - ✗ Code: discriminations entre systèmes de ventilation
 - ✗ Meilleures performances pour la VMC double flux

○ Discussion

- ✓ Résultats spécifiques à la configuration de MARIA
- ✓ Études effectuées sur une période de chauffage

○ Perspectives

- ✓ Inclure les perméabilités réelles
- ✓ Pré-études paramétriques des systèmes de ventilation dans les constructions neuves
- ✓ Suivi des bâtiments existants (rénovation)

Merci pour votre attention !

Thank you for your attention !

Gracias por su atención !

○ Métrologie

☑ Injection : VIVO[®] Dosing



☑ Concentrations: analyseur multigaz Brüel&Kjaer[®]



☑ Débits d'air: Swemaflow[®],
anémomètre à fil chaud + cône

☑ Vitesses et températures dans les gaines: micro-
moulinets, thermocouples

☑ Température et humidité de l'air intérieur,
météo (station CSTB)



○ Résultats: Efficacité des systèmes de ventilation

☑ Efficacité des systèmes

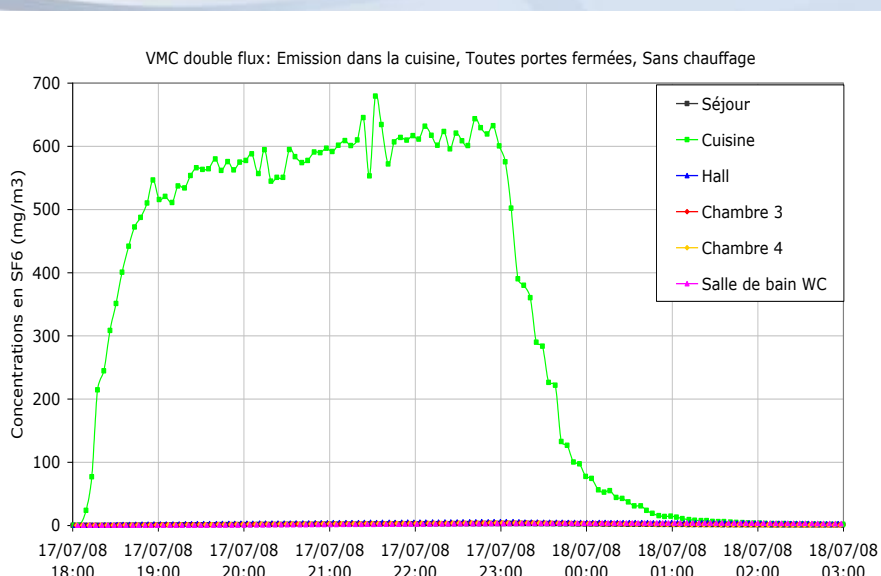
Système	Pièce	N(vol/h)	Q _v (m ³ /h)	ε _C
VMC Simple flux	SDB/WC	1,60	29	1,029
	Cuisine	2,28	61	0,951
VMC double flux	Cuisine	1,94	52	1,006

