

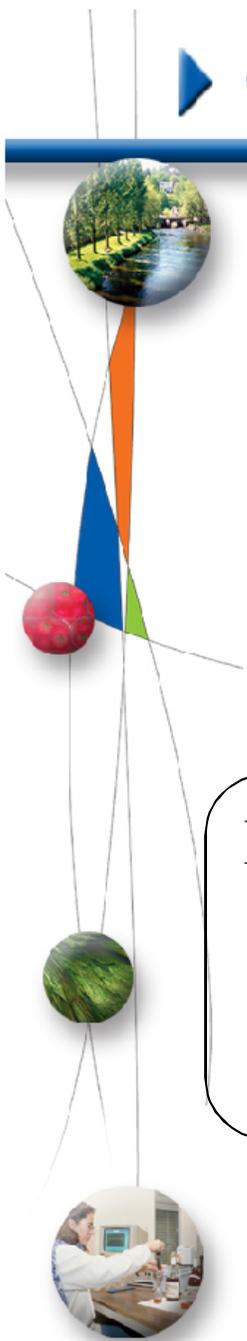


# **Caractérisation et modélisation des écoulements gazeux au cours du compostage de déchets organiques en taille réelle - Application à l'expertise et l'optimisation de procédés -**

---

G.Debenest  
Travaux de F.Hénon, A.Pujol

# ▶ Objectif principal de l'étude



Comprendre l'influence des écoulements gazeux sur un procédé de compostage à l'échelle industrielle

Diagnostiquer l'efficacité des systèmes d'aération des plates-formes industrielles

Optimiser les systèmes d'aération des plates-formes Industrielles

# ► Mécanismes réactionnels du compostage

**Hydrolyse**

Matière organique solide  
contenue dans le massif de déchet

Carbone organique dissout  
en phase aqueuse  
(polymères ou monomères)

**Dégradation aérobie**

Micro-organismes

Écoulements  
gazeux

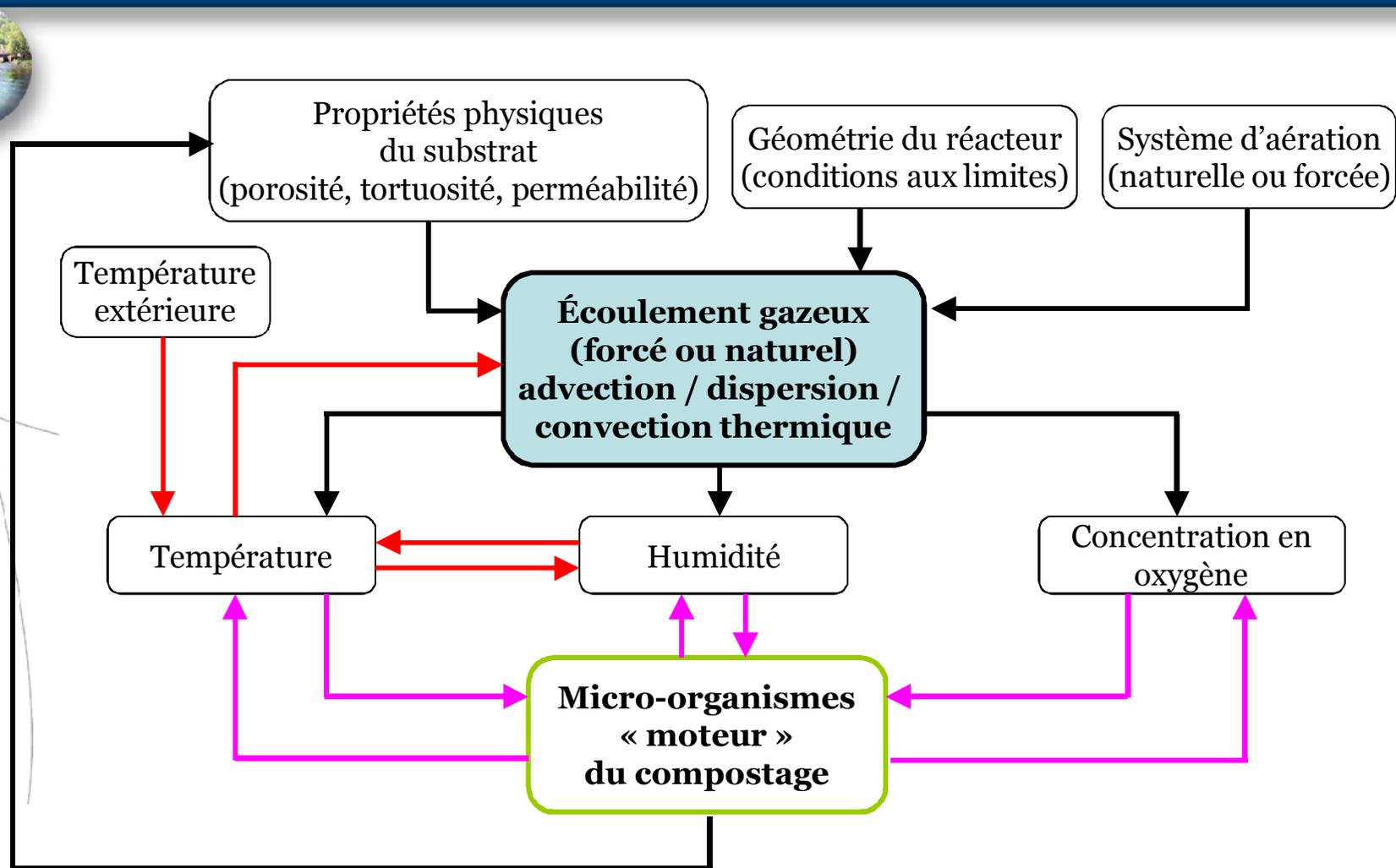
Oxygène dissout  
en phase aqueuse

CO<sub>2</sub>

Chaleur

H<sub>2</sub>O

# ► Rôle de l'écoulement gazeux dans le compostage



Interactions d'origine physique

Interactions d'origine thermique

Interactions d'origine biochimique

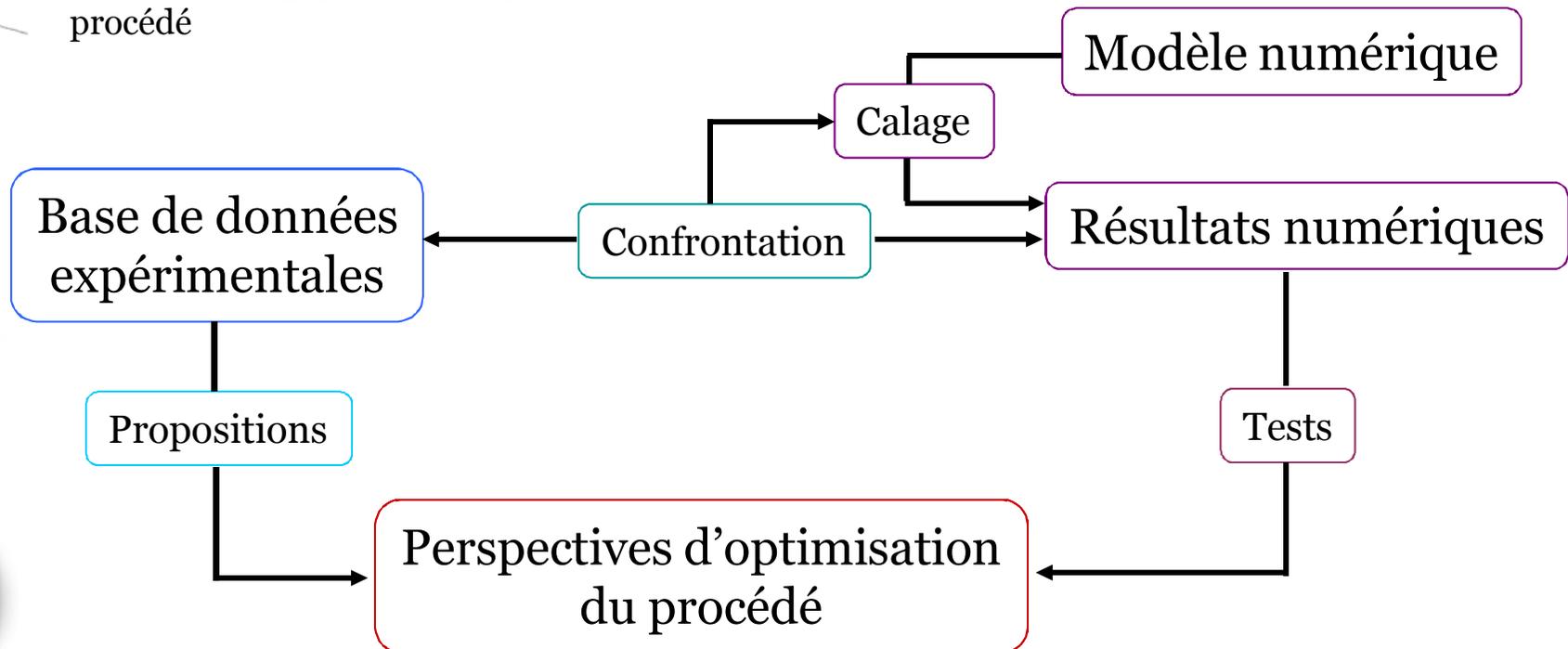
# ► Stratégie adoptée

## ● Approche expérimentale

- ❖ Développer des méthodes de caractérisation de l'écoulement et d'acquisition de données au cours d'un traitement par compostage en grandeur réelle
- ❖ Acquérir une base de données exploitable en terme de compréhension phénoménologique et de diagnostic du procédé

## ● Approche numérique

- ❖ Formuler un modèle d'équations de comportement régissant les transferts de masse et de chaleur au sein d'un procédé de compostage
- ❖ Réaliser un modèle numérique de ces équations de comportement (modèle de compostage)



# ► Procédé de compostage étudié

Procédé en aération positive forcée en Casier 18\*4\*2.5



Bouche d'évacuation

Massif de substrat

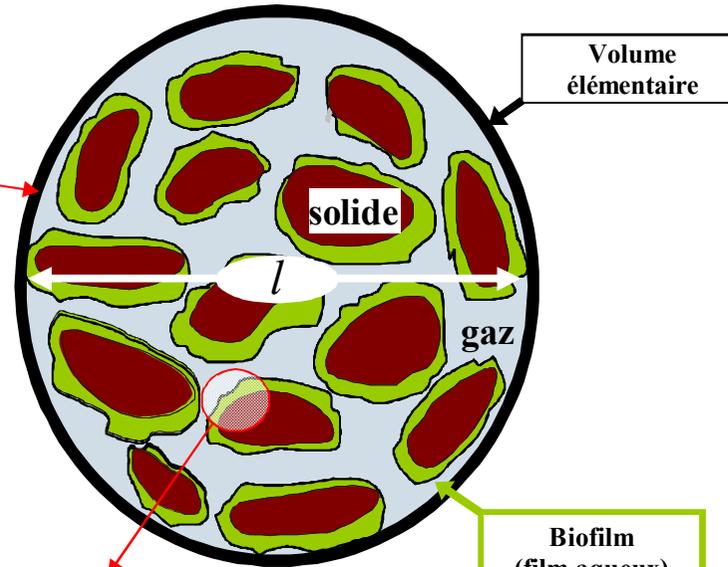
Système d'aération



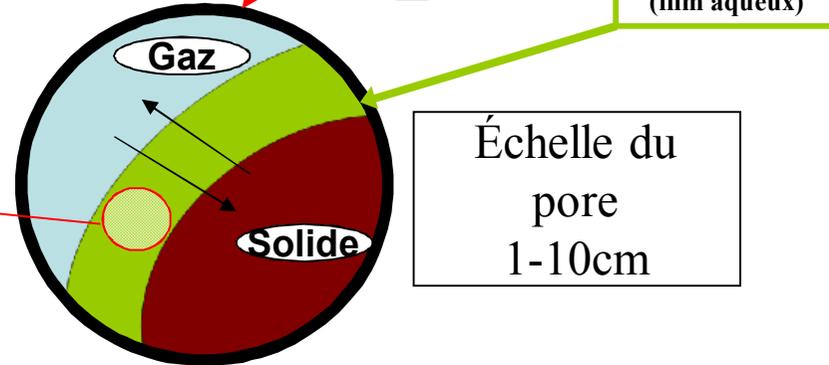
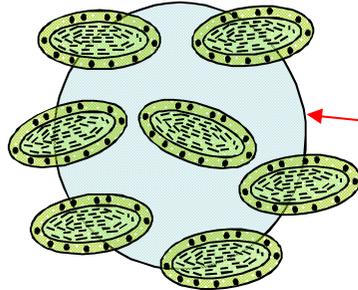
# ► Les échelles du problème



Échelle du V.E.R  
10cm-1m

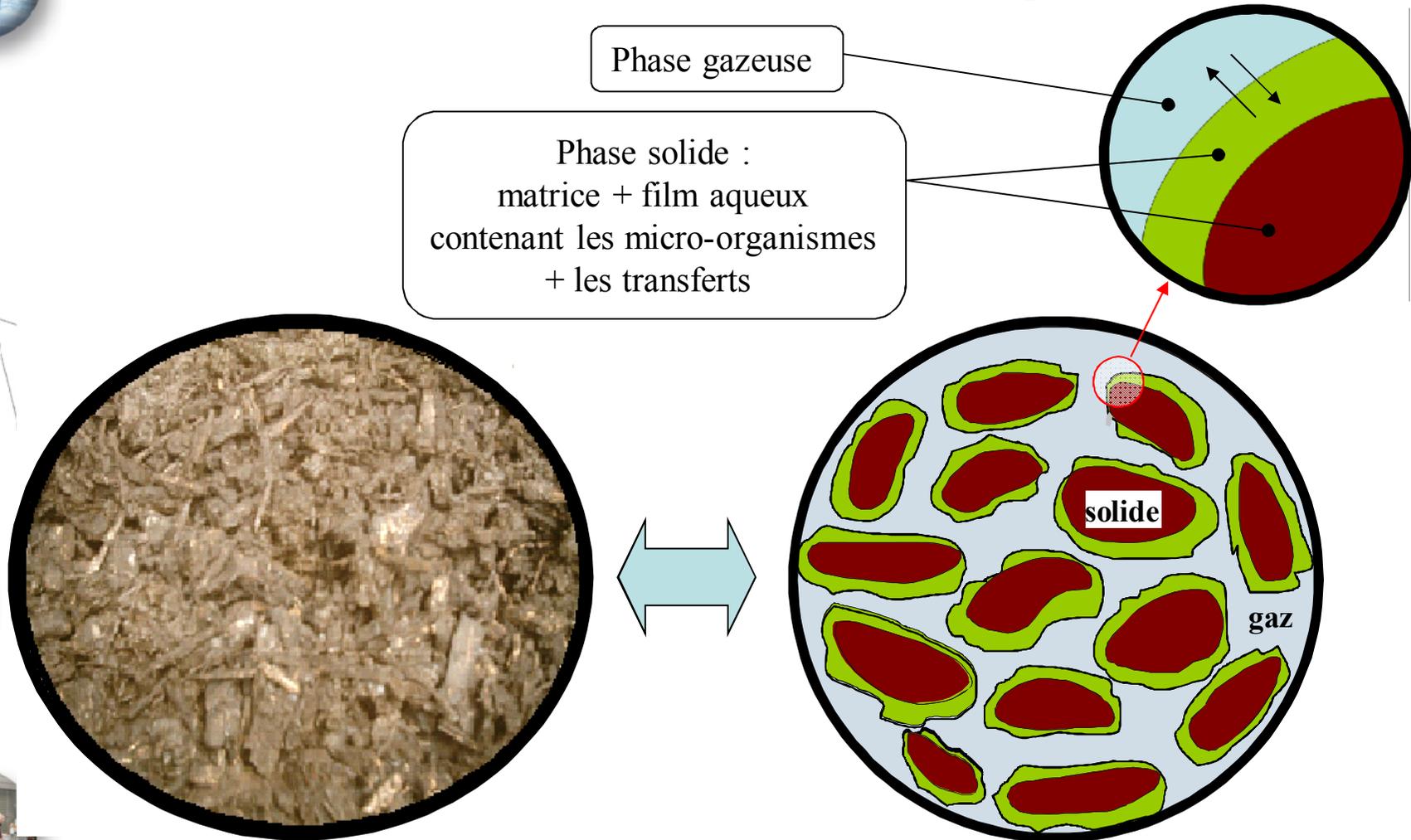


Échelle du biofilm  
1-10mm



# ► Hypothèses fondamentales du modèle

- Substrat = milieu poreux saturé en gaz



Massif de déchet (mélange boue/structurant)

