

# Mécanique des Fluides 1

Modélisation de la ventilation des bâtiments

**Laurent Mora**

Université de Bordeaux – IUT Génie Civil  
Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux (I2M)  
Département TREFLE – UMR 5295  
[laurent.mora@u-bordeaux1.fr](mailto:laurent.mora@u-bordeaux1.fr)

## Problématique

- Contexte : bâtiments à faible consommation énergétique
- Une attention particulière pour :
  - Les consommations liées au système de ventilation
  - L'étanchéité du bâtiment (infiltrations subies)

## [ Problématique ]

- Les consommations induites par le système de ventilation :
  - Apport d'air extérieur
  - Consommations électriques des ventilateurs
- Stratégies :
  - Limiter les débits en fonction des besoins (ex. contrôle de la qualité de l'air)
  - Récupérer l'énergie sur l'air extrait du bâtiment pour traiter l'air neuf
  - Avoir recours à la ventilation naturelle lorsque les conditions le permettent

laurent.mora@u-bordeaux1.fr

3

## [ Problématique ]

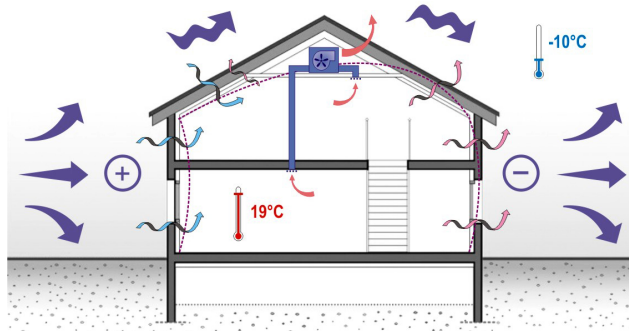
- L'étanchéité de l'enveloppe :
  - Apports d'air extérieur non maîtrisés
- Stratégies :
  - Défi technologique et méthodologique pour réaliser une peau étanche continue sur toute la surface de l'enveloppe
  - Des objectifs ambitieux : ex. pour le label BBC  
 $Q = 0,6 \text{ m}^3/\text{h}$  sous 4 Pa

laurent.mora@u-bordeaux1.fr

4

# Les moteurs de la ventilation

- Une combinaison de 3 facteurs



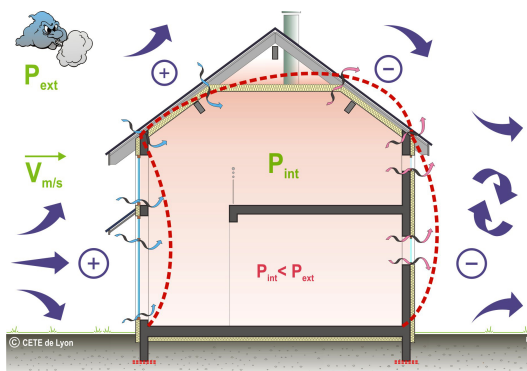
Croquis : R. Jobert, CETE de Lyon

laurent.mora@u-bordeaux1.fr

5

# Les moteurs de la ventilation

- La variation de pression due au vent



© CETE de Lyon

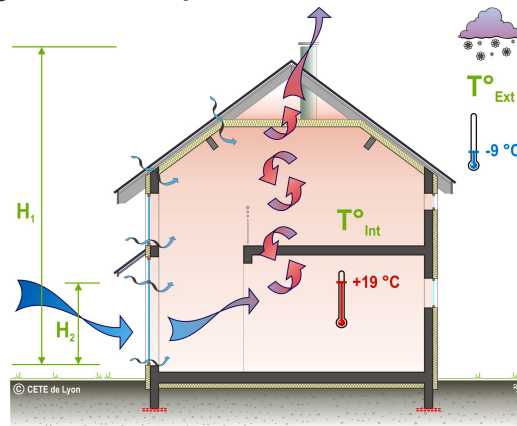
Croquis : R. Jobert, CETE de Lyon

laurent.mora@u-bordeaux1.fr

6

# Les moteurs de la ventilation

## Le tirage thermique

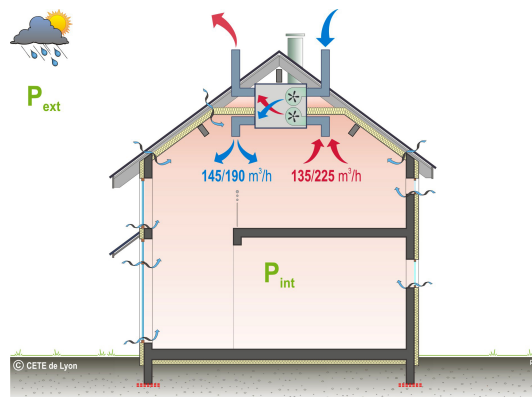


laurent.mora@u-bordeaux1.fr

7

# Les moteurs de la ventilation

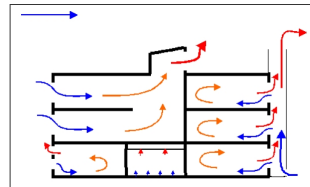
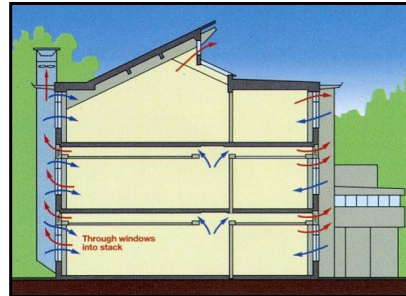
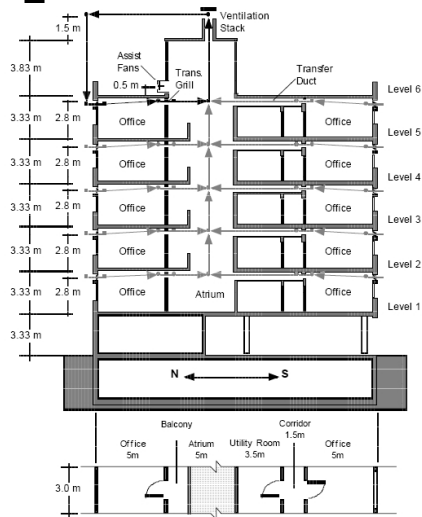
## La ventilation mécanique



laurent.mora@u-bordeaux1.fr

8

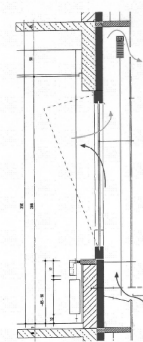
## Concepts de ventilation naturelle...



laurent.mora@u-bordeaux1.fr

9

## Concepts de ventilation naturelle...

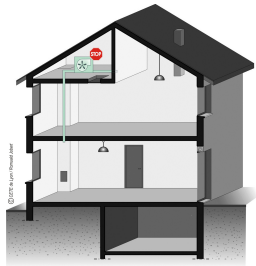


laurent.mora@u-bordeaux1.fr

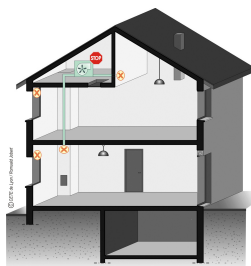
10

## Comment caractériser l'étanchéité à l'air d'un bâtiment existant

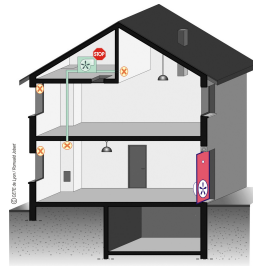
- Mode opératoire le plus courant : dépressurisation progressive du bâtiment