→ Efficacité proche de 1: hypothèse du mélange parfait validé

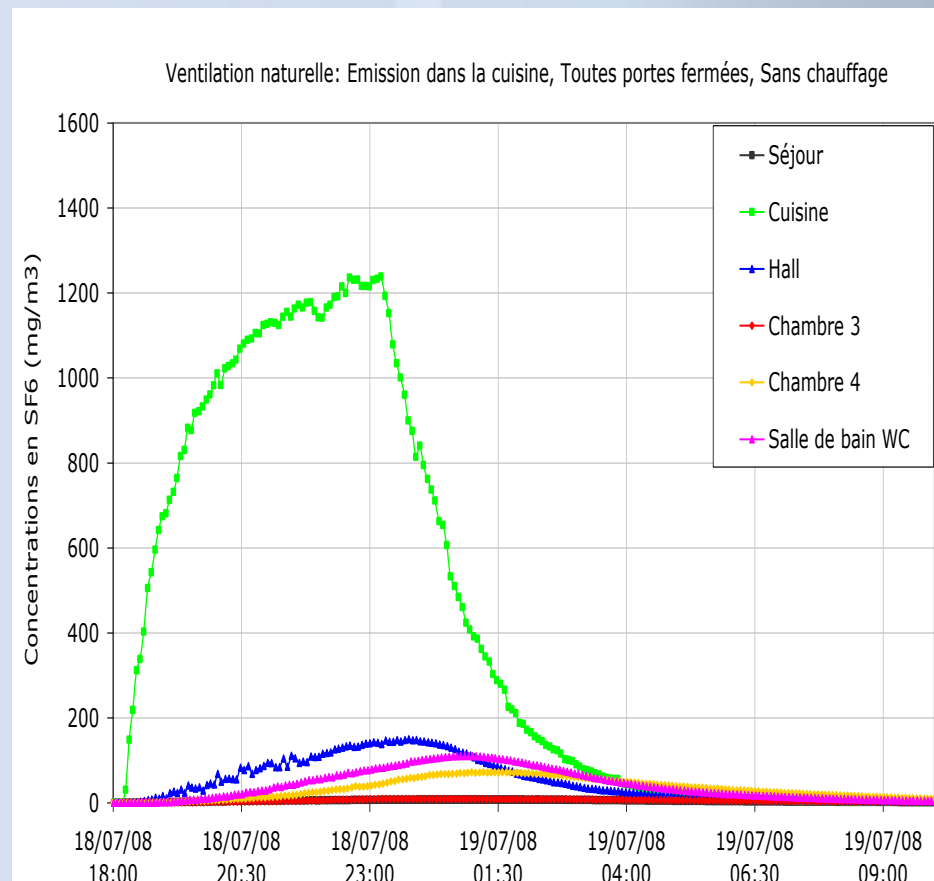


○ Résultats: portes fermées (émission cuisine)

- ➔ **Ventilation mécanique:** bonne extraction, transferts quasi-inexistants
- ➔ **Ventilation naturelle:** accumulation dans la cuisine, pollution relative du logement