Modèle conceptuel du déchet

# ▶ Constituants du gaz et équilibre local

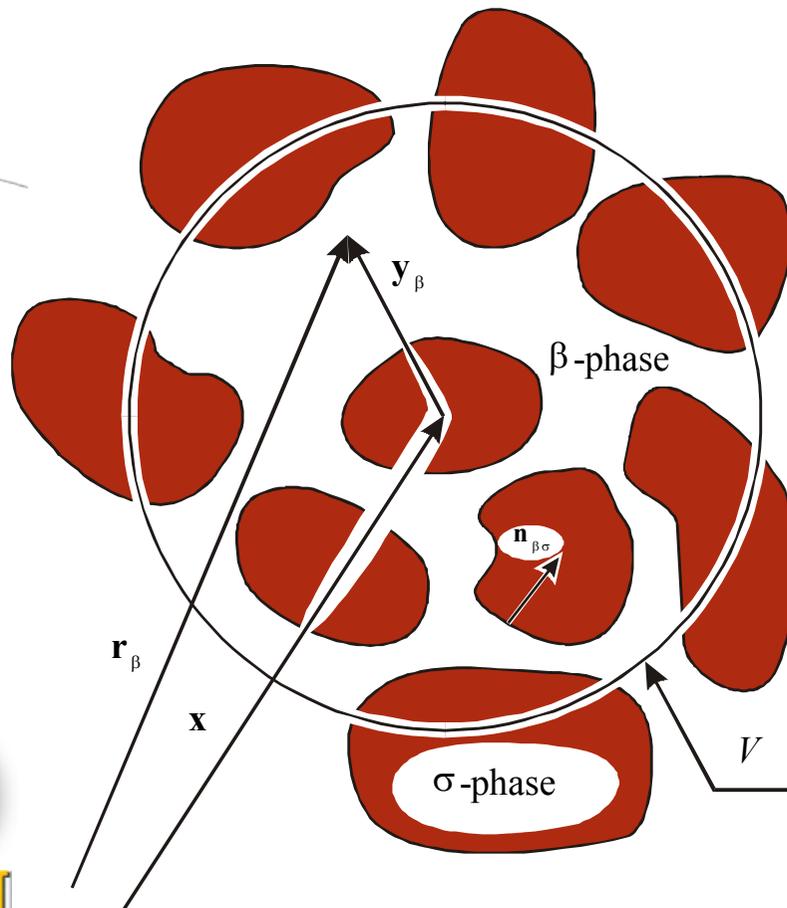
- **Phase gazeuse composée de 4 constituants**
  - $O_2$
  - Vapeur  $H_2O$
  - $CO_2$
  - $N_2$
- **Equilibre thermique local entre les deux phases, solide et gazeuse**

$$T_g = T_s = T$$



# ► Prise de moyenne volumique

- Toutes les grandeurs physiques moyennées sur un V.E.R. → milieu continu à l'échelle macroscopique



$$\langle \psi_\beta \rangle = \frac{1}{V} \int_{V_\beta} \psi_\beta(x+y) dV$$

$$\langle \psi_\beta \rangle = \varepsilon_\beta \langle \psi_\beta \rangle^\beta$$



Moyenne intrinsèque de phase

$$l \ll R_0 \ll L$$

## ► Modèle mathématique à l'échelle macroscopique

### • Cinétiques de biodégradation

- Cinétique des micro-organismes

$$\frac{dX(t)}{dt} = \mu_{opt}(T, C_{sH_2O}, C_{gO_2}) \cdot \frac{MB(t)}{K_B + MB(t)} \cdot X(t) - b(T) \cdot X(t)$$

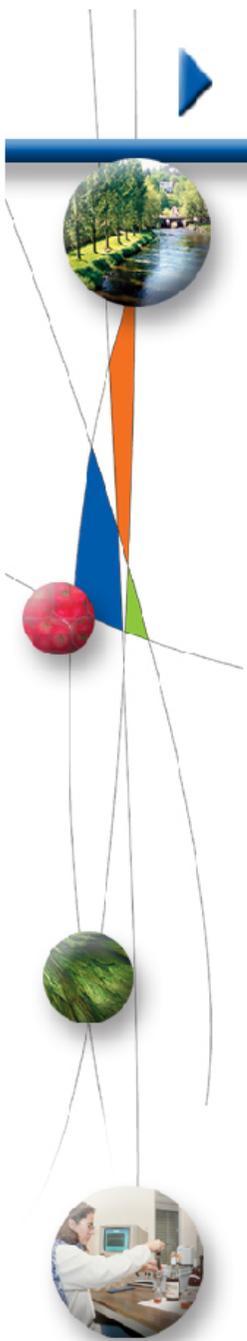
- Cinétiques de consommation d'oxygène

$$R_{O_2} = \left[ \frac{1-Y}{Y} \cdot \mu_{opt}(T, C_{sH_2O}, C_{gO_2}) \cdot \frac{MB(t)}{K_b + MB(t)} X(t) + b(T) \cdot (1-f) \cdot X(t) \right] \times M_{O_2}$$

- Cinétiques de dégradation du substrat organique

❖ Substrat directement biodégradable

$$\frac{dMB(t)}{dt} = -\frac{1}{Y} \cdot \mu_{opt}(T, C_{sH_2O}, C_{gO_2}) \cdot \frac{MB(t)}{K_b + MB(t)} X(t) + K_h(T) \cdot \frac{\frac{MH(t)}{X(t)}}{K_{MH} + \frac{MH(t)}{X(t)}} X(t)$$



❖ Substrat biodégradable après hydrolyse

$$\frac{dMH(t)}{dt} = -K_h(T) \cdot \frac{MH(t)/X(t)}{K_{MH} + MH(t)/X(t)} X(t)$$

❖ Substrat inerte

$$\frac{dMI(t)}{dt} = b(T) \cdot f \cdot X(t)$$

➤ Production de dioxyde de carbone

$$R_{CO_2} = P_{CO_2} \cdot \frac{R_{O_2}}{M_{O_2}} \cdot M_{CO_2}$$

➤ Production d'eau

$$R_{H_2O} = P_{H_2O} \cdot \frac{R_{O_2}}{M_{O_2}} \cdot M_{H_2O}$$

➤ Consommation de matière sèche

$$R_{MS} = -C_{MS} \cdot R_{O_2}$$

# ► Equations de transferts de masse et de chaleur

- Equations de continuité pour les constituants de la phase gazeuse ( $i=O_2, CO_2, H_2O$ )

$$\varepsilon \rho_g \frac{\partial \Omega_{gi}}{\partial t} + \rho_g \bar{U}_g \cdot \bar{\nabla} \Omega_{gi} = \bar{\nabla} \cdot \left( \varepsilon \rho_g \bar{D}_{gi}^* \cdot \bar{\nabla} \Omega_{gi} \right) \pm R_i - \Omega_{gi} \sum_{i \in g} R_i \quad (1)$$

$$\Omega_{gN_2} = 1 - \left( \Omega_{gO_2} + \Omega_{gCO_2} + \Omega_{gH_2O} \right) \quad (2)$$

Termes réactifs

- Equations de continuité pour les constituants de la phase solide

► Pour l' $H_2O$

$$(1 - \varepsilon) \frac{\partial \rho_{sH_2O}}{\partial t} = R_{H_2O} - \dot{m}_{gsH_2O}, \text{ avec } \rho_{sH_2O} = \Omega_{sH_2O} \rho_s$$

► Pour la matière sèche

$$(1 - \varepsilon) \frac{\partial \rho_{sMS}}{\partial t} = -R_{MS}, \text{ avec } \rho_{sMS} = \Omega_{sMS} \rho_s$$



- **Equation de Darcy**

$$\bar{U}_g = -\frac{K}{\mu_g} (\bar{\nabla} P_g - \rho_g \bar{g})$$

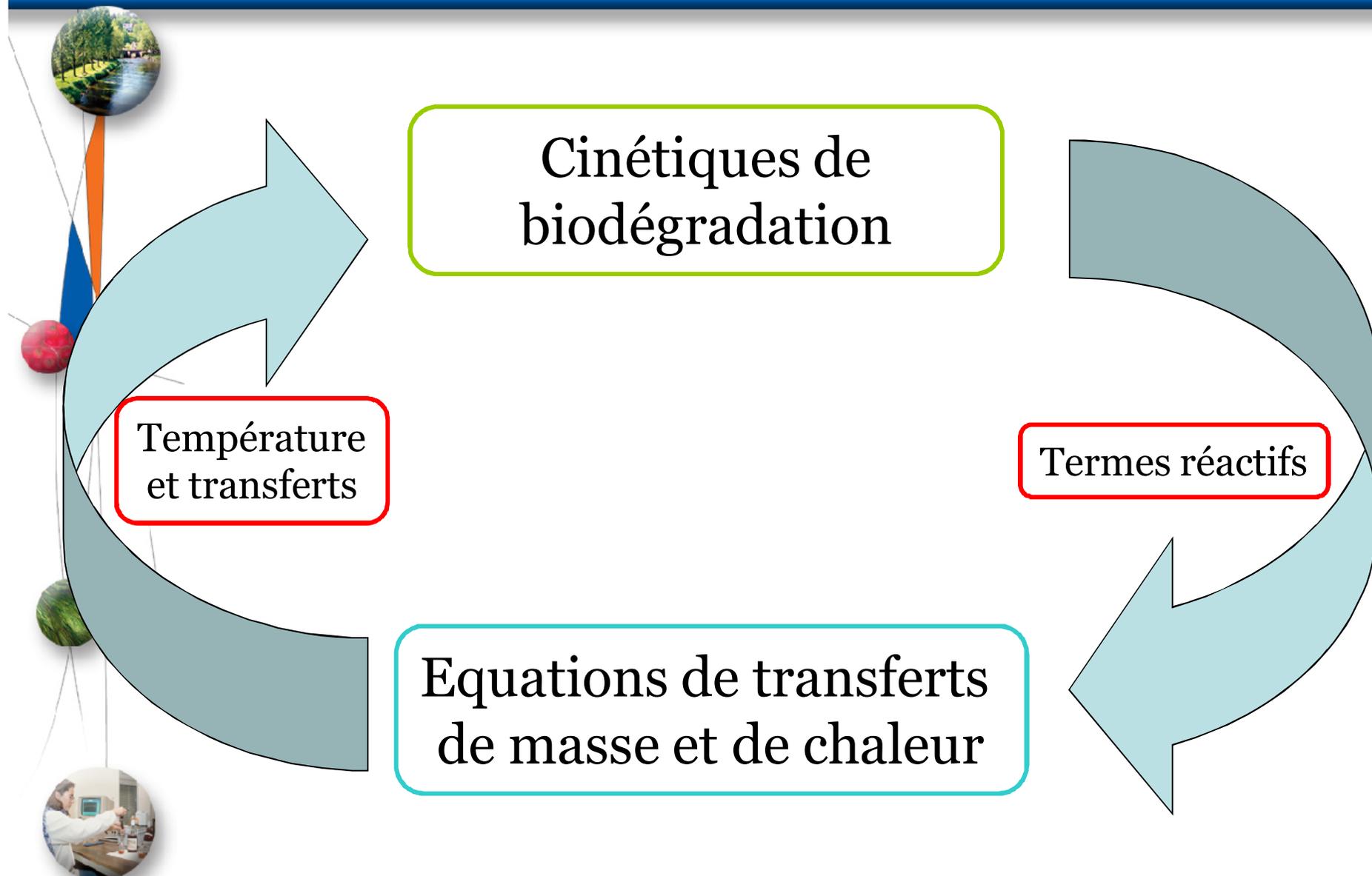
- **Equation de conservation de l'énergie**

$$\begin{aligned} & \varepsilon \rho_g \sum_{i=1}^{N_i} C_{p_{gi}} \Omega_{gi} \frac{\partial T}{\partial t} + \varepsilon \rho_g T \sum_{i=1}^{N_i} C_{p_{gi}} \frac{\partial \Omega_{gi}}{\partial t} + T \left( \sum_{i=1}^{N_i} C_{p_{gi}} \Omega_{gi} \right) \frac{\partial (\varepsilon \rho_g)}{\partial t} + \\ & + (1 - \varepsilon) \sum_{k=1}^{N_k} C_{p_{sk}} \rho_{sk} \frac{\partial T}{\partial t} + (1 - \varepsilon) T \sum_{k=1}^{N_k} C_{p_{sk}} \frac{\partial \rho_{sk}}{\partial t} + \\ & + \left( \sum_{i=1}^{N_i} C_{p_{gi}} \Omega_{gi} \right) \rho_g \bar{U}_g \cdot \bar{\nabla} T + \rho_g T \sum_{i=1}^{N_i} C_{p_{gi}} (\bar{U}_g \cdot \bar{\nabla} \Omega_{gi}) + T \left( \sum_{i=1}^{N_i} C_{p_{gi}} \Omega_{gi} \right) \bar{\nabla} \cdot (\rho_g \bar{U}_g) = \\ & + \bar{\nabla} \cdot (\bar{\Lambda}_{eff} \cdot \bar{\nabla} T) + \Delta H_{O_2} R_{O_2} \end{aligned}$$

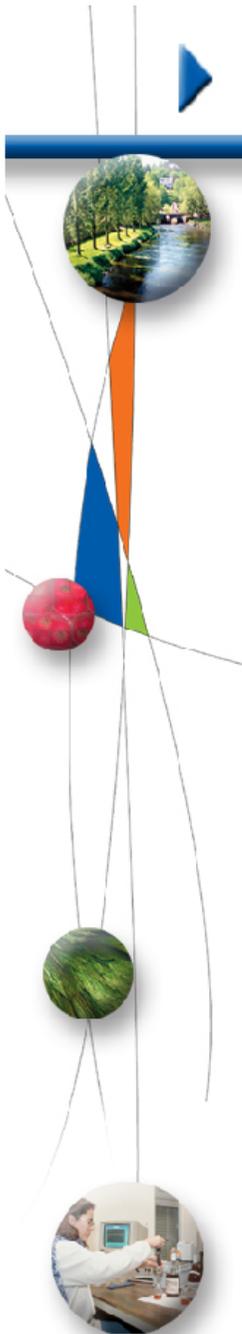
Termes réactifs

$$- \Delta H_{H_2O} \left[ \varepsilon \rho_g \frac{\partial \Omega_{gH_2O}}{\partial t} + \rho_g \bar{U}_g \cdot \bar{\nabla} \Omega_{gH_2O} - \bar{\nabla} \cdot \left( \varepsilon \rho_g \bar{D}_{gH_2O}^* \cdot \bar{\nabla} \Omega_{gH_2O} \right) + \Omega_{gH_2O} \sum_{i \in g} R_i \right]$$

## ► Schémas de principe du modèle mathématique



# Approche expérimentale



## ▶ Volet expérimental ; campagnes 1 et 2



### Type de substrat :

Substrat constitué d'un mélange de boue de station d'épuration et d'un structurant formé de déchets verts ayant déjà subi un ou plusieurs cycles de compostage.