1. Arrêt de la ventilation



2. Obturation des entrées et sorties d'air volontaires



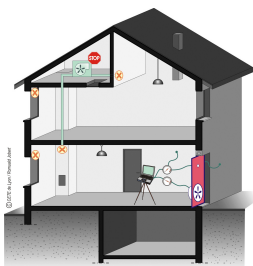
3. Installation de la porte soufflante (*Blower Door*)

laurent.mora@u-bordeaux1.fr

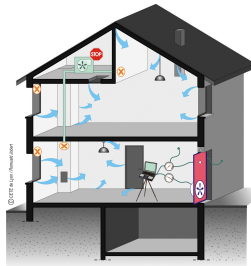
11

## Comment caractériser l'étanchéité à l'air d'un bâtiment existant

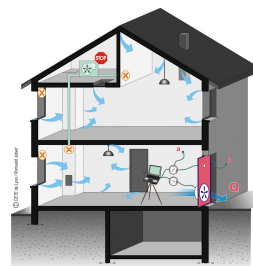
- But : Produire un écart de pression entre l'intérieur et l'extérieur générateur de flux d'air



4. Installation du banc d'essai ou de mesure



5. Maintien en dépression et analyse qualitative



6. Mesure du débit de fuite pour 5 à 10 paliers de pression

laurent.mora@u-bordeaux1.fr

12

## Comment caractériser l'étanchéité à l'air d'un bâtiment existant

### Les appareillages



Source CETE de Lyon

#### Perméascope

Capacité d'extraction  
1000 m<sup>3</sup>/h



Source Énergie Positive

#### Porte ventilateur Blower Door

Capacité d'extraction  
+ 7700 m<sup>3</sup>/h



Source CETE de Lyon

#### Banc Grands Volumes

Capacité d'extraction  
< 30000 m<sup>3</sup>/h

laurent.mora@u-bordeaux1.fr

13

## Localisation des fuites

### La main

La mise en dépression est suffisamment importante pour qu'on puisse repérer les infiltrations d'air parasites avec main devant.

### Poire à fumée / fumigène

L'écoulement aéraulique est mis en évidence au moyen d'une fumée visible.



### L'anémomètre

Un capteur anémométrique tubulaire indique la vitesse de l'écoulement de l'air par la fuite.



### Thermographie infra rouge

La thermographie infrarouge permet de déterminer et visualiser les températures de surface des parois.

Couplée à une dépressurisation du local, la thermographie permet de visualiser localement des infiltrations d'air froid à travers l'enveloppe d'un bâtiment.

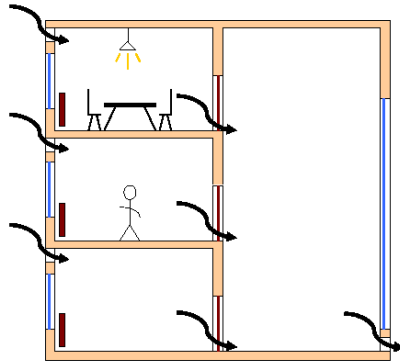
laurent.mora@u-bordeaux1.fr



Source FLIR System

## [ Problématique, au final :

- Evaluer les débits
- Comportement :
  - Thermique
  - Aéraulique
  - Hydrique
- En intégrant :
  - Enveloppe
  - Équipements
  - Occupants
  - Climat, etc.



laurent.mora@u-bordeaux1.fr

15

## [ Plan

- Dimensionnement des réseaux aérauliques
- La modélisation des transferts au sein des bâtiments
- Potentiel de différentes approches
- TD
  - Débits en ventilation naturelle
  - Dimensionnement réseau aéraulique
- TP
  - Prise en main de CONTAM et application à votre projet

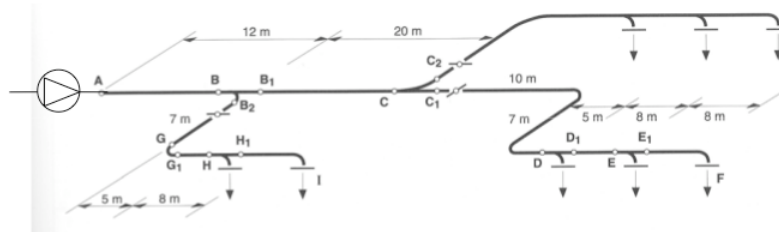
laurent.mora@u-bordeaux1.fr

16



## Méthodes de dimensionnement de réseaux aérauliques

- Exemple Installation de diffusion d'air
  - Débits et conditions de soufflage



laurent.mora@u-bordeaux1.fr

17

## Méthodes de dimensionnement de réseaux aérauliques

- Objectifs du dimensionnement
  - Assurer le transport et la bonne répartition des débits
  - Choix du ventilateur
  - Dimensionnement des gaines
  - Réglage du débit
  - Réglage de la pression au niveau des bouches de soufflage

laurent.mora@u-bordeaux1.fr

18

## Méthodes de dimensionnement de réseaux aérauliques

### ■ Définitions

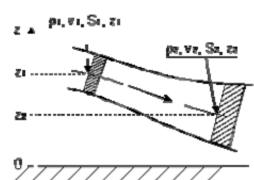
#### ○ Les pressions

- La pression statique  $p$  : Pression à satisfaire au niveau des diffuseurs
- La pression dynamique :  $p_d = \rho \frac{v_m^2}{2}$  [Pa]
- La pression totale :  $p_t = p + p_d$

#### ○ Relation de Bernoulli

- Fluide parfait : Conservation de la charge

$$p_1 + \rho g z_1 + \rho \frac{v_1^2}{2} = p_2 + \rho g z_2 + \rho \frac{v_2^2}{2}$$



laurent.mora@u-bordeaux1.fr

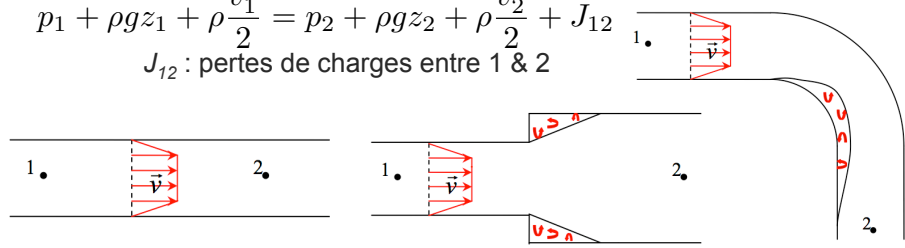
## Méthodes de dimensionnement de réseaux aérauliques

### ■ Fluide réel (visqueux)

- Un fluide réel, en mouvement, subit des pertes d'énergie dues aux frottements
  - sur les parois de la canalisation (pertes de charge linéaires)
  - sur les "accidents" de parcours (pertes de charge singulières).

$$p_1 + \rho g z_1 + \rho \frac{v_1^2}{2} = p_2 + \rho g z_2 + \rho \frac{v_2^2}{2} + J_{12}$$

$J_{12}$  : pertes de charges entre 1 & 2



laurent.mora@u-bordeaux1.fr

20

## Méthodes de dimensionnement de réseaux aérauliques

### ■ Le calcul des pertes de charges

- Les pertes de charges linéaires  $J_L$

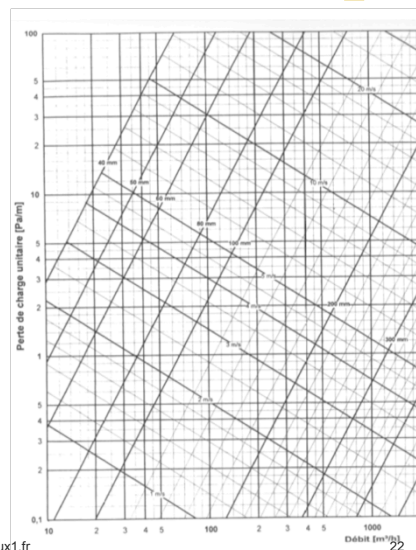
$$J_L = j \times L \quad [\text{Pa}] \quad \text{avec} \quad \begin{cases} j \text{ [Pa/m]} \text{ perte de charge linéique} \\ L \text{ [m]} \text{ la longueur de gaine} \end{cases}$$

- Cas courant  $j$  donné par des abaques

## Méthodes de dimensionnement de réseaux aérauliques

- Abaque de pertes de charges  
(Conduites métalliques circulaires)