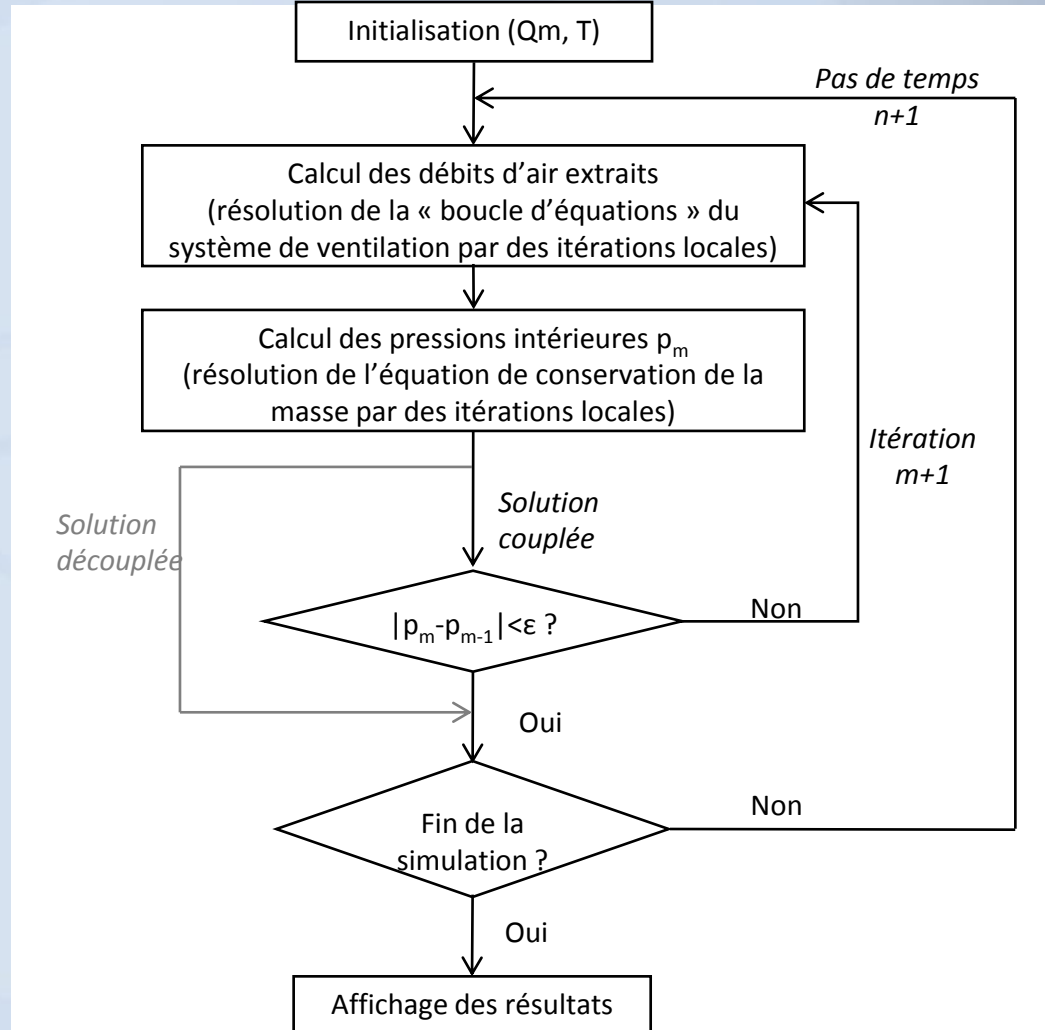
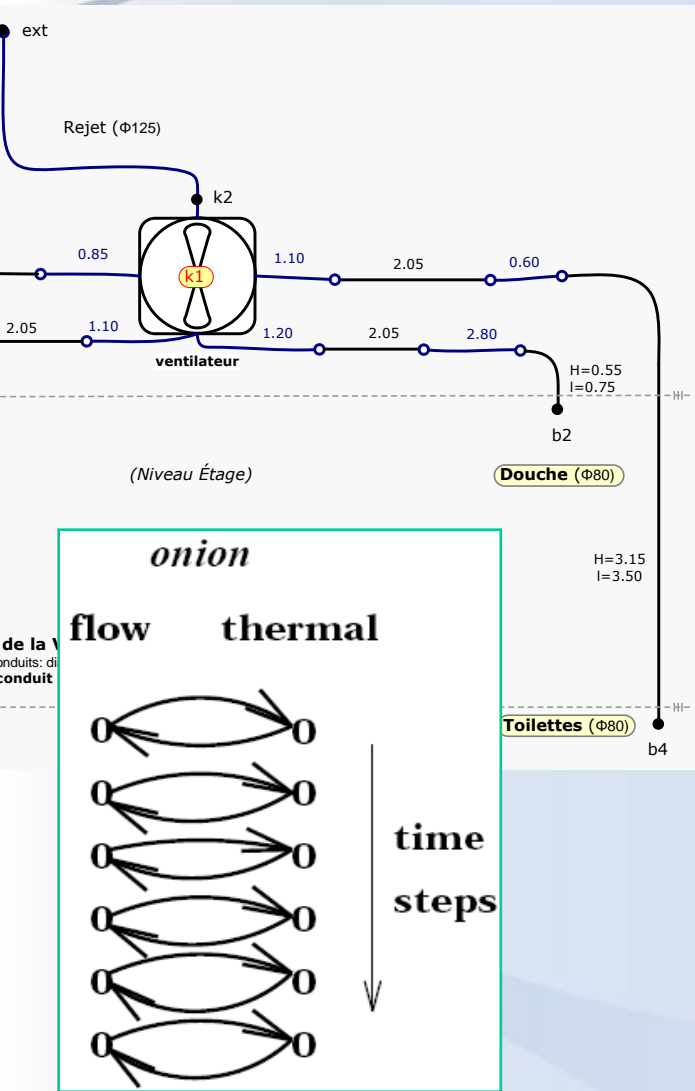