Mélange réalisé suivant un rapport :

$$\frac{\text{Masse structurant}}{\text{Masse boue}} = 1.3$$

### Paramètres mesurés in situ :

- Suivi de température → Thermo-boutons
- Suivi en continu du CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>

### Traçages au CH<sub>4</sub> :

- Plusieurs traçages avec récupération du traceur en entrée de bouche d'aspiration et sur cloche de prélèvement



# ► Bilans matières campagnes 1 et 2

Campagne 1		Bio-séchage plus important					Pertes	
							% de la masse initiale	
Matière brute	T	-	97,12	-	59.36	37.76	38.9	
		54	52.44	79	46.89	5.55	10.58	
		46	44.68	21	12.47	32.21	72.1	
		82	48.25	88.2	42.3	5.95	12.33	
DCO	mgO2/g MS ou T O2					14.60	20.81	
CT	mgC/g MS ou T C				1.13	3.93	15.08	
NTK						0.345	2.65	

Campagne 2		Gestion du débit d'aération différente pour les deux campagnes					Pertes	
							% de la masse initiale	
Matière brute	T	-	123.2	-	83.43	39.77	32.3	
Matière sèche	% ou T	51	62.83	56.9	47.47	15.63	24.5	
Eau	% ou T	49	60.37	43.1	35.96	24.41	40.4	
Matière organique	% ou T	84.6	53.16	88	41.78	11.38	21.4	
DCO	mgO2/g MS ou T O2					22.25	25.5	
CT	mgC/g MS ou T C	518	32.55	513.9	24.4	8.15	25	
NTK	mgN/g MS ou T N	30.1	1.89	29	1.38	0.51	27.2	

Les pré-essais respirométriques :  
teneur en matière biodégradable  
de 30 à 40% de la DCO initiale

Seulement 50 à 65% du potentiel  
biodégradable

Gestion du débit d'aération différente  
pour les deux campagnes

65 à 85% du potentiel biodégradable

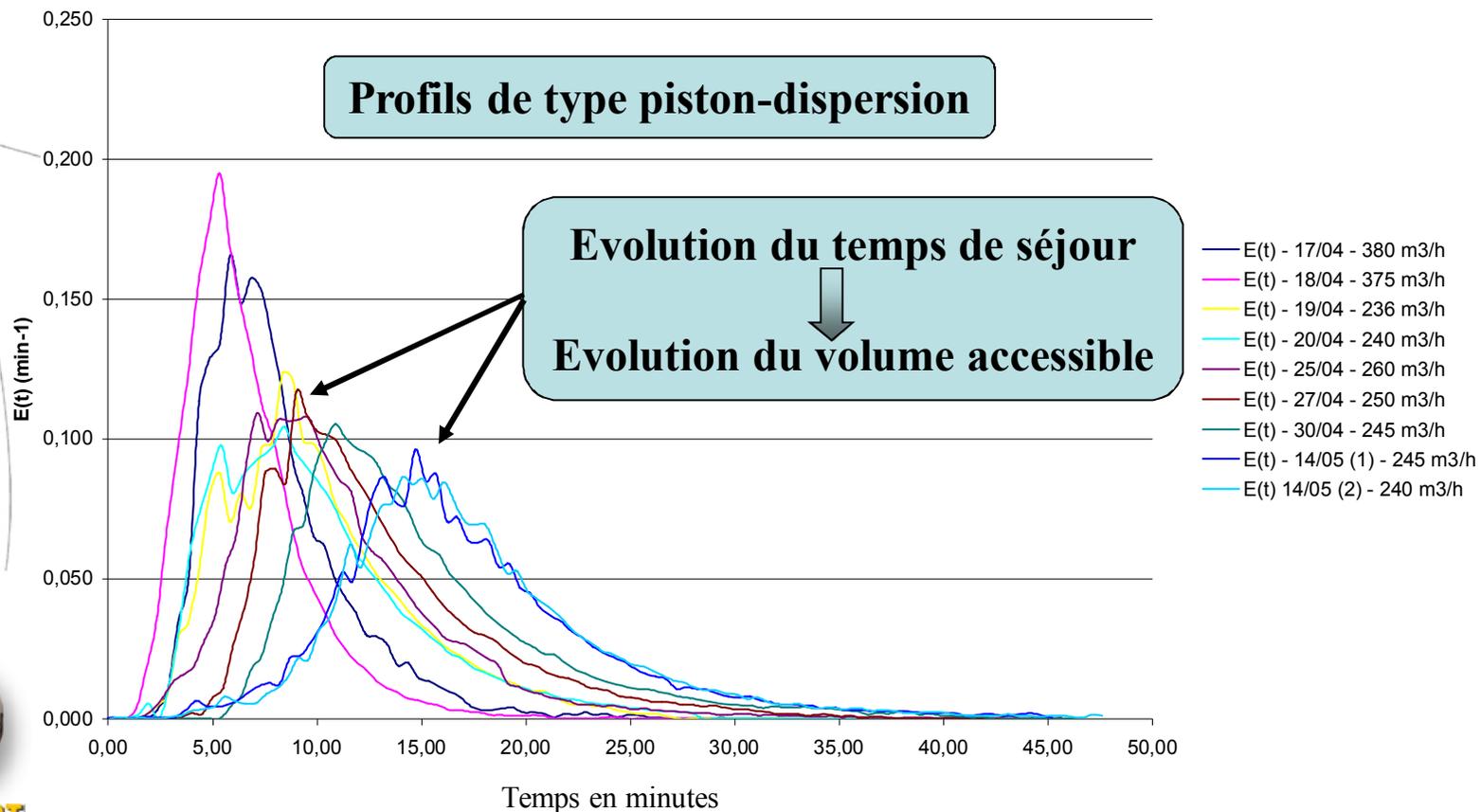
# ▶ Traçages campagne 2



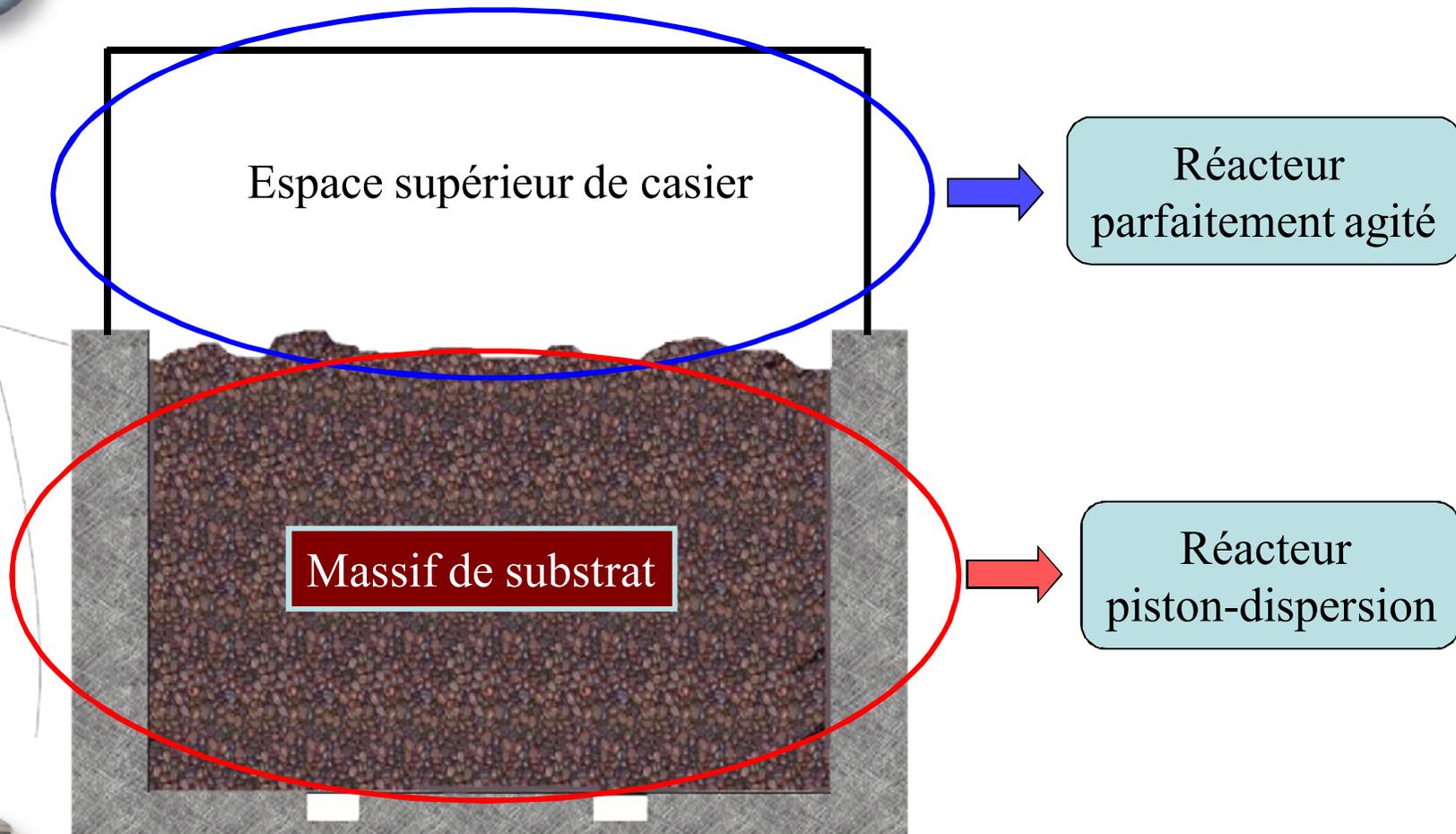
Récupération du traceur en entrée de bouche d'aspiration

Taux de récupération compris entre 60 et 160%

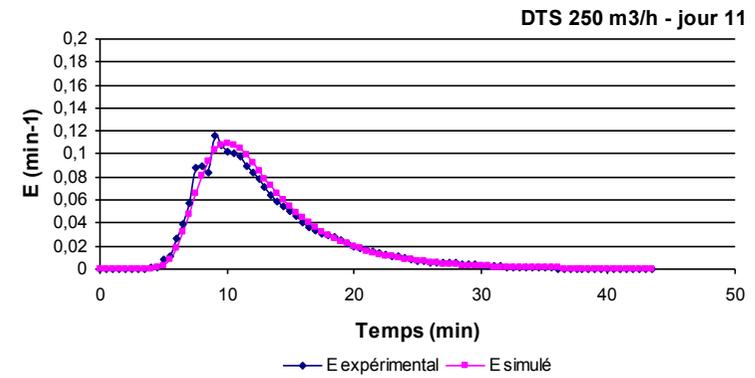
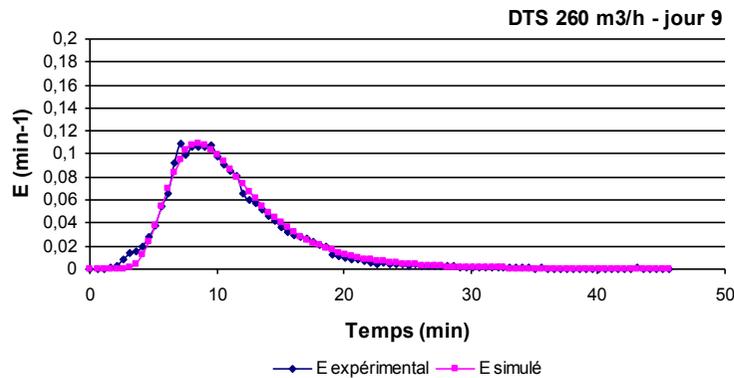
Evolution de la DTS



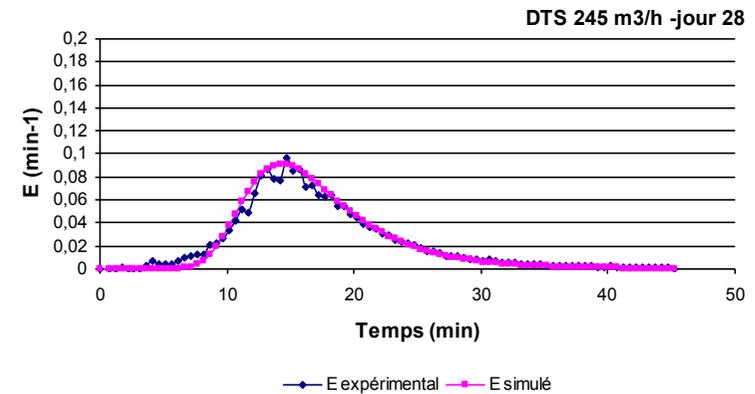
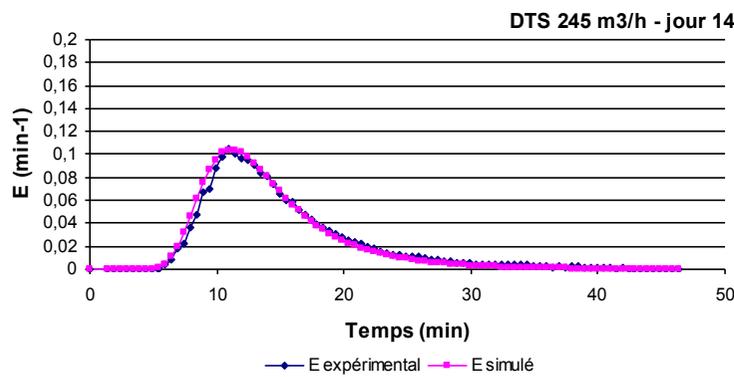
# ► Hypothèses de modélisation des courbes DTS



# ► Comparaison DTS expérimentales et modélisées



**Validation du modèle**



# ► Résultats de la modélisation

Volume théorique accessible au gaz :

$$V_{massif} = \{(18 \times 4 \times 2.5) - (2.5 \times 4)\} \times 0.3 = 51 m^3$$

Date de tracage	Débit aération	$t_1$ ajusté	Volume accessible au gaz (m3)	Surface accessible au gaz (m2)	Pe	D ajusté (m2/s)	D (m2/s)
				12.66	28	$7.4 \times 10^{-4}$	$4.3 \times 10^{-4}$
18/04 jour2	375	4.1	23.8				
19/04 jour3	240	6	24				
20/04 jour4	240	5.9	23.6				
25/04 jour9	260	6.7	29	11	20	$7.8 \times 10^{-4}$	$4.2 \times 10^{-4}$
27/04 jour11					40	$3.2 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$
30/04 jour14					40	$2.9 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$
14/05 jour28	245	12	49	19.6	40	$2.2 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$
14/05 jour28	240	12	48	19.2	36	$2.4 \times 10^{-4}$	$2.1 \times 10^{-4}$