$j$  fonction de  $Q_v$  le débit volumique et  
 $D$  le diamètre de la gaine



## Méthodes de dimensionnement de réseaux aérauliques

- Cas général :  $j = \frac{\lambda}{D_h} \rho \frac{v^2}{2}$  [Pa/m]
   
 avec  $\lambda \left( \text{Re}, \frac{\epsilon}{D_h} \right)$  coef. de pdc (diagramme de Moody)
   
 $\text{Re} = \frac{v D_h}{\nu}$  [-] (nombre de Reynolds)
   
 $\nu$  [m<sup>2</sup>/s] (viscosité cinématique)
   
 $D_h$  [m] (diamètre hydraulique)
   
 $D_h = \frac{4S}{\text{périmètre}}$  avec  $S$  la section
   
 $\epsilon$  [m] (rugosité du matériau)

laurent.mora@u-bordeaux1.fr

23

## Méthodes de dimensionnement de réseaux aérauliques

- Les pertes de charge singulières  $J_S$ 
  - Cas général :  $J_S = \xi \times \rho \frac{v^2}{2}$  [Pa]
   
 Abaqués fournissant ces coef. de pdc singulières

Conduits à section rectangulaire (b = largeur ; a = hauteur)											
		b/a					C/a		S2/S1		c
		0,25	0,5	1,0	4,0	0,25	0,5		0,1	1,0	
	R/a	0	1,3	1,1	1,0	1,0	0,5	0,4	0,5	0,2	0,7
	R/a	0,5	0,6	0,5	0,4	0,4	0,75	0,25	0,3	0,4	0,4
	R/a	1,0	0,4	0,3	0,25	0,2	1,0	0,2	0,2	0,6	0,2
	R/a	1,5	0,2	0,15	0,1	0,1	2,0	0,1	0,1	0,8	0,1
	α	C2									
		15°	0,1					R/D	C2	S1	S2
	α	30°	0,3				0,5	1,0		0,0	2,5
	α	45°	0,5				0,75	0,5		0,2	2,5
	α	60°	0,7				1,0	0,25		0,4	2,3
	α	90°	1,3				1,5	0,15		0,6	2,0
	α						2,0	0,1		0,8	1,6
	α								C1	1,0	1
		15°	0,1							0,1	0,6
	α	30°	0,3							0,2	0,45
	α	45°	0,7							0,4	0,3
	α	60°	1,0							0,6	0,2
	α	90°	1,4							0,8	0,1
	α										
										1	0
	α									0,9	0,1
	α									0,8	
	α									0,7	1
	α									0,6	2
	α									0,5	5
	α									0,4	8
	α										

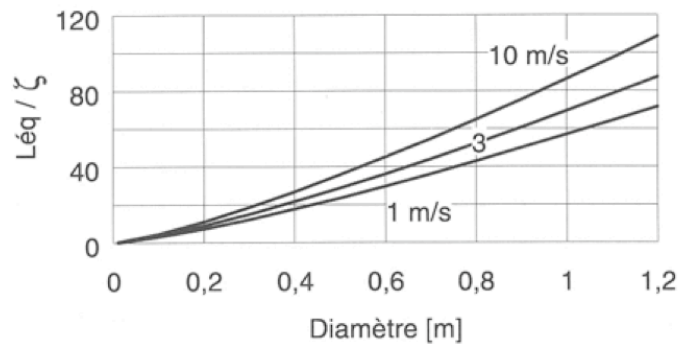
laurent.mora@u-bordeaux1.fr

24

## Méthodes de dimensionnement de réseaux aérauliques

- Les pertes de charge singulières  $J_S$ 
  - Longueur équivalente de conduite

$$J_S = j \times L_{eq} \text{ [Pa]}$$



laurent.mora@u-bordeaux1.fr

25

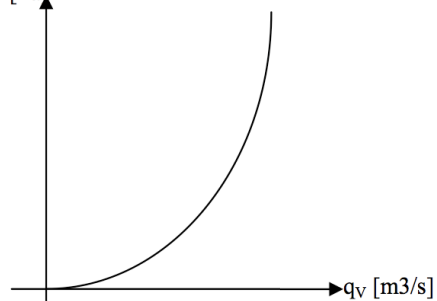
## Méthodes de dimensionnement de réseaux aérauliques

- La (courbe) caractéristique du réseau

$$J = J_L + J_S = \left( \sum j + \sum \xi \right) \rho \frac{v^2}{2} = \left( \sum j + \sum \xi \right) \frac{\rho}{2S} q_v^2 \text{ [Pa]}$$

Perte de charge maximale dans le réseau

(tronçon J [Pa])



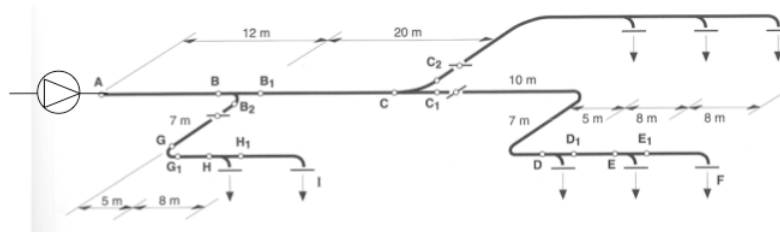
laurent.mora@u-bordeaux1.fr

26

## Méthodes de dimensionnement de réseaux aérauliques

### ■ Equilibrage du réseau

Tous les tronçons vus depuis le ventilateur doivent avoir la même perte de charge



laurent.mora@u-bordeaux1.fr

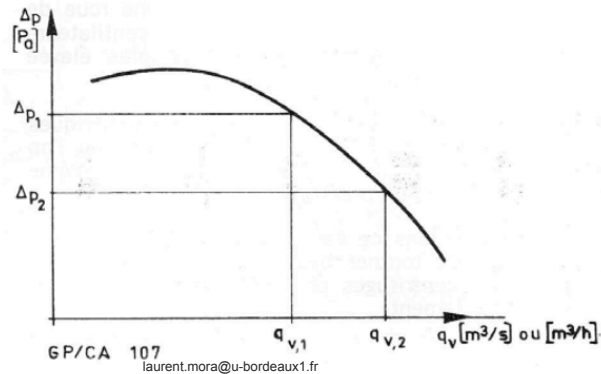
27

## Méthodes de dimensionnement de réseaux aérauliques

### ■ Les ventilateurs

○ But : fournir l'énergie mécanique nécessaire pour lutter contre les pertes de charges

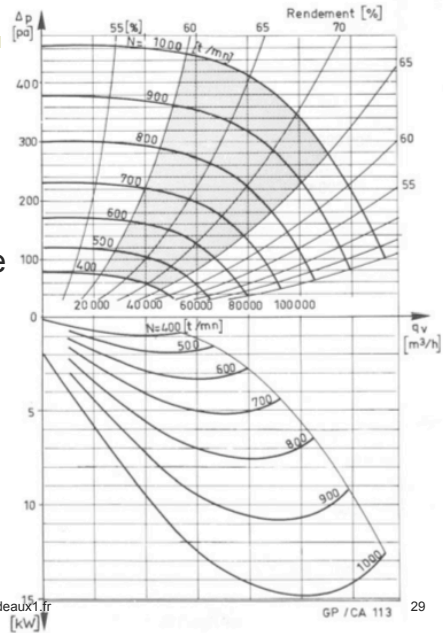
■ Courbe caractéristique pour une vitesse de rotation donnée



28

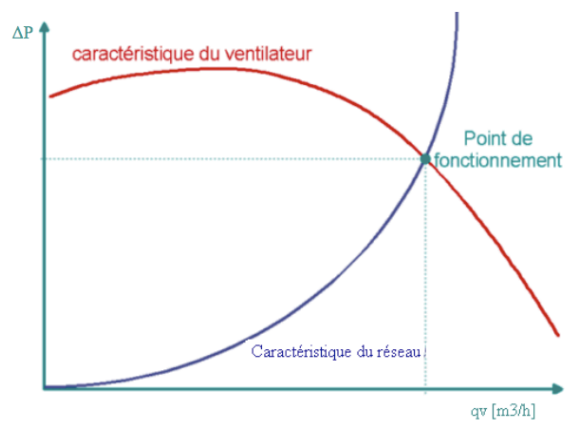
## Méthodes de dimensionnement de réseaux aérauliques