VMC double flux, cuisine

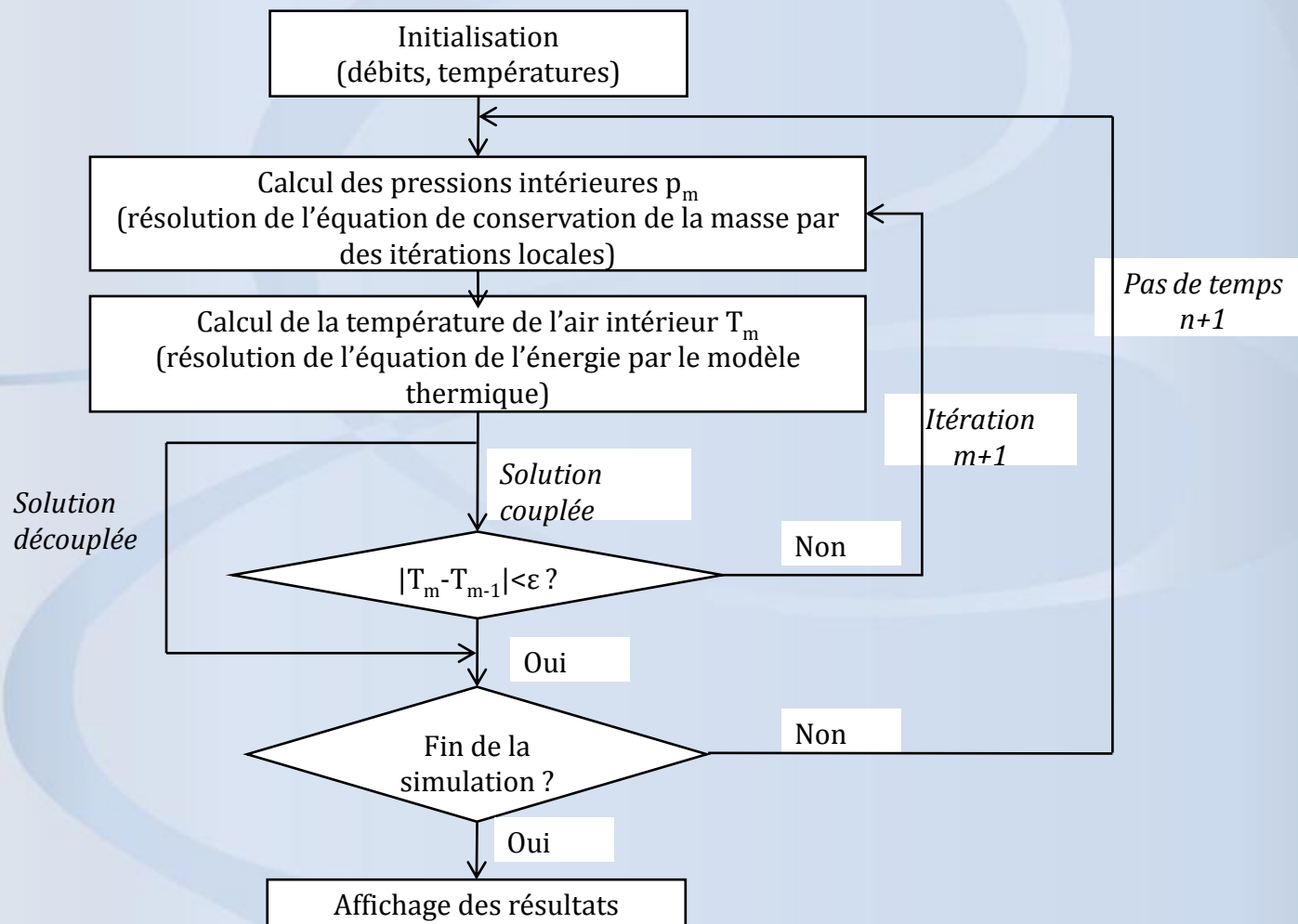


Ventilation naturelle, cuisine

○ Résolution: Couplage bâtiment-réseau



○ Résolution: Couplage thermo-aéraulique



○ Résolution: Algebraic constraint

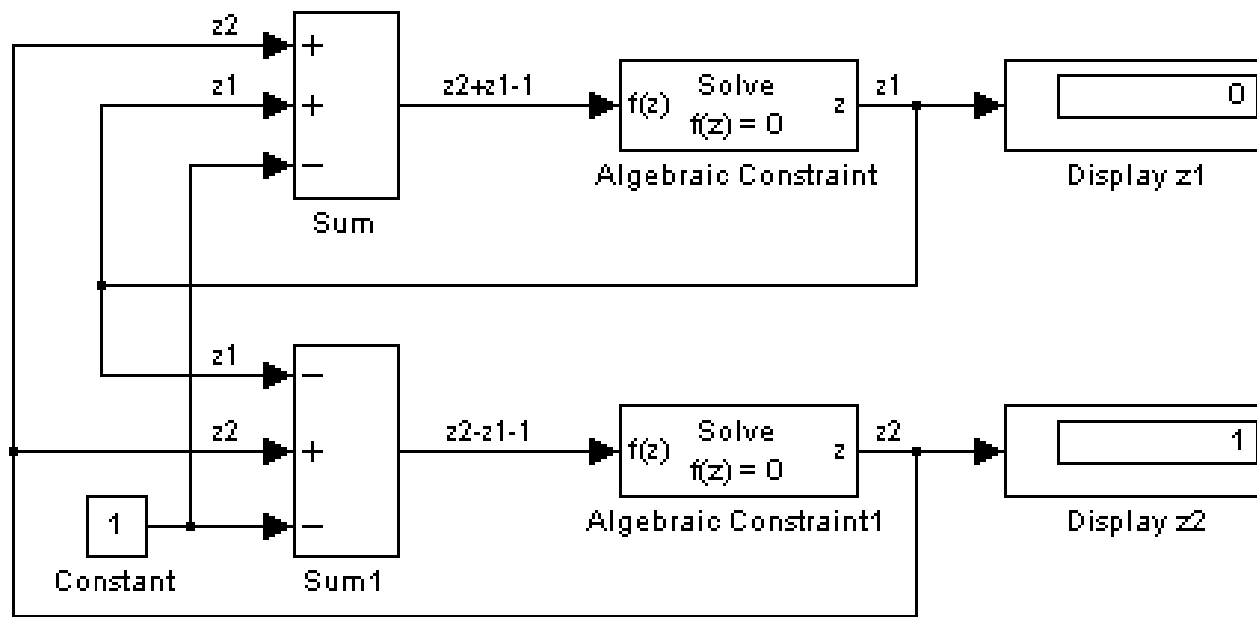


For example, the following model solves these equations.

$$z_2 + z_1 = 1$$

$$z_2 - z_1 = 1$$

The solution is $z_2 = 1$, $z_1 = 0$, as the Display blocks show.



○ Etude paramétrique: Influence de la perméabilité à l'air



→ Variation du détalonnage sous les portes intérieures

Pièce n°1	Pièce n°2	Dét_initial (cm)	Dét_1 (cm)
Pièces de service	Hall	2,0	2,0
Chambres	Hall	1,0	1,5
Séjour	Hall	1,0	1,75
Séjour	Cuisine	1,0	1,5

→ Répartition hétérogène de la perméabilité à l'air globale

Pièce	Perméabilité à l'air de la façade $P_{4\text{ zone}}$ (m ³ /h/m ²)			
	Cas initial	Cas n°1	Cas n°2	Cas n°3
Chambres	0,9	0,99	1,035	1,035
Séjour	0,9	1,305	1,35	1,395
Cuisine	0,9	0,7	0,5	0,5
Salle de bain, Douche, WC	0,9	0,2	0,2	0,1
Hall	0,9	0,2	0,2	0,2
Sous-sol	0,9	0,9	0,9	0,9
$Q_{\text{tot, 4 Pa}}$ (m ³ /h)	151	150	151	151

○ Qualité d'Air Intérieur: Exposition au CO₂



- ☑ Indices de QAI (pièces principales)