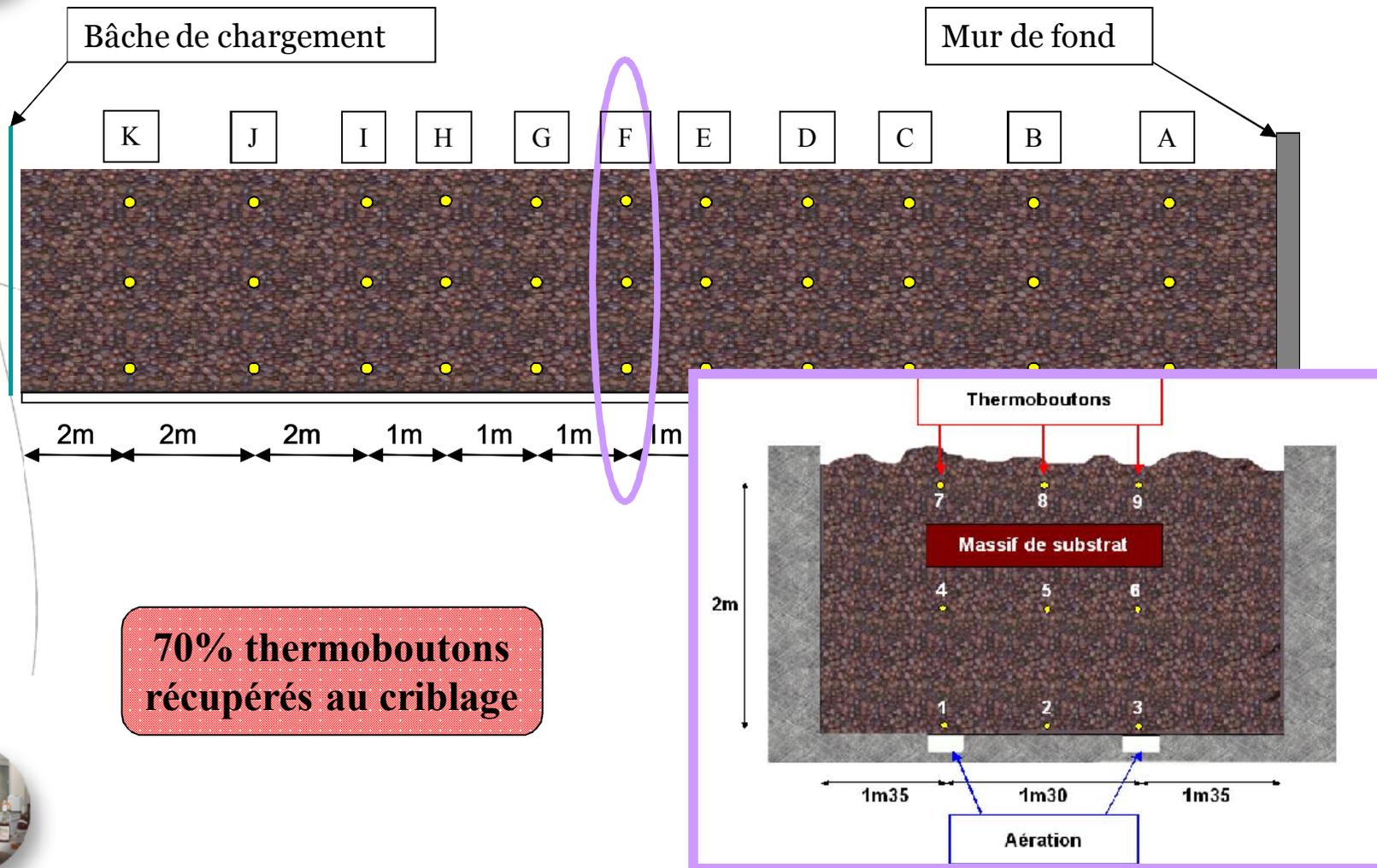
Portion de volume non soumise à l'aération en début de cycle

Homogénéisation structurale du massif  
Diminution de la dispersion mécanique

Ouverture des pores due à la biodégradation du substrat

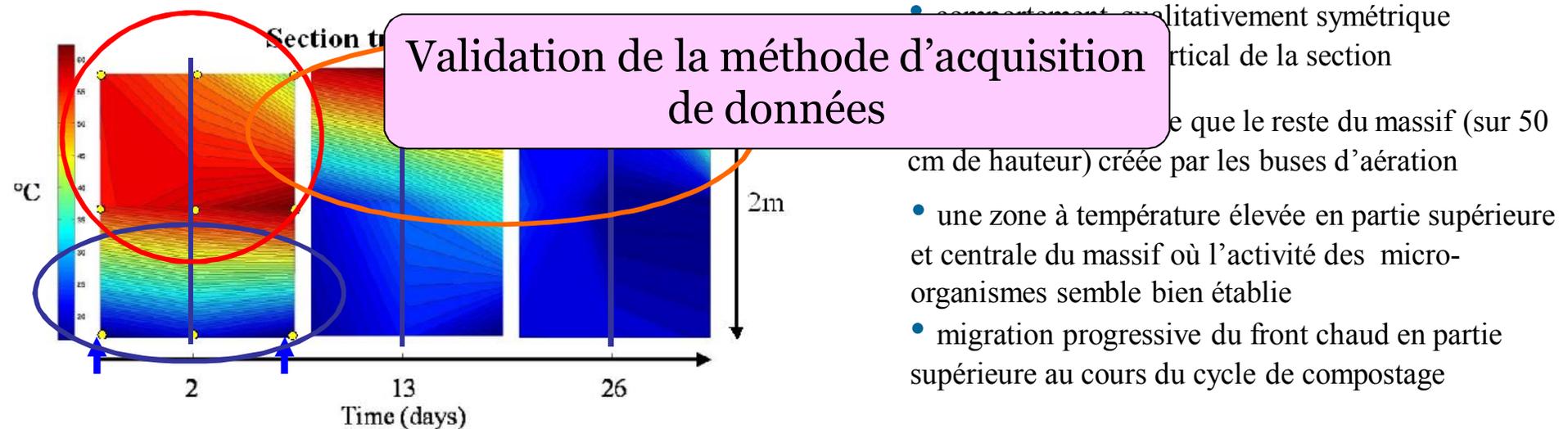
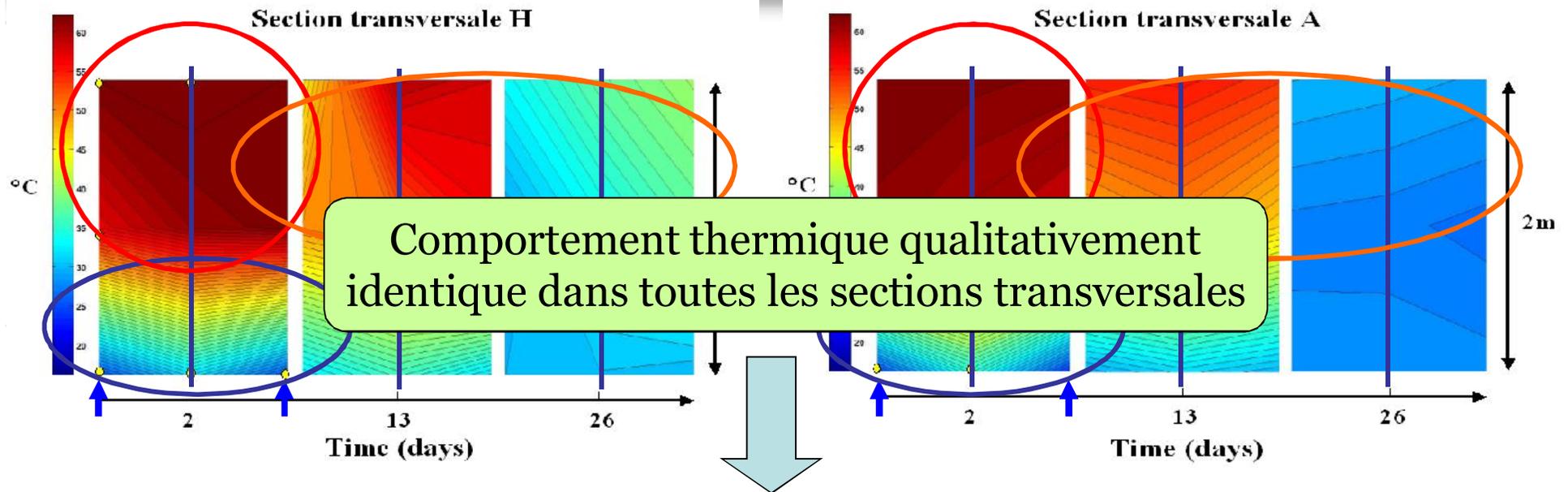
# ► Suivi de température campagne 1