- Courbe caractéristique d'un ventilateur



## Méthodes de dimensionnement de réseaux aérauliques

- Choix d'un ventilateur



## Méthodes de dimensionnement de réseaux aérauliques

- Dimensionnement des conduits
  - Débits et pressions statiques imposés sur les diffuseurs
  - → Déterminer la section des gaines
  - 3 méthodes
    - Choix de la vitesse
    - Choix de la perte de charge
    - Récupération de pression dynamique

laurent.mora@u-bordeaux1.fr

31

## Méthodes de dimensionnement de réseaux aérauliques

- Méthode du choix de la vitesse
  - Vitesse moyenne fixée dans le réseau d'où les sections 
$$S = \frac{q_v}{v_m}$$
  - Avantage : grande simplicité
  - Inconvénients :
    - Equilibrage nécessaire sur tous les tronçons
    - Organe de réglage nécessaire pour obtenir la pression statique sur les diffuseurs (d'où pdc supplémentaires)

laurent.mora@u-bordeaux1.fr

32



## Méthodes de dimensionnement de réseaux aérauliques

### ○ Vitesses recommandées

Types d'installation	Basse pression						Haute pression	
	Habitations	Bureaux	Commerces			Inducteurs		
Applications	Théâtres	Hôpitaux	Restaurants			Double gaine		
	Salles de concert	Bâtiments publics	Industries			Longues distributions		
<i>Vitesses dans les conduits en m/s</i>								
	Normal	Maxi	Normal	Maxi	Normal	Maxi	Normal	Maxi
Conduit principal	4	6	6	8	7,5	11	12-18	30
Conduit montant	3,5	5,5	5	7	6,5	10	11-16	25
Conduit de distribution	3	5	4	6,5	5	9	10-15	22

laurent.mora@u-bordeaux1.fr

33

## Méthodes de dimensionnement de réseaux aérauliques

- Méthode du choix de la perte de charge
  - Singularité du conduit assimilées à des longueurs équivalentes de conduites de même diamètre (approximation)
    - Fixer les pertes de charge linéaires dans le tronçon principal à partir d'une vitesse et du débit
    - Déterminer les autres tronçons en conservant la même pdc linéaire
  - Un équilibrage est toujours nécessaire

laurent.mora@u-bordeaux1.fr

34

## Méthodes de dimensionnement de réseaux aérauliques

- Méthode de récupération de pression dynamique
  - Objectif : obtenir la même pression statique derrière toutes les bouches de soufflage

■ Exemple :



$$p_A + \rho g z_A + \rho \frac{v_A^2}{2} = p_B + \rho g z_B + \rho \frac{v_B^2}{2} + J_{AB} \quad z_A = z_B$$

$$\text{d'où } p_B - p_A = \rho \frac{v_A^2 - v_B^2}{2} - J_{AB}$$

- La variation de vitesse peut donc compenser la perte de charge (auto-équilibrage)

laurent.mora@u-bordeaux1.fr

35

## Modélisation aéraulique à l'échelle du bâtiment

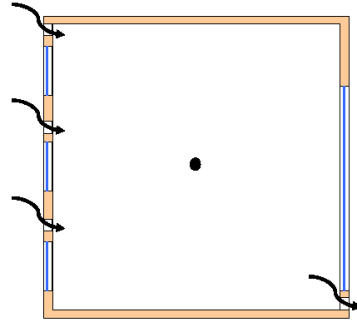
- Discrétisation du bâtiment en volumes de contrôles (plus ou moins grands):
  - Approche monozone
  - Approche multizone/nodale
  - Approche zonale
  - Codes de champs
- Applications de lois de conservation
  - Masse, énergie, quantité de mouvement, énergie cinétique, etc.

laurent.mora@u-bordeaux1.fr

36

## [ Approche monozone ]

- la plus simple
- caractéristiques générales du bâtiment :
  - enveloppe
  - système de ventilation et de chauffage/climatisation
  - inertie
- sorties : température, puissance nécessaire et confort à la zone (pas de détails)
- ⇒ pas de prise en compte de l'hétérogénéité des températures entre les zones du bâtiment.

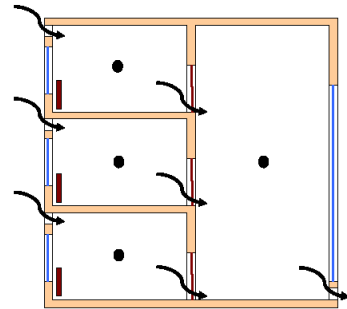


laurent.mora@u-bordeaux1.fr

37

## [ Approche multizone/nodale ]

- une zone = une pièce + prise en compte des connections
- caractéristiques zonales du bâtiment :
  - murs ext. et int.
  - système de ventilation et de chauffage/climatisation
  - inertie
- sorties : température, puissance nécessaire et confort par zone
- ⇒ pas de prise en compte de l'hétérogénéité des températures au sein des zones du bâtiment.

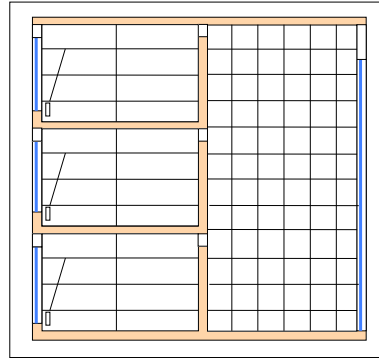


laurent.mora@u-bordeaux1.fr

38

## [ Approche zonale ]

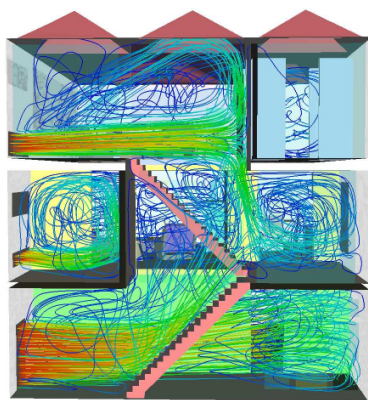
- une zone = une partie d'une pièce + prise en compte des connexions entre zones
- caractéristiques zonales du bâtiment :
  - murs ext. et int.
  - système de ventilation et de chauffage/climatisation avec localisation
  - sorties : température et confort par zone, débits interzones...
- ⇒ limitée aux géométries simples



laurent.mora@u-bordeaux1.fr

39

## [ Codes de champs ]



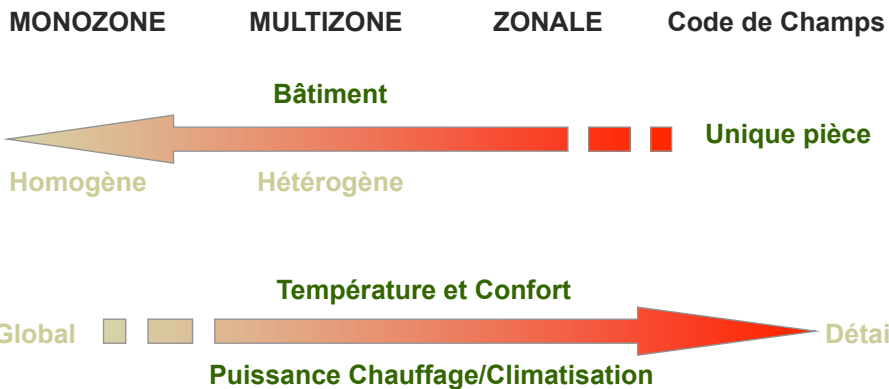
(Cécile Dobrzynsk,  
MAB Bordeaux1)