		Indice normalisé de QAI pour le en CO ₂					
		Ch 1	Ch 2	Ch 3	Ch 4	Séjour	MARIA
Réf : VMC simple flux	<i>C_inoc (mg/m³)</i>	1034	1483	922	1424	932	1081
	<i>C_moy (mg/m³)</i>	1757	2442	1345	2282	1247	1630
	Index_ref	1,70	1,65	1,46	1,60	1,34	1,51
VMC double flux	Index_nom	0,95	0,91	0,78	0,94	0,78	0,95
VMC Hygro A	Index_nom	0,81	0,73	0,73	0,75	0,76	0,85
VMC Hygro B	Index_nom	0,88	0,75	0,78	0,81	0,73	0,87
V. naturelle	Index_nom	0,89	0,86	0,75	0,90	0,80	0,93

○ Scénarios d'étude: occupation



- ➔ Occupation de MARIA: 2 adultes + 3 enfants de 19, 16 et 13 ans
– Pièces principales + Cuisine

	Occupant	Cuisine	Séjour	Chambre 1	Chambre 2	Chambre 3	Chambre 4
Jours ouvrés	Homme		6:00-7:00 18:00-23:00				23:00-6:00 <i>dort 23:00-6:00</i>
	Femme	7:00-8:00 17:00-18:00	6:00-7:00 18:00-23:00				23:00-6:00 <i>dort 23:00-6:00</i>
	Enfant 19		7:00-8:00 18:00-19:00	19:00-7:00 <i>dort 23:00-7:00</i>			
	Enfant 16		7:00-8:00 18:00-20:00		17:00-18:00 20:00-7:00 <i>dort 22:00-7:00</i>		
	Enfant 13		7:00-8:00 18:00-21:00			17:00-18:00 21:00-7:00 <i>dort 22:00-7:00</i>	

– Pièces de service

	Occupant	WC (SDB/WC)	Bain (SDB/WC)	Douche	WC
Jours ouvrés	Homme	6:00 – 6:10	6:10 – 6:20		
	Femme	6:30 – 6:40	6:40 – 6:50		
	Enfant 19			7:10 – 7:20	7:00 – 7:10
	Enfant 16			7:25 – 7:35	7:15 – 7:25
	Enfant 13			7:40 – 7:50	7:30 – 7:40

○ Performances aérauliques



Système	Débit moyen d'air infiltré (kg/s x 10 ³) = PERMEA									
	Pièces principales		Pièces de service		Sous-sol + Hall		MARIA		MARIA globale	
	Inf	Exf	Inf	Exf	Inf	Exf	Inf	Exf	Air neuf	N (Vol/h)
Réf.	19,68	-0,14	8,82	-0,02	6,40	-0,01	34,91	-0,17	48,19	0,46
VMC DF	4,02	-8,42	5,34	-0,84	3,23	-0,40	12,60	-9,67	60,01	0,57
Hygro A	11,58	-1,47	5,92	-0,16	7,47	0,00	24,97	-1,63	30,23	0,29
Hygro B	15,05	-0,90	7,16	-0,08	5,40	-0,03	27,61	-1,01	28,60	0,27
V. Nat	25,56	-0,02	11,44	0,00	7,75	0,00	44,75	-0,02	64,79	0,62

	Débit moyen d'air extrait (kg/s x 10 ³) = BE					MARIA globale	
	SDB/WC	Douche	Cuisine	Toilettes	Total	Extract + Exf	OUT/IN
Réf.	10,26	10,24	22,06	5,13	47,70	47,87	99,3%
VMC DF	10,27	10,27	22,07	5,14	47,76	57,42	95,7%
Hygro A	1,68	5,77	13,22	1,88	22,56	24,18	80,0%
Hygro B	1,90	6,47	14,82	2,12	25,32	26,33	92,1%
V. Nat	13,72	13,62	18,21	18,05	63,60	63,62	98,2%

Système	Débit d'air neuf moyen (kg/s x 10 ³) = EA + INF					
	Chambre 1	Chambre 2	Chambre 3	Chambre 4	Séjour	Total
Réf.	4,68	2,94	3,96	3,34	18,31	33,23
VMC DF	7,98	7,92	7,96	7,89	19,59	51,34
Hygro A	2,25	1,53	1,94	2,18	11,83	19,73
Hygro B	2,49	1,29	1,84	1,86	9,88	17,36
V. Nat	6,90	4,81	6,18	5,40	21,68	44,97