## Onze sections transversales

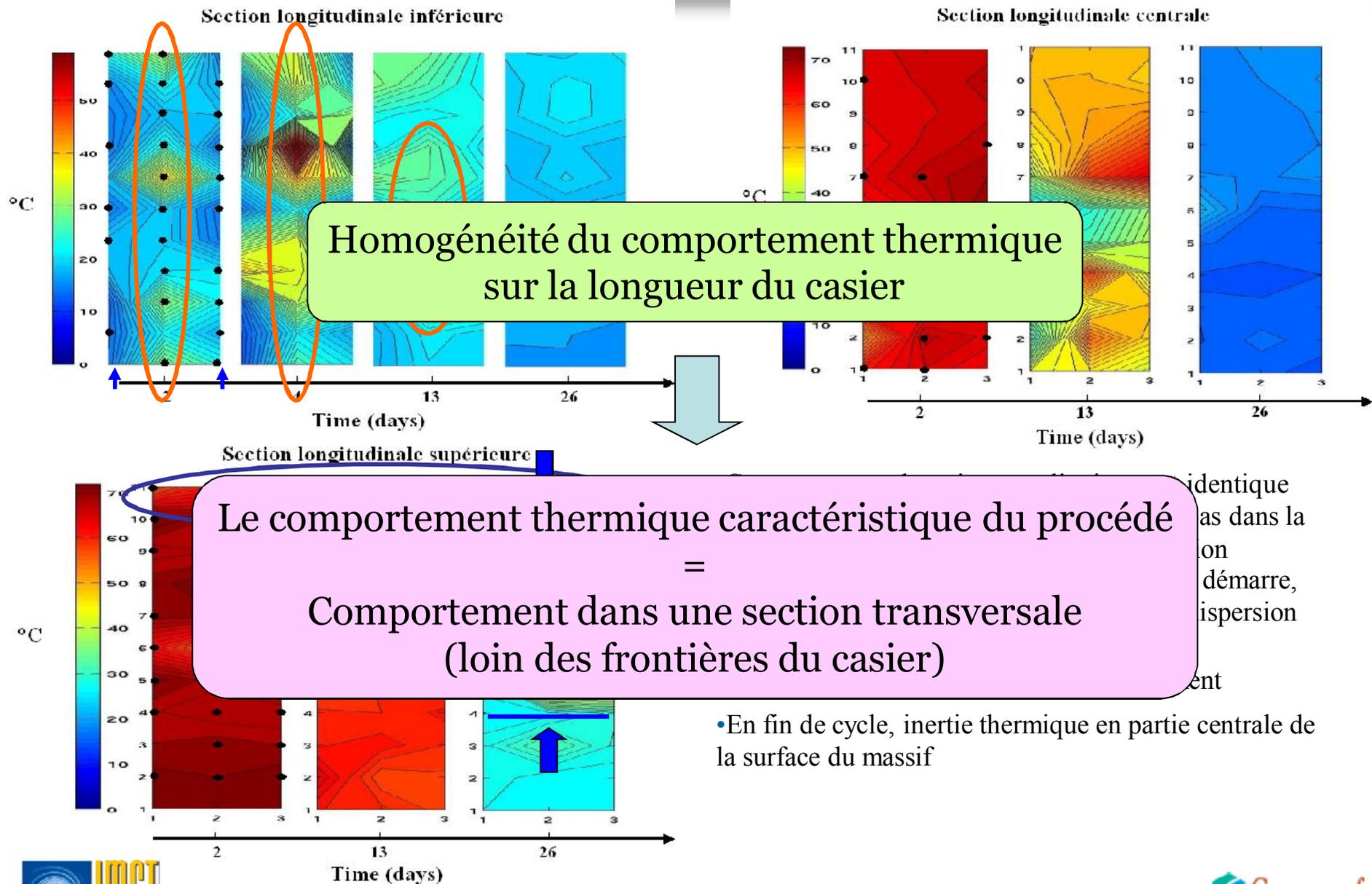


**70% thermoboutons  
récupérés au criblage**

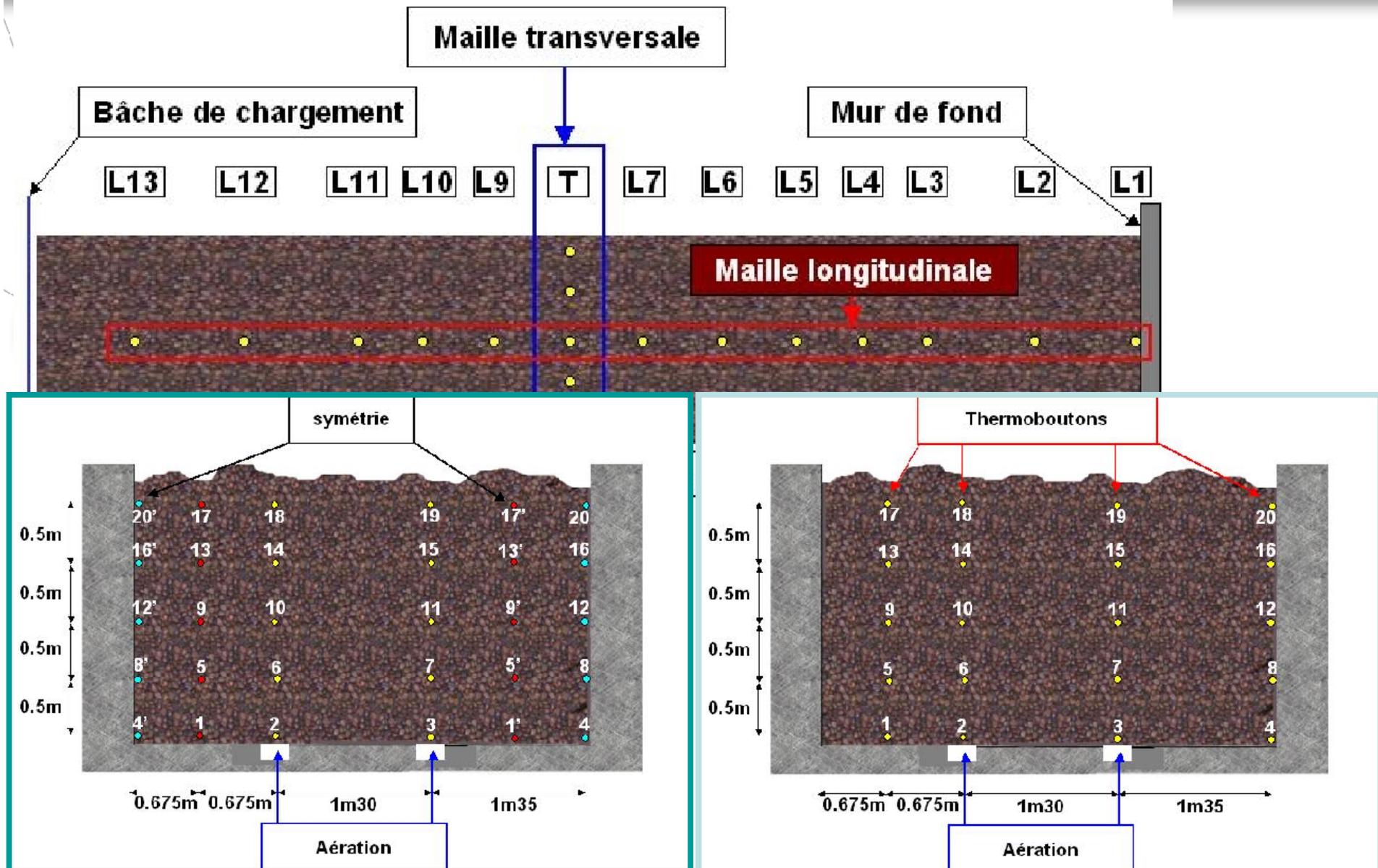
# ▶ Sections transversales campagne 1



# ▶ Sections longitudinales campagne 1

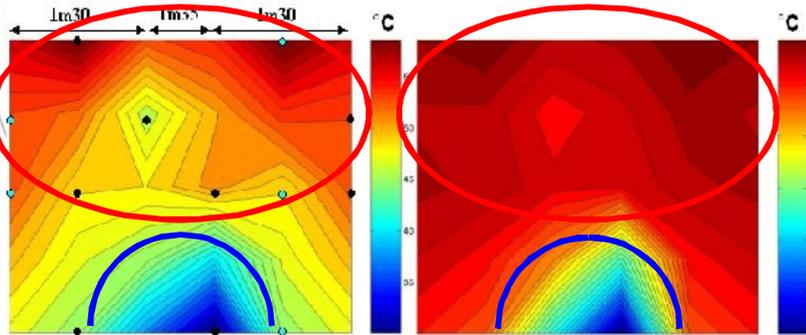


# ► Suivi de température campagne 2



# ► Sections transversales campagne 2

Section transversale reconstituée

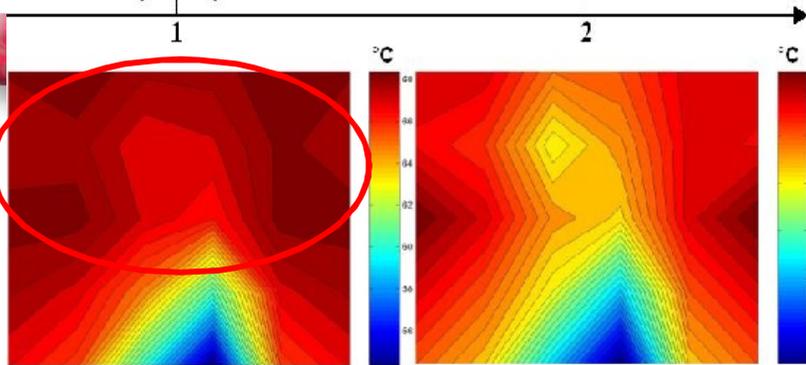


1er jour

$$Q_{aer} = 380 \text{ m}^3 / \text{h}$$

2e jour

$$Q_{aer} = 240 \text{ m}^3 / \text{h}$$

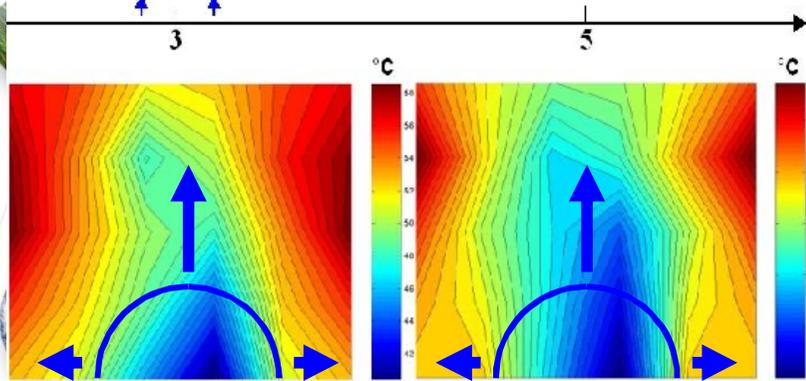


3e jour

$$Q_{aer} = 240 \text{ m}^3 / \text{h}$$

5e jour

$$Q_{aer} = 240 \text{ m}^3 / \text{h}$$



10e jour

$$Q_{aer} = 520 \text{ m}^3 / \text{h}$$

11e jour

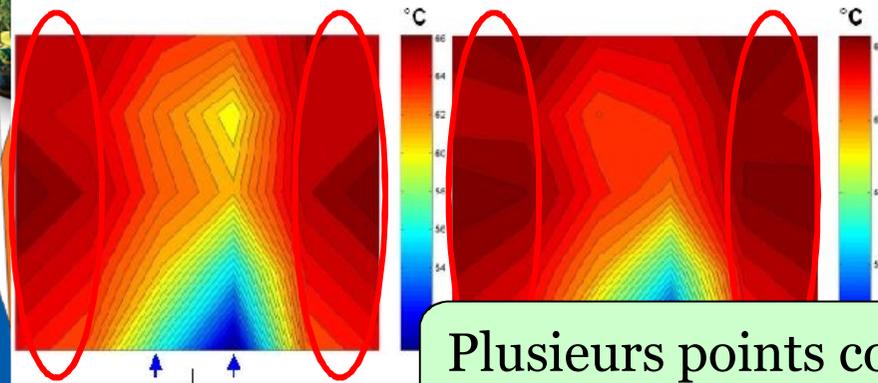
$$Q_{aer} = 240 \text{ m}^3 / \text{h}$$

- Comportement thermique caractéristique d'un cycle de compostage dans la partie supérieure et centrale de la section

- Zone plus froide que le reste du massif créée par les buses d'aération en partie inférieure

- Chute naturelle de la température dans la totalité de la section →  
Changement dans le comportement des micro-organismes

- Augmentation du débit →  
Propagation de la zone froide en partie supérieure de massif  
Dispersion verticale > dispersion horizontale

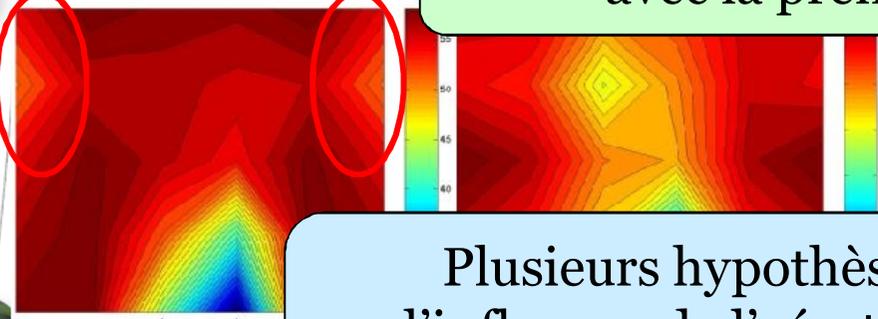


12e jour  
 $Q_{aer} = 240 \text{ m}^3 / \text{h}$

• Accumulation thermique aux parois

13e jour  
 $Q_{aer} = 240 \text{ m}^3 / \text{h}$

Plusieurs points communs sont observés avec la première campagne

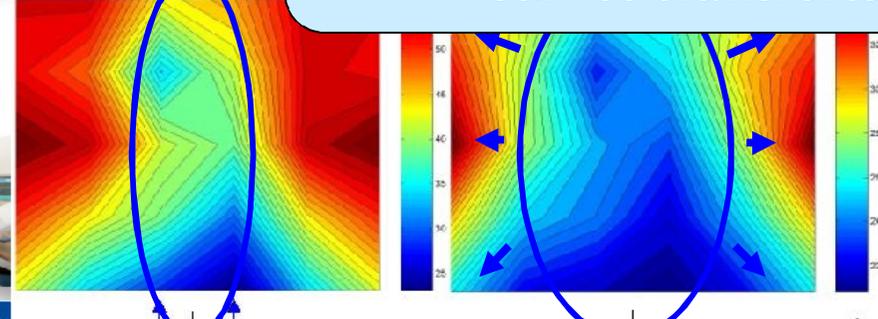


19e jour  
 $Q_{aer} = 240 \text{ m}^3 / \text{h}$

Diminution du transfert thermique à la paroi → Déchargement du casier voisin

24e jour

Plusieurs hypothèses peuvent être avancées sur l'influence de l'aération, sur l'influence du débit, et sur les transferts thermiques aux parois



28e jour après 17h00

$Q_{aer} = 930 \text{ m}^3 / \text{h}$

• Effet de l'augmentation de débit largement visible → Refroidissement global du massif de substrat

29e jour

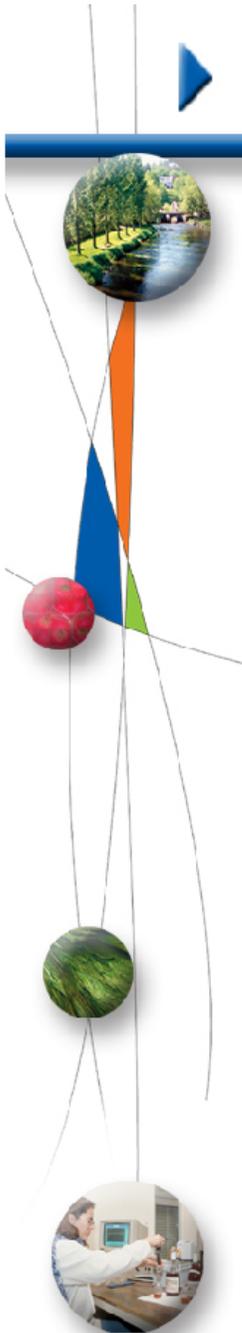
$Q_{aer} = 930 \text{ m}^3 / \text{h}$

Temps (jours)

## ▶ Conclusions sur les champs de température

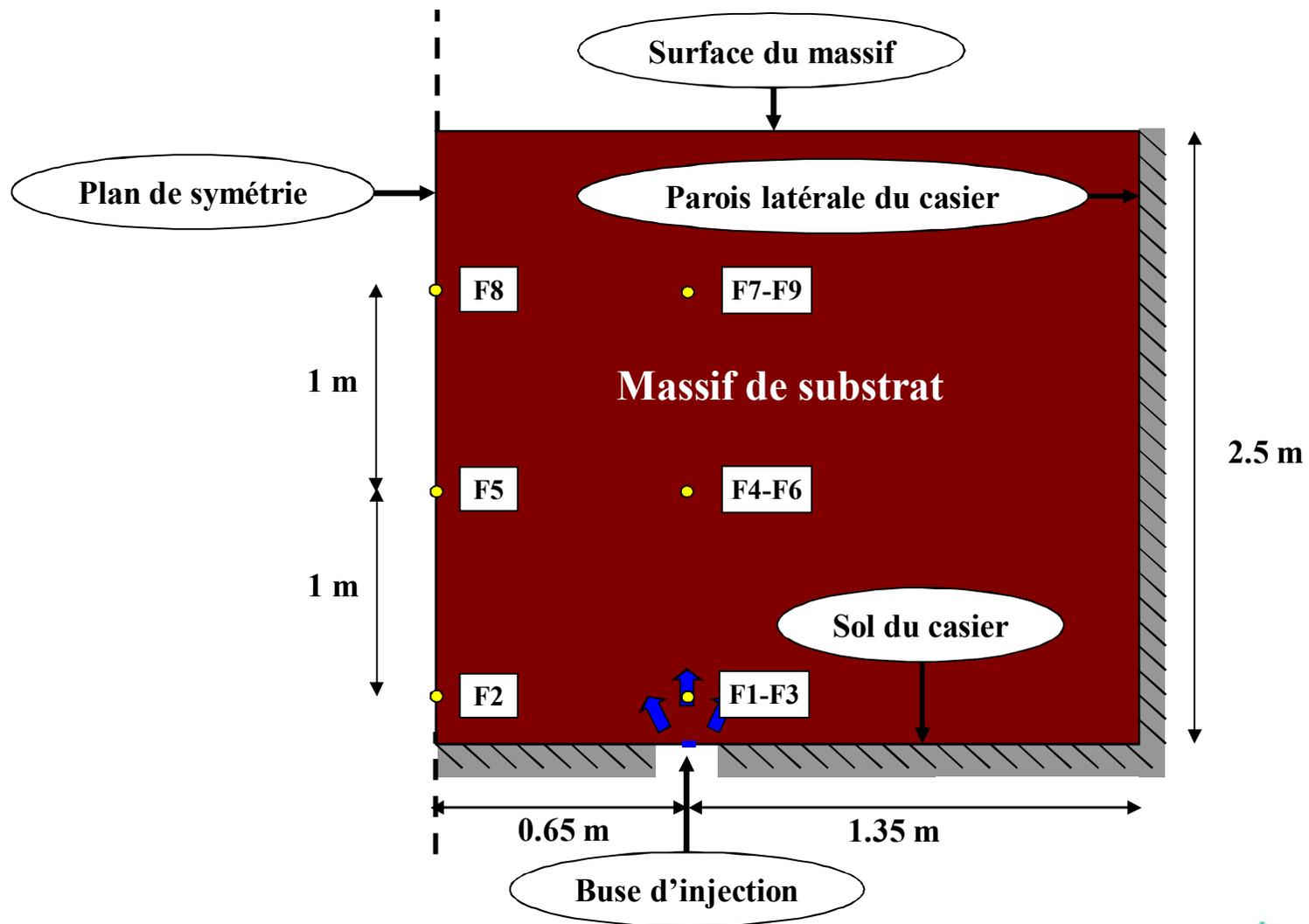
- Comportement thermique caractéristique du procédé peut être défini en première approximation comme étant le comportement dans une section transversale centrale
- Le comportement thermique est symétrique par rapport à l'axe central d'une section transversale
- Transfert thermique peu important aux parois du casier → conditions limites « isolation » dans le modèle numérique
- Proposition de perspectives d'optimisation du procédé :
  - Aération plus homogène du massif
  - Débit d'aération moins important pour prévenir l'apparition de zones « froides »
  - Préchauffage de l'air avant l'entrée dans le massif