- une zone = une toute petite partie d'une pièce
- résolution des équations de Navier-Stokes.
- caractéristiques très précises du bâtiment :
  - murs ext. et int.
  - système de ventilation et de chauffage/climatisation avec localisation
  - sorties : température, vitesse d'écoulement, flux de chaleur... par zone
- ⇒ temps de calcul et mémoire très importants

laurent.mora@u-bordeaux1.fr

40

# Niveaux de détail adapté



laurent.mora@u-bordeaux1.fr

41

# Approche multizone/nodale

## ■ L'ambiance:

- Bilan masse air sec  $\sum_{j=1}^n \dot{m}_{as,j} = 0$
- Bilan masse espèce  $\sum_{j=1}^n \dot{m}_{es,j} + Source_{es} = V \frac{\partial \rho_{es}}{\partial t}$
- Bilan énergie

$$\sum_{j=1}^n \dot{m}_{as,j} C_{pas} T_j + Source_{sens} + \dot{m}_{es,source} C_{pes} T_{source} = m_{as} C_{pas} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{es}}{\partial t} V C_{pes} T$$

- Hypothèse des gaz parfaits

$$\rho = \frac{P + 101325}{(R_{as} \rho_{as} + R_{es} \rho_{es})(T + 273.15)}$$

laurent.mora@u-bordeaux1.fr

42

## Approche multizone/nodale

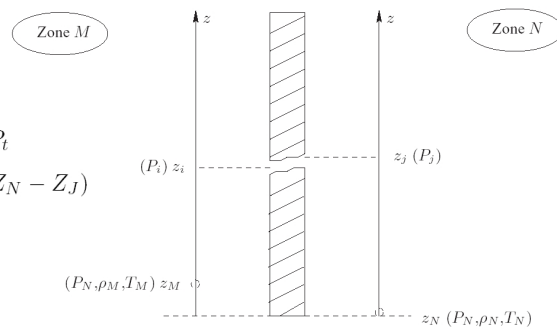
- Les transferts de masse:
  - Infiltrations par une petite ouverture

$$\dot{m}_{as} = C_t K \rho_a (\Delta P)^n$$

$$\Delta P = P_I - P_J = P_M - P_N + P_t$$

$$P_t = \rho_M g(Z_M - Z_I) - \rho_N g(Z_N - Z_J)$$

$$\rho_a = \frac{\rho_I + \rho_J}{2}$$

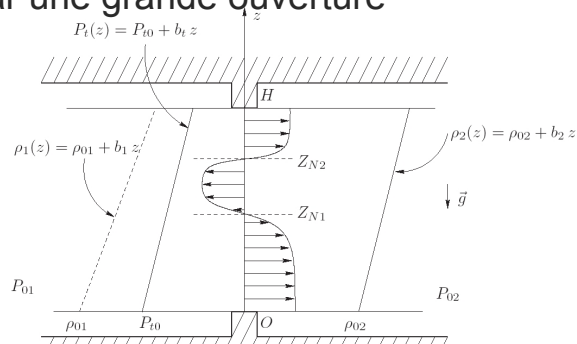


laurent.mora@u-bordeaux1.fr

43

## Approche multizone/nodale

- Infiltrations par une grande ouverture



$$b_1 = b_2 = 0$$

1 seul axe neutre :

$$\dot{m}_{as, Z_n - H} = \frac{2}{3} W C_d C_s \sqrt{\rho} \left( 2g(\rho_{01} - \rho_{02}) - b_t \right)^{\frac{1}{2}} \left| H - Z_n \right|^{\frac{3}{2}}$$

$$\dot{m}_{as, 0 - Z_n} = \frac{2}{3} W C_d C_s \sqrt{\rho} \left( 2g(\rho_{01} - \rho_{02}) - b_t \right)^{\frac{1}{2}} \left| Z_n \right|^{\frac{3}{2}}$$

laurent.mora@u-bordeaux1.fr

44

## [ Approche multizone/nodale ]

- Description des ouvertures
  - Orifice  $Q = K \cdot A_o \cdot \sqrt{2\Delta P / \rho}$
  - Ouverture
  - Difficulté quand même de mettre en œuvre une approche déterministe pour les infiltrations !
- Diffuseurs, bouches d'extraction

laurent.mora@u-bordeaux1.fr

45

## [ Approche multizone/nodale ]

- Porte intérieure ouverte: Two-way flow  
(H=2,10 m ; W=0,80 m ; Cd=0,78)
- Porte fermée : leakage area  
(0,3 cm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> ; n=0,65 )
- Bouches (entrées d'air) : Orifice  
(Sc=100 cm<sup>2</sup> ; n=0,65 ; Cd=0,6)

laurent.mora@u-bordeaux1.fr

46

## [ Approche multizone/nodale ]

- Gaines de ventilation
  - Pertes de charges linéaires et singulières
- Ventilateurs
  - Courbes caractéristiques

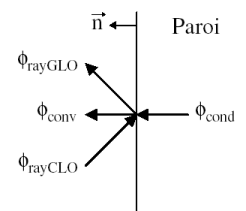
## [ Approche multizone/nodale ]

- Les transferts de chaleur
  - Transport par les ouvertures

$$\Phi_{i \rightarrow j} = (\dot{m}^- C_{p_{ah}} T_j + \dot{m}^+ C_{p_{ah}} T_i) - \lambda \frac{w h}{l} (T_j - T_i)$$

- Bilan à la surface intérieure des parois

$$\Phi_{cond} + \Phi_{rayCLO} = \Phi_{conv} + \Phi_{rayGLO}$$



- Transferts radiatifs



# Approche multizone/nodale

- Transferts par convection

$$\Phi_{conv_{i \rightarrow u}} = h_{cu} S_u (T_i - T_{su})$$

Orientation parois	Expression	Régime d'écoulement
Verticales	$h_{cu} = 3  T_i - T_{su} ^{1/3}$	convection mixte
	$h_{cu} = 1,5  T_i - T_{su} ^{1/3}$	convection naturelle
Horizontales (plafond)	$h_{cu} = 3  T_i - T_{su} ^{2/3}$	convection mixte
	$h_{cu} = 3$	convection naturelle
Horizontales (plancher)	$h_{cu} = 3$	Tous les cas

# Approche multizone/nodale

- Transferts par conduction (différences finies)  
Ex.: mod. 2R-3C

$$R_A = \sum_{k=1}^{n_A} \frac{e_k}{\lambda_k} \quad R_B = \sum_{k=n_A+1}^n \frac{e_k}{\lambda_k} \quad \text{et} \quad n = n_A + n_B$$

$$C_A = \sum_{i=1}^{n_A} \rho_i C_{p_i} e_i (1 - \beta_i) \quad C_B = \sum_{j=n_A+1}^n \rho_j C_{p_j} e_j \delta_j$$

$$C_M = \sum_{i=1}^{n_A} \rho_i C_{p_i} e_i \beta_i + \sum_{j=n_A+1}^n \rho_j C_{p_j} e_j (1 - \delta_j)$$

$$\beta_i = \frac{e_i}{2\lambda_i + \sum_{k=1}^{i-1} \frac{e_k}{\lambda_k}} \quad \text{et} \quad \delta_j = \frac{e_j}{2\lambda_j + \sum_{k=n_A+1}^{j-1} \frac{e_k}{\lambda_k}}$$

# Approche multizone/nodale

## Conditions aux limites et initiales

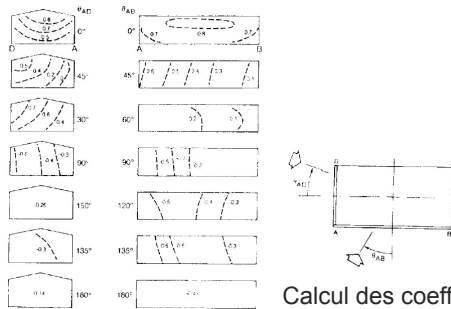
### Effets du vent sur les façades

#### Coefficients de pression

$$c_{pk}(z_{ref}, \phi) = \frac{P_k - P_0(z)}{P_{dyn}(z_{ref})}$$

$$P_{dyn}(z_{ref}) = \frac{1}{2} \rho_0 v^2(z_{ref})$$

$$P_0(z) = P_0 - \rho g z$$



Calcul des coefficients Cp: Cpgen (TNO)