# Approche numérique



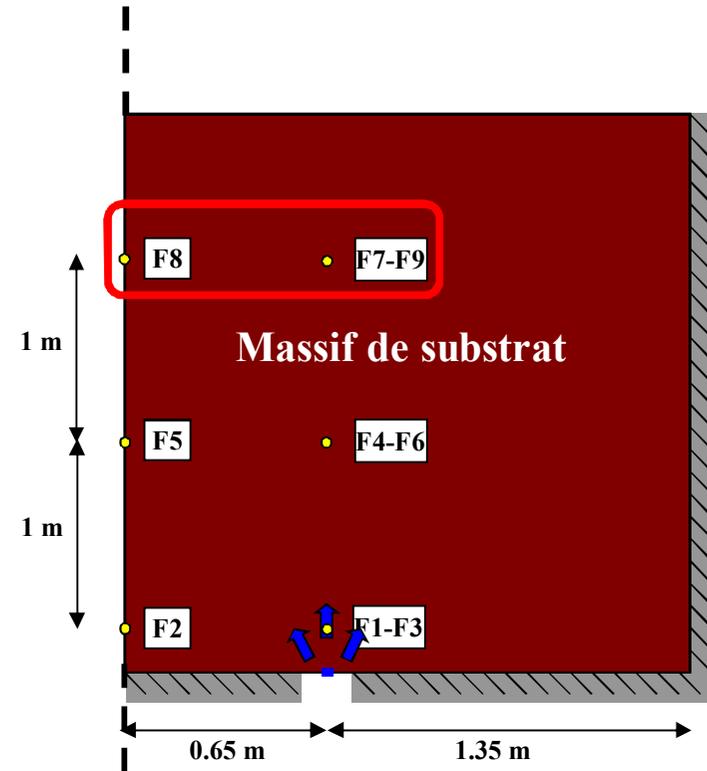
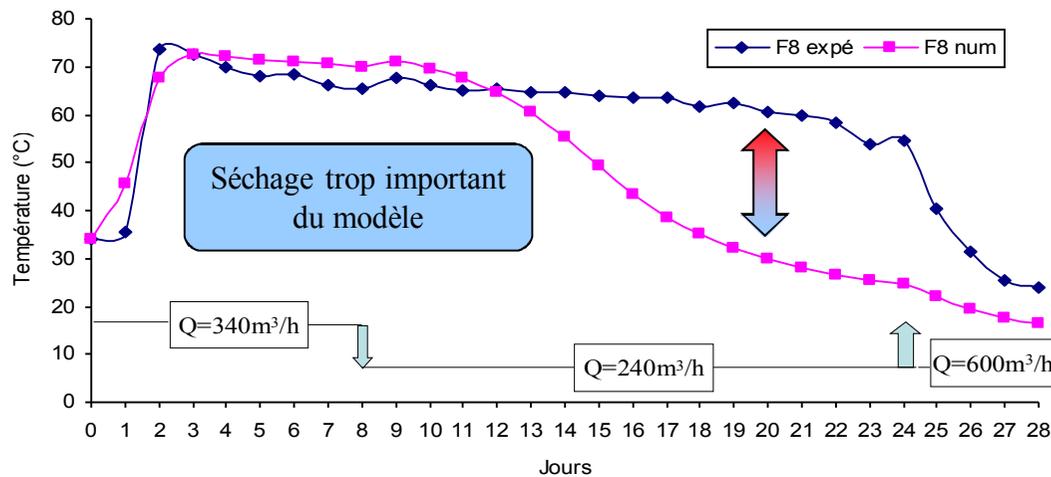
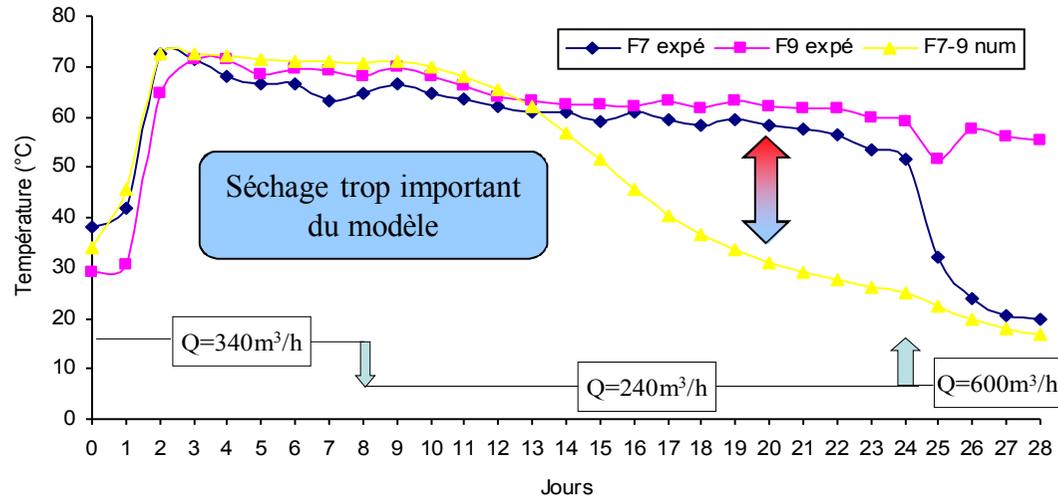
# ► Géométrie modélisée

Comportement thermique symétrique observé expérimentalement

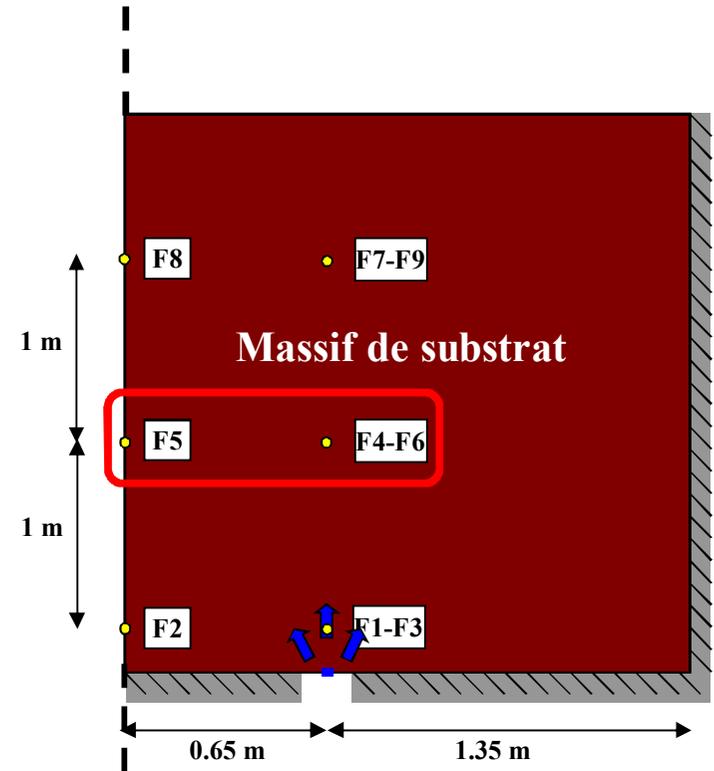
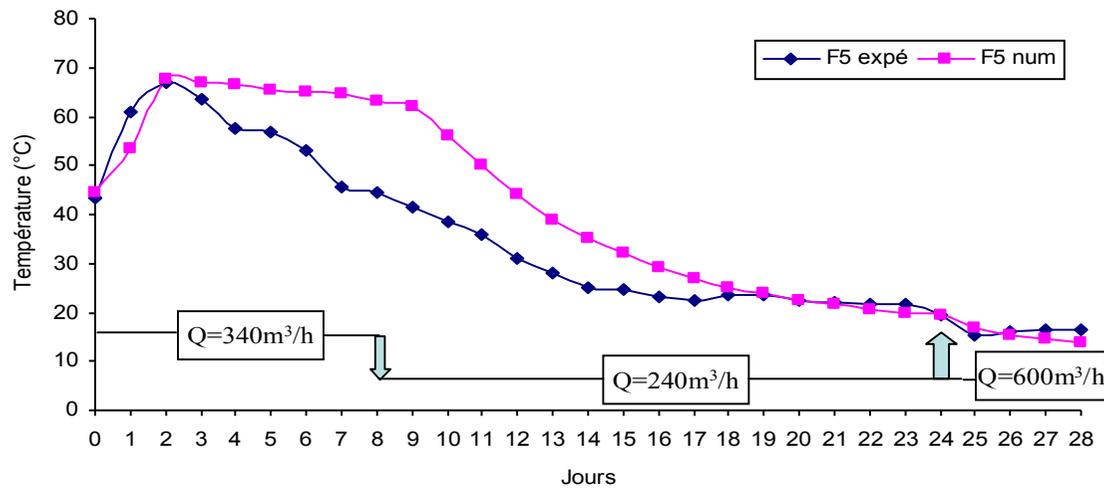
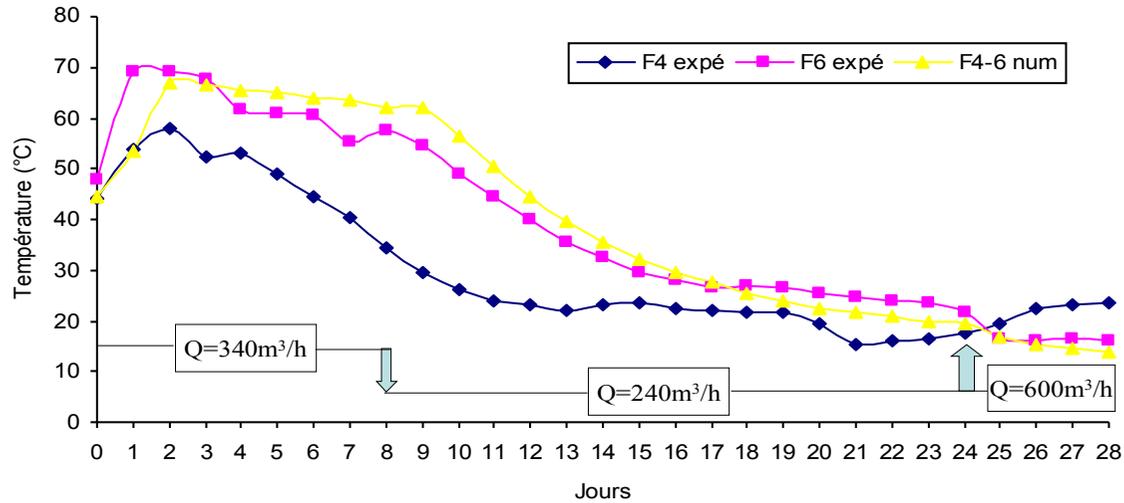


# ► Résultats de modélisation de la première campagne

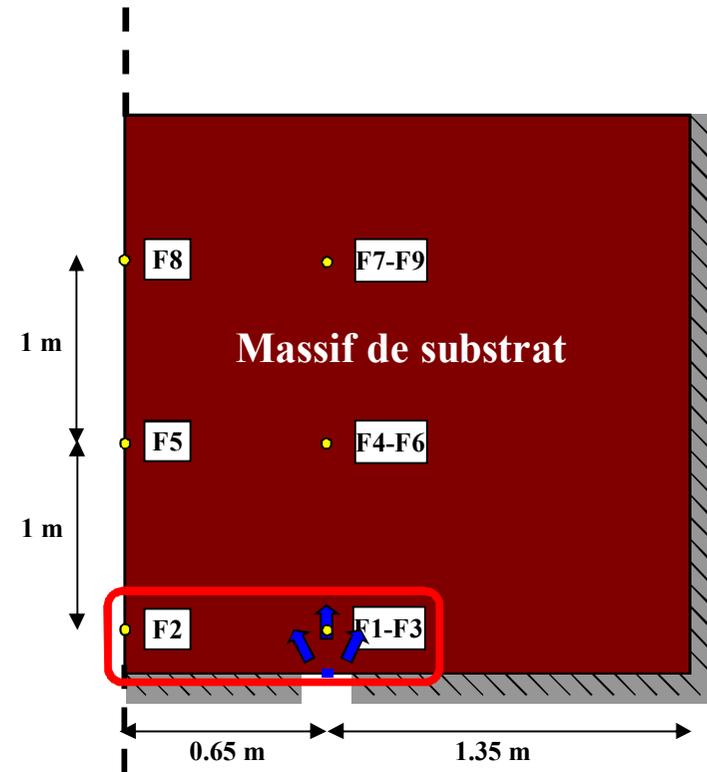
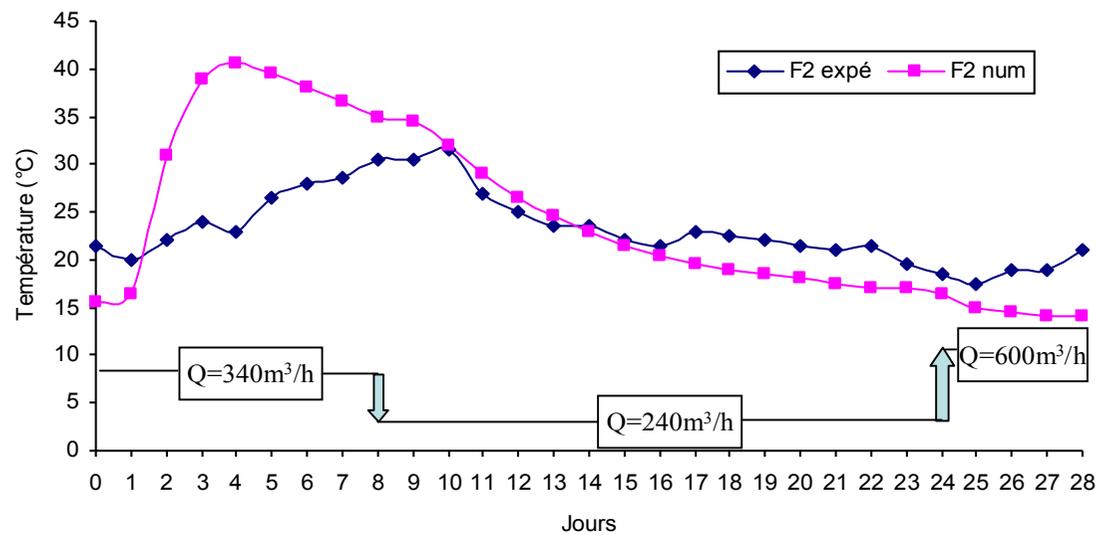
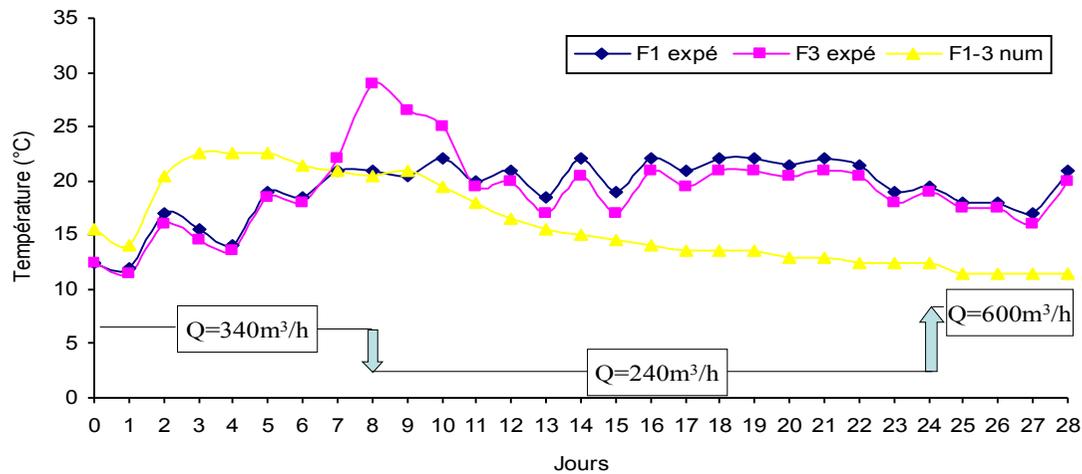
## Partie supérieure du massif de substrat



# Partie centrale du massif de substrat



## Partie inférieure du massif de substrat



# ► Bilan matière de SERPOT 1



## Campagne 1

		Mélange initial		Mélange final		Pertes	
		Concentration	masse	Concentration	masse	masse	% de la masse initiale
Matière brute	T	-	97,12	-	59.36	37.76	38.9
Matière sèche	% ou T	54	52.44	79	46.89	5.55	10.58
Eau	% ou T	46	44.68	21	12.47	32.21	72.1
Matière organique	% ou T	92	48.25	90.2	42.3	5.95	12.33
DCO	mgO <sub>2</sub> /g MS ou T O <sub>2</sub>	1346	70.59	1192	55.9	14.69	20.81
CT	mgC/g MS ou T C	497	26.07	472	22.13	3.93	15.08
NTK	mgN/g MS ou T C	24.8	1.301	27	1.266	0.345	2.65

	Bilans expérimentaux	Bilans numériques
Pertes MS (% de la masse initiale)	10.58	12.9
Pertes d'H <sub>2</sub> O (% de la masse initiale)	72.1	93



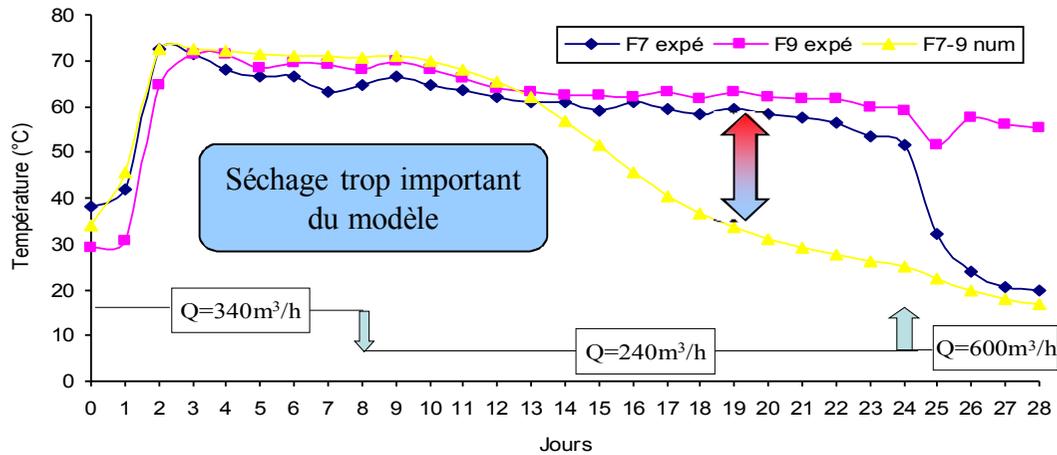
## ► Bilan thermique à faire



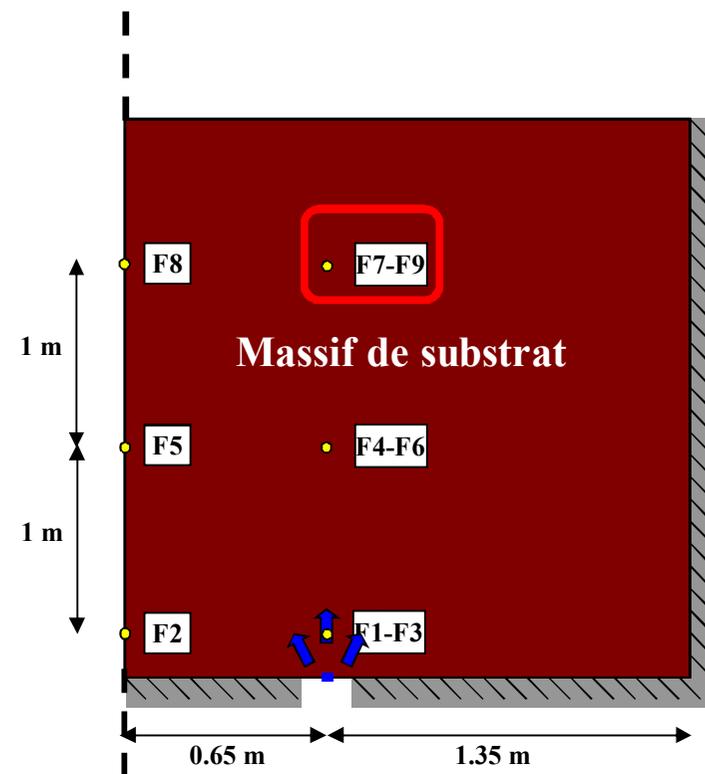
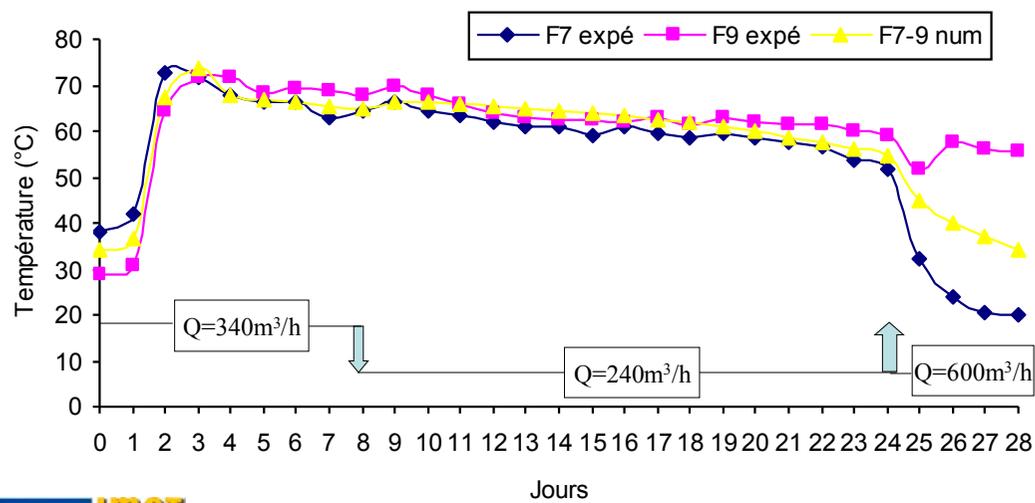
- TD à faire / personne
- Le 2/2/2015, rendre le rapport Bilan à Mme André (N7)
- Le 2/2/2015, rendre le rapport épandage à Mme Eftymiades
- Maximum 10 pages.



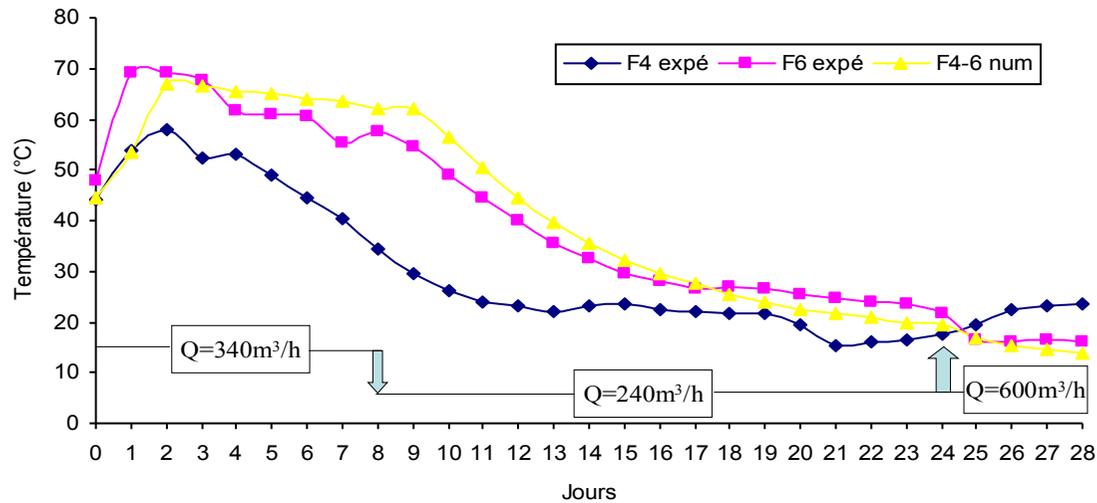
# Partie supérieure du massif de substrat



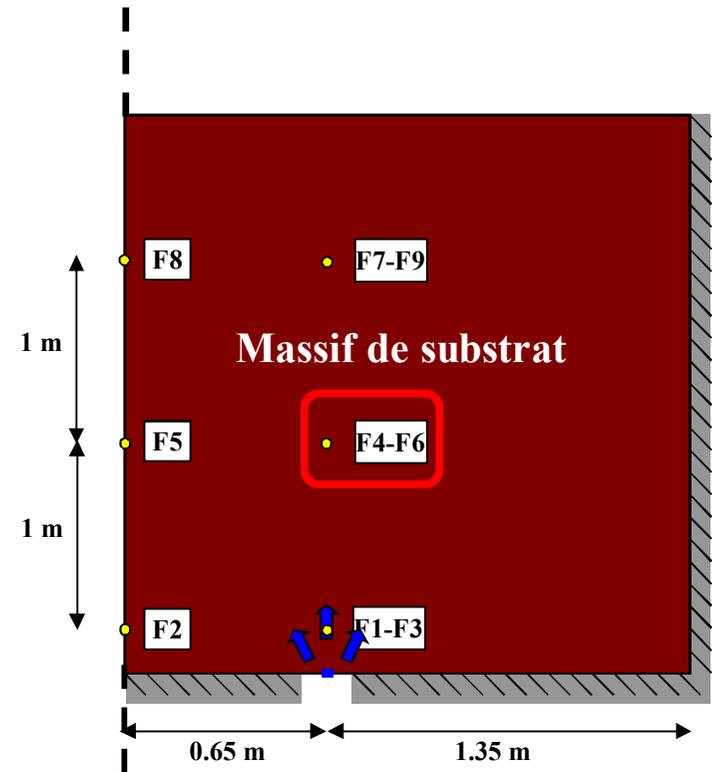
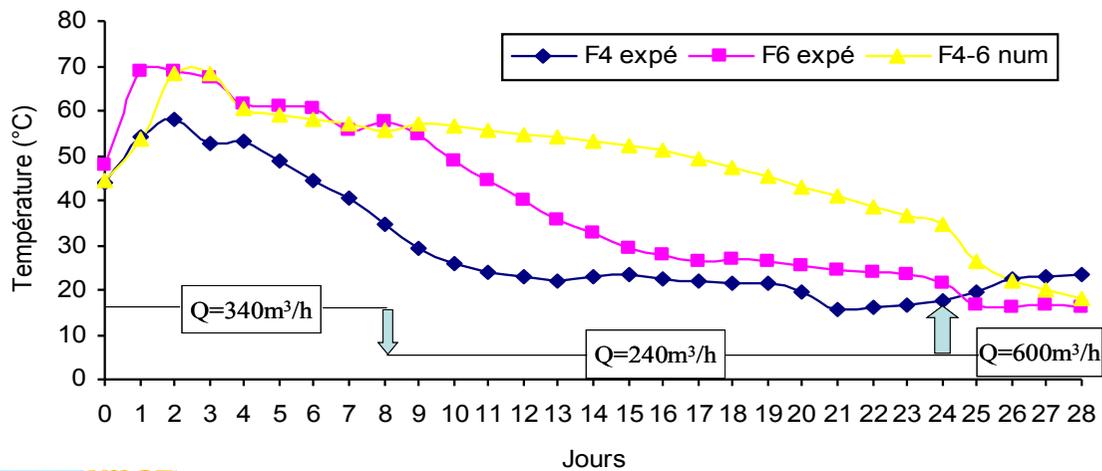
Prise en compte de l'évolution de l'enthalpie de consommation d'oxygène



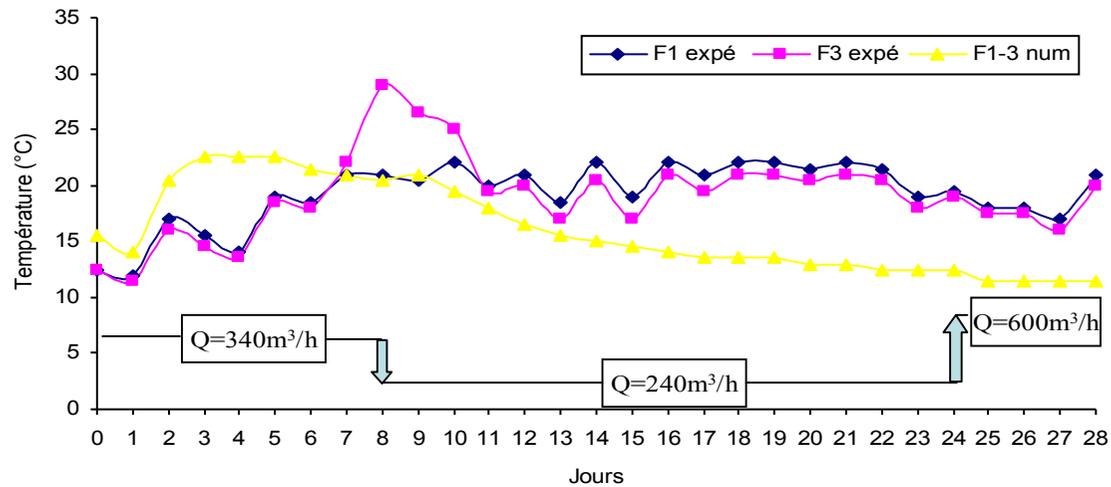
## Partie centrale du massif de substrat



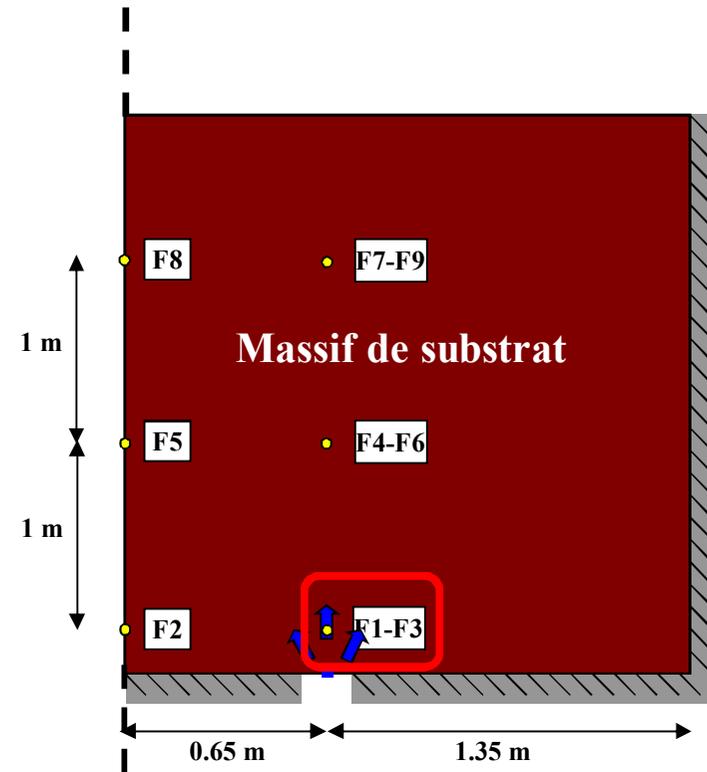
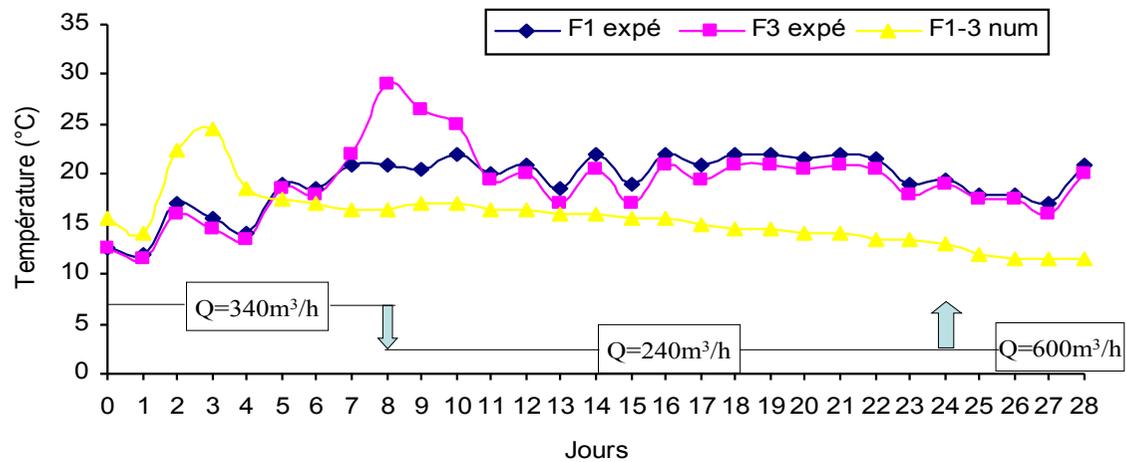
Prise en compte de l'évolution de l'enthalpie de consommation d'oxygène