<http://cpgen.bouw.tno.nl/cp/>

laurent.mora@u-bordeaux1.fr

51

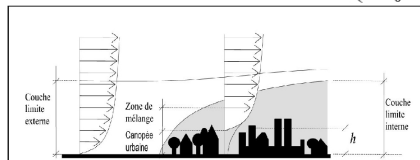
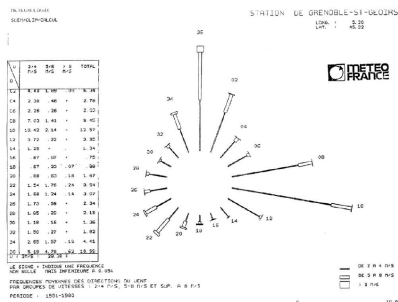
# Approche multizone/nodale

### Effets du vent sur les façades

#### Vitesse du vent

$$\frac{v(z)}{v(z_{ref})} = \left( \frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha$$

$$\bar{u}(z) = \frac{u^*}{k} \ln \left( \frac{z - d_0}{z_0} \right)$$



Type de surface	Hauteur de rugosité (m)	Classe de rugosité
Mer, neige, sable	0.0005	I
Mer par grand vent	0.005	II
Herbe courte	0.01	III
Champs cultivés ouverts	0.05	IV
Plantations hautes, campagne ouverte	0.10	V
Campagne et habitat dispersé	0.25	VI
Zone urbaine périphérique	0.50	VII
Centre ville, forêt	1.00	VIII
Centre de métropoles, forêt tropicale	4.00	IX

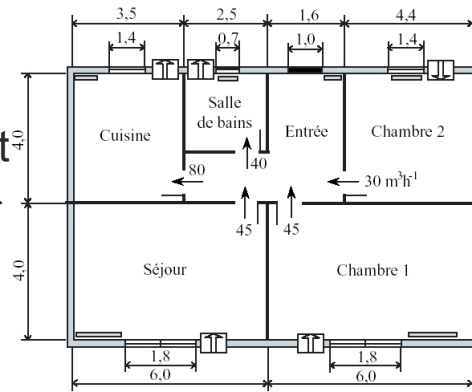
### Concentrations ext. en polluant et humidité

laurent.mora@u-bordeaux1.fr

52

## Exemple de simulation aéraulique

- Le bâtiment
  - VMC
- Source de polluant
  - Dans le séjour  $N$
  - 1 g/s sur 5 min
- Températures
  - Constante = 20°C

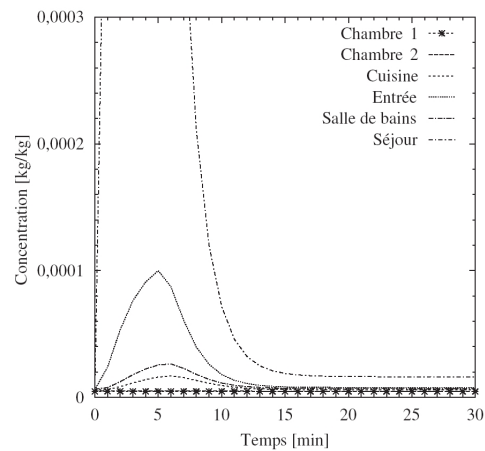


laurent.mora@u-bordeaux1.fr

53

## Exemple de simulation aéraulique

- Évolution de la concentration durant 30 min
  - Amortissement
  - Déphasage
- Attention:
  - Hyp. mélange



laurent.mora@u-bordeaux1.fr

54

## Potentiels de l'approche nodale

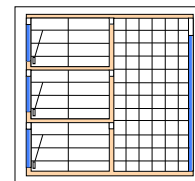
- **Atouts:**
  - Description du comportement de bâtiments comprenant un grand nombre de zones
  - Études sur de longues périodes de temps (ex. analyses de consommations)
  - Dimensionnement des systèmes
  - Temps de calcul et ressources modestes (PC)
- **Limitations (liées à l'hypothèse d'uniformité) pour:**
  - Étude du confort thermique et de la qualité de l'air dans la zone d'occupation
  - Représentation du couplage ambiance/systèmes
  - Traitement des grands volumes (ex. atrium)
  - Caractérisation des effets de sources localisées de chaleur ou de polluants

laurent.mora@u-bordeaux1.fr

55

## La méthode zonale

- **Objectifs:** Estimer rapidement les détails de l'environnement intérieur
- **Approche:**
  - Diviser le domaine d'étude en un petit nombre de sous-volumes supposés uniformes (cellules)
  - Caractérisation des systèmes (couplage avec l'ambiance)
  - Traitement particulier des écoulements dominants (jets, panache, couches limites)
- **Modèles semblables à l'approche nodale:**
  - Equations bilans
  - Enveloppe



laurent.mora@u-bordeaux1.fr

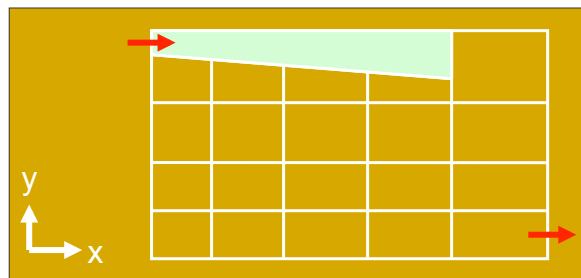
56

## La méthode zonale

- Transferts aérauliques au sein de la zone:
  - Formulation de l'écoulement issue de l'approche nodale (Cd: coefficient empirique, uniforme)

$$\dot{m}_{as_{u \rightarrow i}} = C_d \rho_{as_{i,j}} w h \left( \frac{2}{\rho_{i,j}} |\Delta P_{i,j}| \right)^{\frac{1}{2}} \times \text{signe}(\Delta P_{i,j})$$

- Exemple d'écoulement dominant: jet isotherme de paroi



laurent.mora@u-bordeaux1.fr

57

## La méthode zonale

- Exemple d'écoulement dominant: jet isotherme de paroi

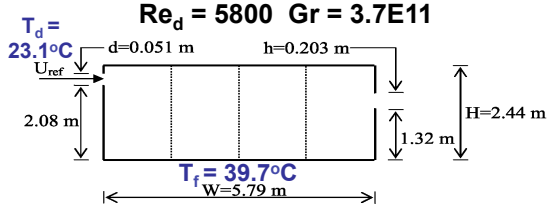
- Profil axial de vitesse:  $U = U_m \exp\left(-0,937 \left(\frac{y}{b_u} - 0,14\right)^2\right)$
- Amplitude du jet:  $U_m = U_0 3,5 \sqrt{\frac{h}{x}}$
- Expansion du jet:  $b_u = 0,068 (x - 10 h)$

laurent.mora@u-bordeaux1.fr

58

# Exemple de simulation zonale (1)

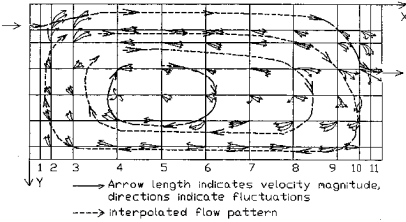
Expérimentation de Zhang (1994)  
Mesures de vitesses et températures en 2D



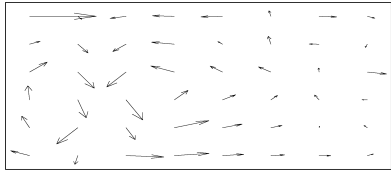
- Simulation avec l'approche zonale
- Comparaison des vitesses horizontales et des températures le long de 3 axes verticaux dans le plan central vertical de la pièce

# Allure de l'écoulement

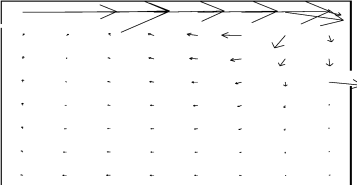
- Visualisation expérimentale



- Zonal



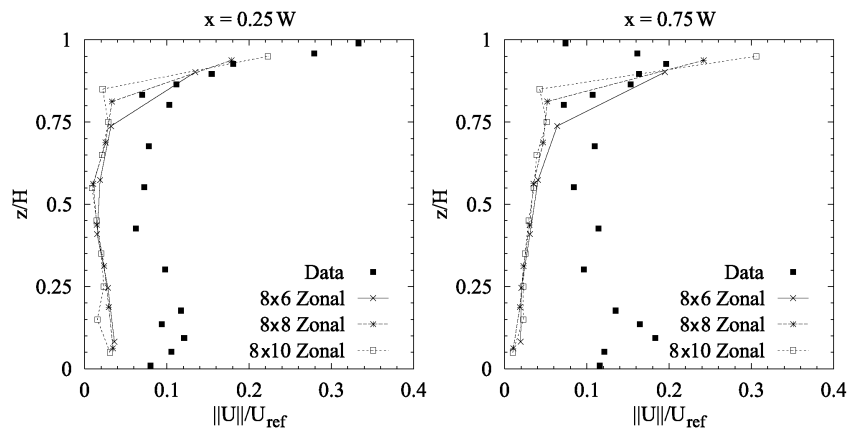
Grille 8x8 sans modèle de jet



Grille 8x8 avec modèle de jet

## Profils de vitesses horizontales

- Modèles zonaux et données expérimentales en  $x=0.25W$  et  $x=0.75W$

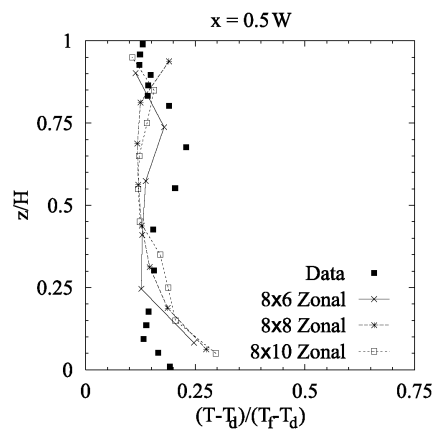


laurent.mora@u-bordeaux1.fr

61

## Profils de températures

- Modèles zonaux et données expérimentales en  $x=0.5W$

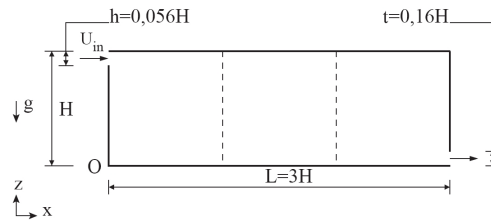


laurent.mora@u-bordeaux1.fr

62

## Exemple de simulation zonale (2)

- Cavité ventilée  
 $Re_{in} = 5000$   
 (Nielsen, 1978)



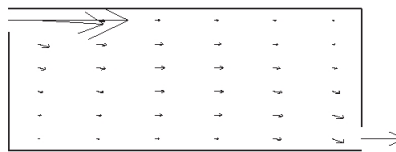
- Simulation avec l'approche zonale
- Comparaison des vitesses le long de deux axes horizontaux et verticaux

laurent.mora@u-bordeaux1.fr

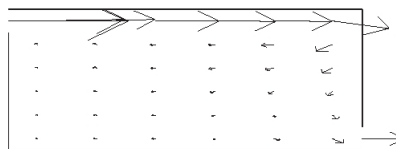
63

## Allures de l'écoulement

- Approche zonale avec sans prise en compte des écoulements dominants



(a) Sans modèle de jet



(b) Avec modèle de jet

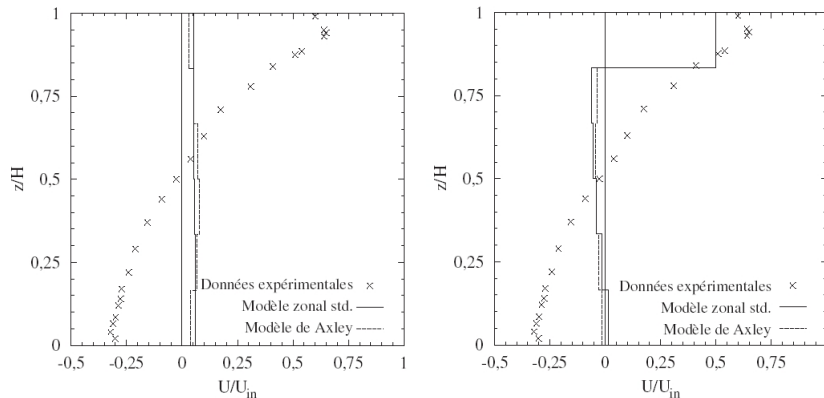
laurent.mora@u-bordeaux1.fr

64



## Profils de vitesses horizontales

- Modèles zonaux et données expérimentales en  $x=2H$



laurent.mora@u-bordeaux1.fr

65

## Potentiels de la méthode zonale

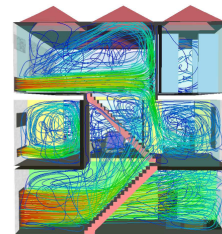
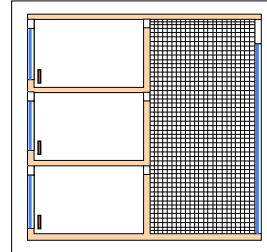
- Atouts:
  - Couplage systèmes/ambiance
  - Traitement des grands volumes
  - Estimation du confort thermique
  - Temps de calcul et ressources raisonnables pour des analyses sur de longues périodes (PC)
- Limitations:
  - Demande une connaissance *a priori* des écoulements dominants
  - Manque de fiabilité pour les détails de l'écoulement surtout en **conditions isothermes** (liée à l'absence de conservation de la quantité de mouvement)
  - Études limitées pour le transport de polluants

laurent.mora@u-bordeaux1.fr

66

## Les méthodes de mécanique des fluides numérique (CFD)

- Objectif: Estimer les détails d'un écoulement turbulent
- Approches (Résolution des équations de Navier-Stokes):
  - **La simulation directe (DNS)** pas d'hypothèse supplémentaire
  - **La simulation des grandes échelles tourbillonnaire (LES)** modélisation des petites échelles
  - **Les équations moyennées en temps (RANS):** modélisation de la turbulence (k-ε, RNG, etc.)
  - RANS k-ε à **mailles grossières**



laurent.mora@u-bordeaux1.fr

67

## Les équations de base des modèles RANS

- Équations de conservation pour un fluide incompressible:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u'_i u'_j} \right\} - \beta g_i \theta$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial \theta u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \kappa \frac{\partial \theta}{\partial x_j} - \theta' u'_j \right\} + h_s$$

- Modèle de turbulence k-ε:

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + \nu_t \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \beta g_i \frac{\nu_t}{\sigma_\theta} \frac{\partial \theta}{\partial x_i} - \epsilon$$

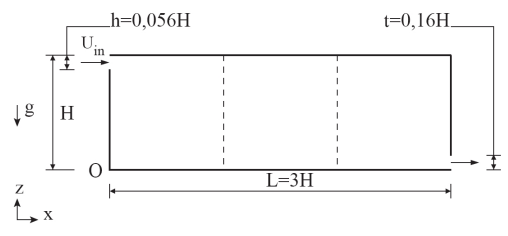
$$\frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right\} + \frac{\epsilon}{k} \left\{ C_1 \nu_t \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_2 \epsilon + C_3 \beta g_i \frac{\nu_t}{\sigma_\theta} \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \right\}$$

laurent.mora@u-bordeaux1.fr

68

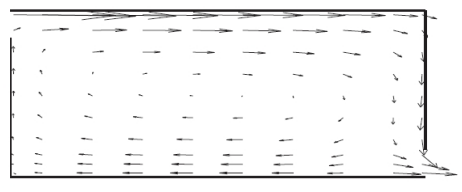
# [ Exemple de simulation CFD ]

- Cavité ventilée  
 $Re_{in} = 5000$   
(Nielsen, 1978)

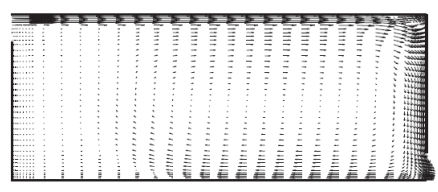


- Simulation avec modèle RANS  $k-\epsilon$  2D
  - Maillage standard (40x40) et grossier (10x10)
- Comparaison des vitesses le long de deux axes horizontaux et verticaux

# [ Allure de l'écoulement ]

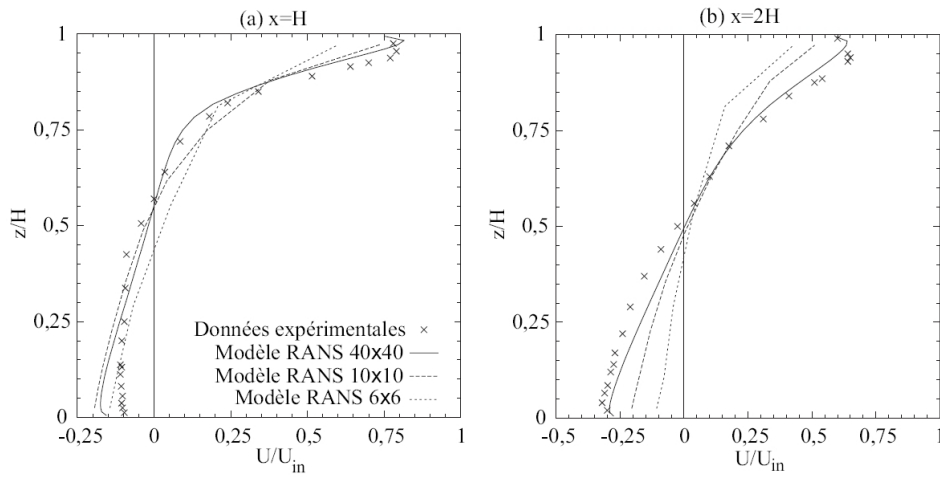


(a) Modèle CFD  $k-\epsilon$  10 x 10



(b) Modèle CFD  $k-\epsilon$  40 x 40

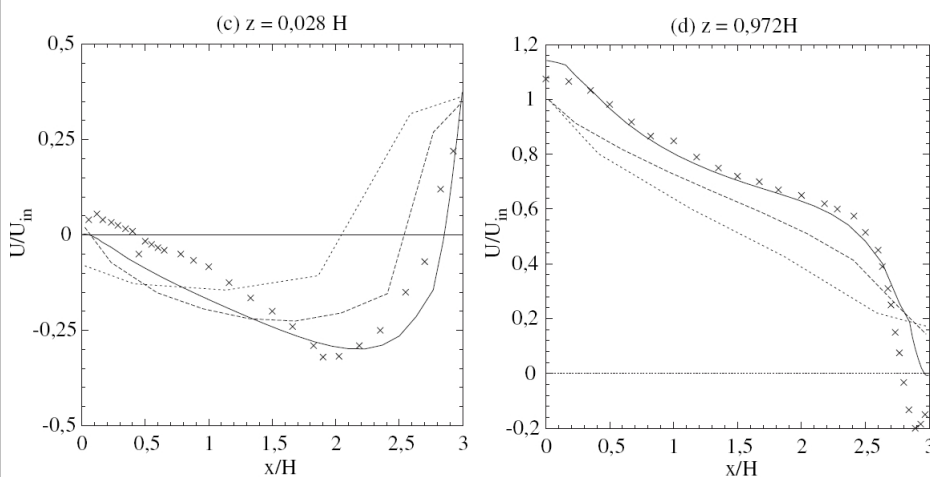
## Vitesses horizontales sur axes verticaux



laurent.mora@u-bordeaux1.fr

71

## Vitesses horizontales sur axes horizontaux



laurent.mora@u-bordeaux1.fr

72

## Potentiel de la méthode RANS k-ε

- Atouts:
  - Fiabilité relative des prédictions de l'environnement intérieur
  - Ne nécessitent pas de connaissance *a priori* des écoulements dominants
  - Très adaptés à l'étude du transport de polluants
- Limitations:
  - Validité du modèle de turbulence k-ε
  - Mise en œuvre complexe des modèles
  - Ressources et temps de calcul importants (PC en série, stations de travail)

⇒ Usage restreint à des études fines de zones spécifiques et limitées dans le temps

## Bilan sur les différentes méthodes

- Approche multizone/nodale
  - Dimensionnement des systèmes
  - Ventilation: Effets du vent et tirage thermique
- Approche zonale
  - Estimation du confort thermique dans un local
  - Limité à des configurations simples
- Approches CFD
  - Estimation des détails de l'environnement intérieur
  - Limitation due aux ressources (mise en œuvre et simulation)

## Types d'outils modélisation

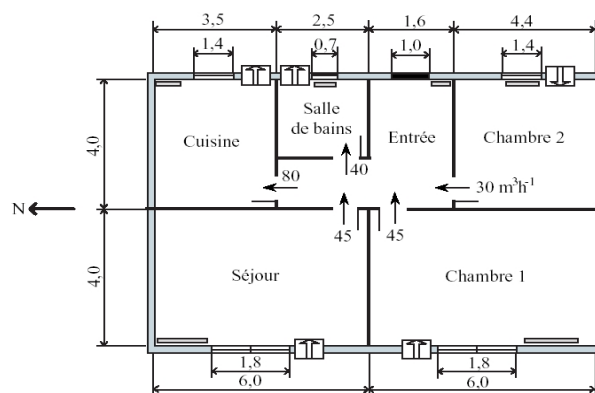
- Trois grandes catégories :
  - **énergétique** : modélisant le comportement thermique (ex. Pleiades/Comfie, Energy+, TRNSYS, Codyba, etc.)
    - températures dans chaque zone
    - estimation des puissances de chauffage/climatisation
    - les **débits** infiltrés ou échangés entre les pièces **donnés**
  - **aéraulique** : décrivant les mouvements d'air (ex. Contam, Comis)
    - Estimation des débits d'air
    - La **température** dans les zones est **donnée**
  - **thermo-aéraulique** : couplage des deux approches (Energy+ avec couplage Comis, TRNFlow)
- Développements actuels : modèle thermo-hygro-aéraulique interfacés avec des outils de CAO

laurent.mora@u-bordeaux1.fr

75

## Exploitation de CONTAM

- Utilisation de l'outil de simulation aéraulique multizone en projet



laurent.mora@u-bordeaux1.fr

76

# Références

## ■ Bibliographie :

- **Natural ventilation in Buildings – a design handbook**, Edited by Francis Allard and Mat Santamouris, James & James Ltd., ISBN 1 873936 72 9, 368 pp., 1998.
- **Natural Ventilation in the Urban Environment – Assessment and Design**, Edited by Francis Allard and Cristian Ghiaus, James & James Ltd., ISBN 1844071294, 256 pp., 2005.

## ■ Ressources sur internet:

- **NIST** (National Institute of Standards and Technology), Indoor Air Quality and Ventilation group, Outil de simulation multizone CONTAM: <http://www.bfrl.nist.gov/IAQanalysis/docs/CONTAM24.msi>
- **TAREB** : Projet européen pour l'enseignement de la conception de bâtiments à faible consommation énergétique, incluant les techniques de ventilation naturelle des bâtiments : <http://www.learn.londonmet.ac.uk/packages/tareb/fr/index.html>
- **TNO** : Génération de coefficients de pression pour les outils multi zones d'évaluation des performances des systèmes de ventilation des bâtiments : <http://cpngen.bouw.tno.nl/cp/>