## Partie inférieure du massif de substrat



Prise en compte de l'évolution de l'enthalpie de consommation d'oxygène



# ► Bilan matière de la première campagne

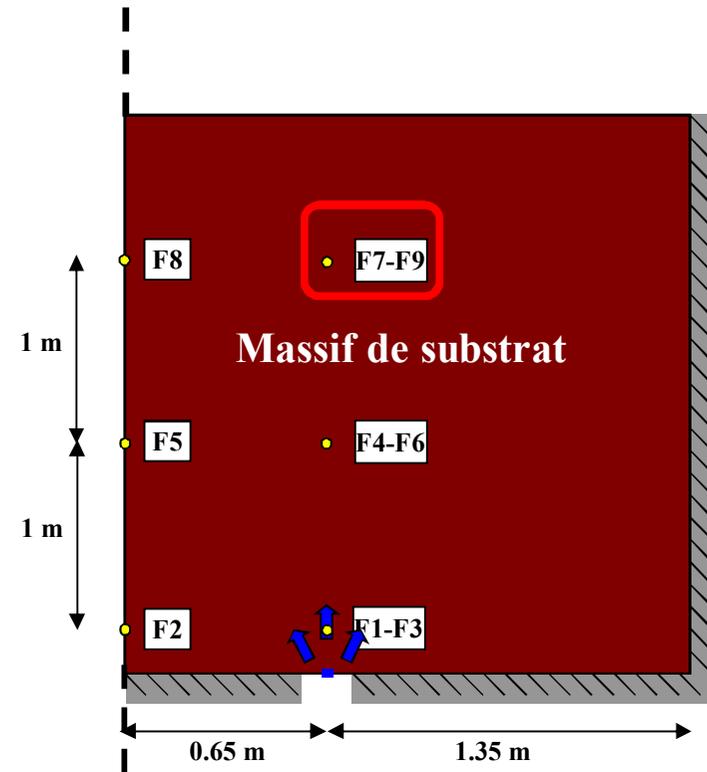
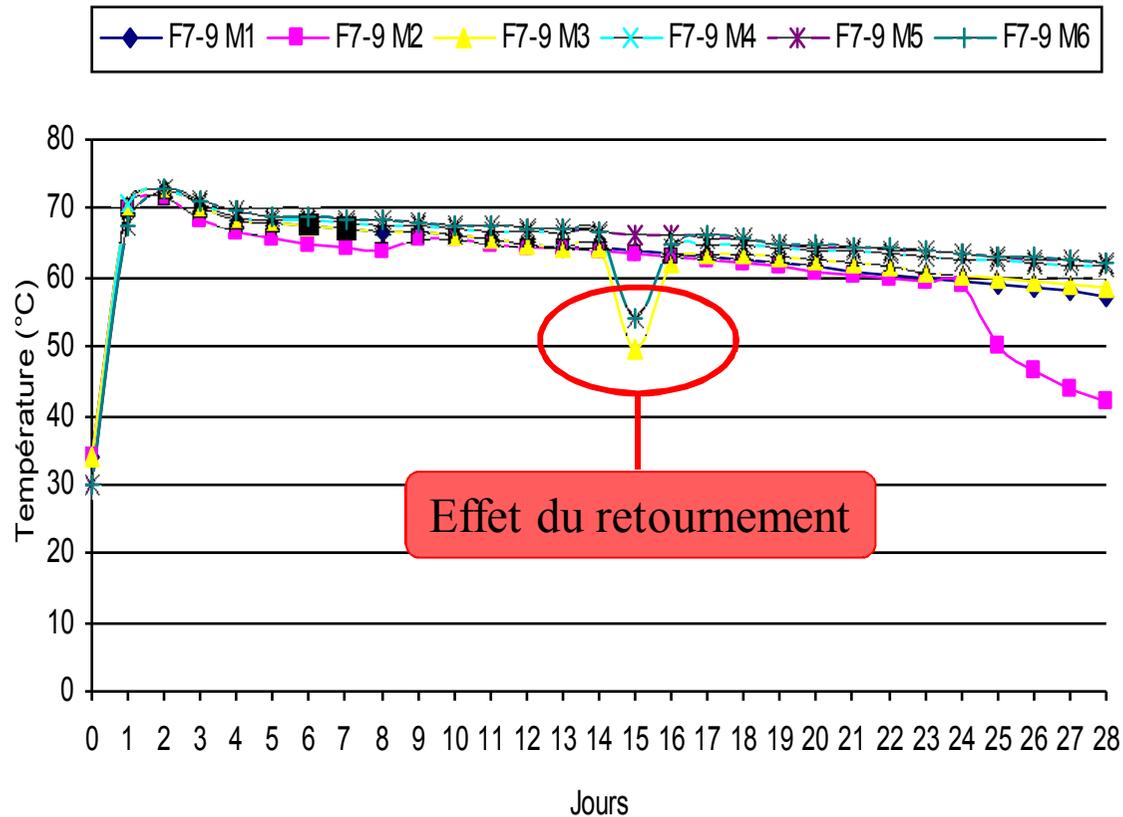
Campagne 1		Mélange initial		Mélange final		Pertes	
		Concentration	masse	Concentration	masse	masse	% de la masse initiale
Matière brute	T	-	97,12	-	59.36	37.76	38.9
Matière sèche	% ou T	54	52.44	79	46.89	5.55	10.58
Eau	% ou T	46	44.68	21	12.47	32.21	72.1
Matière organique	% ou T	92	48.25	90.2	42.3	5.95	12.33
DCO	mgO <sub>2</sub> /g MS ou T O <sub>2</sub>	1346	70.59	1192	55.9	14.69	20.81
CT	mgC/g MS ou T C	497	26.07	472	22.13	3.93	15.08
NTK	mgN/g MS ou T C	24.8	1.301	27	1.266	0.345	2.65

	Bilans expérimentaux	Bilans numériques
Pertes MS (% de la masse initiale)	10.58	20.5
Pertes d' $H_2O$ (% de la masse initiale)	72.1	73.5

# ► Résultats sur l'évolution de température



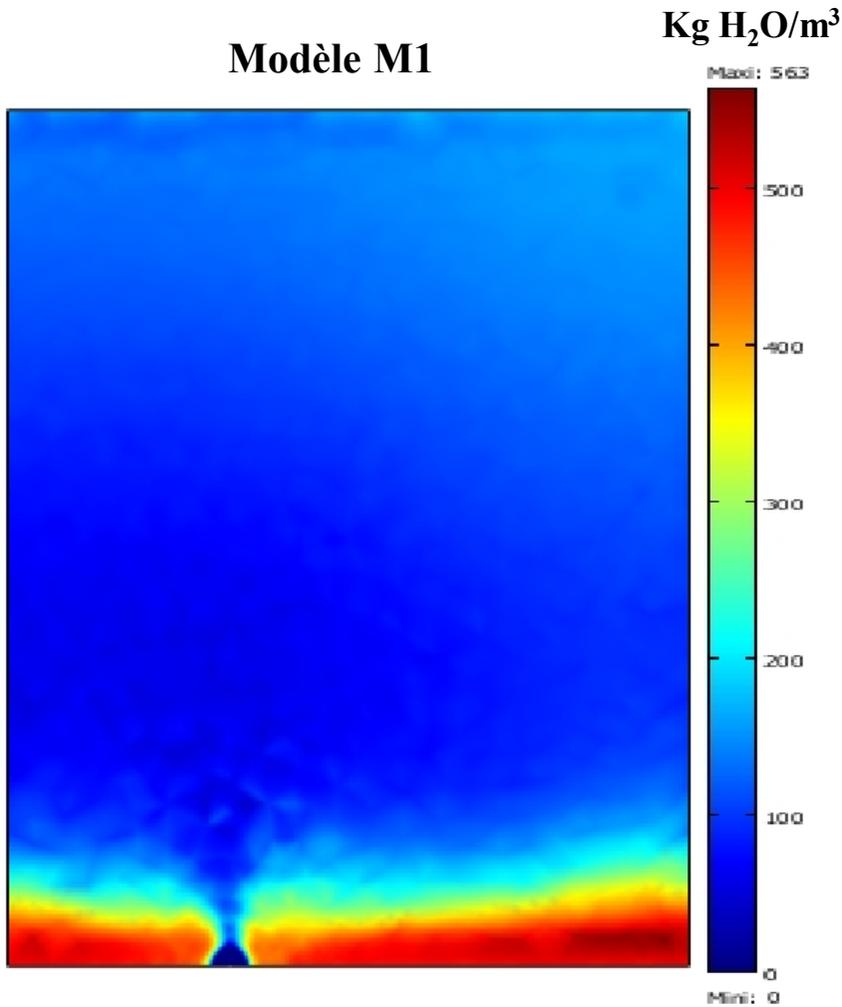
## Partie supérieure du massif de substrat



# ▶ Résultats sur le bio-séchage (effet du retournement)

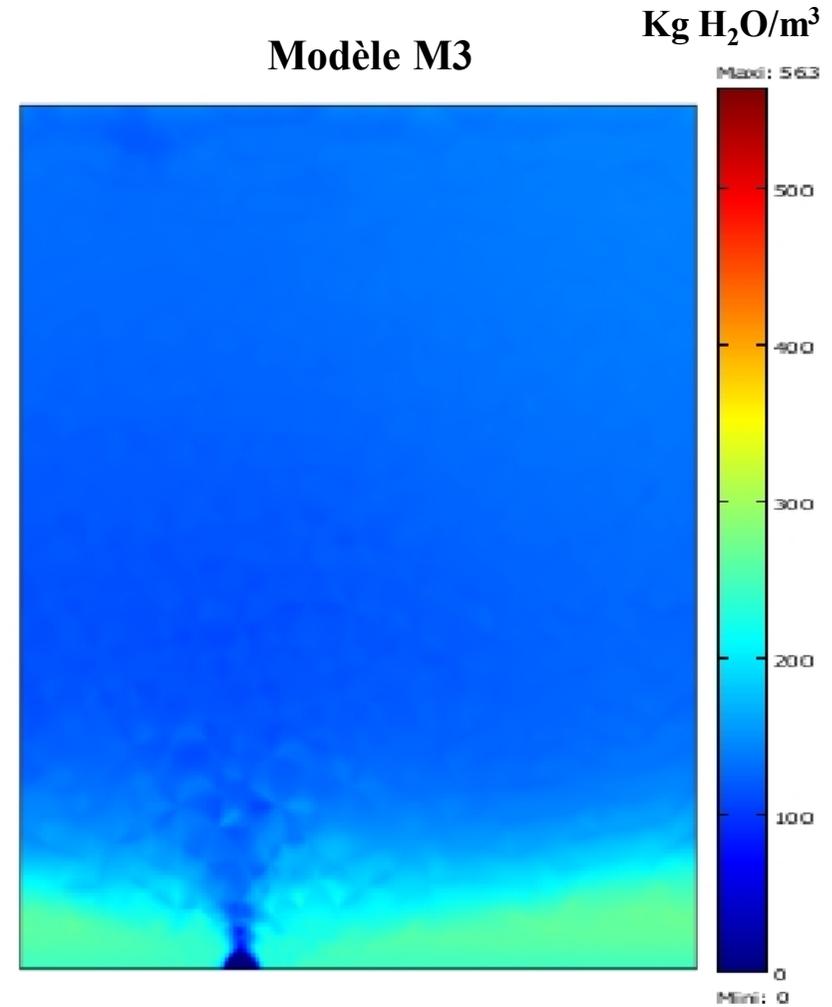
Sans retournement

Modèle M1



Avec retournement

Modèle M3

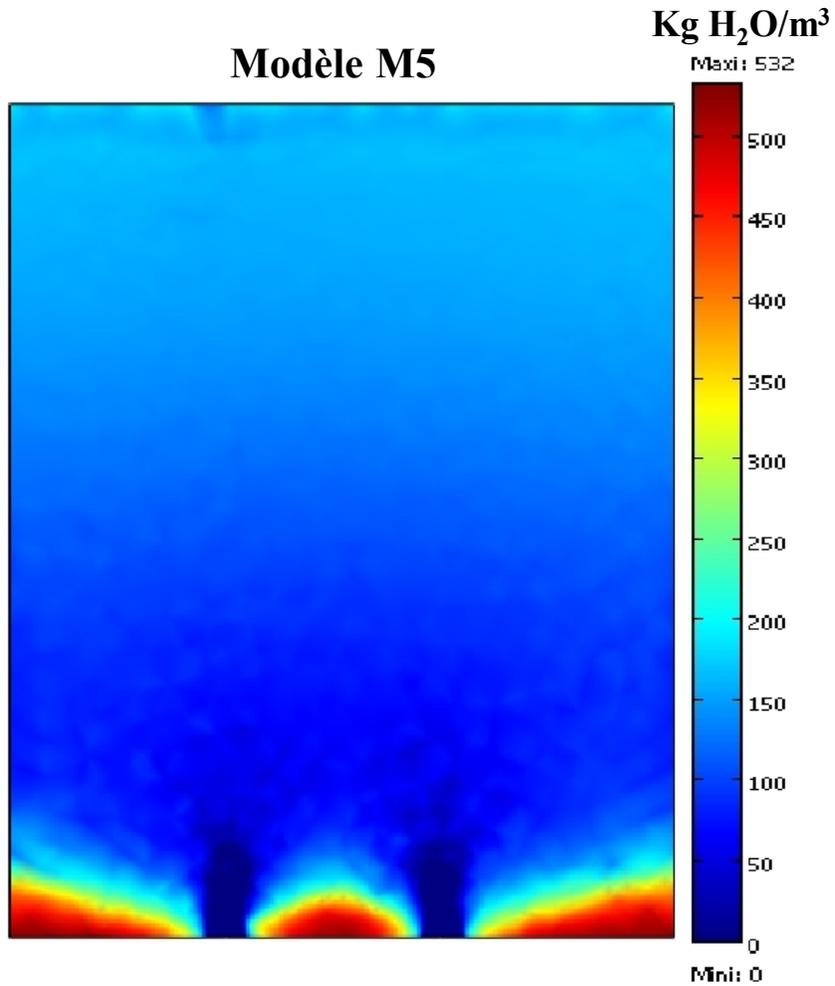




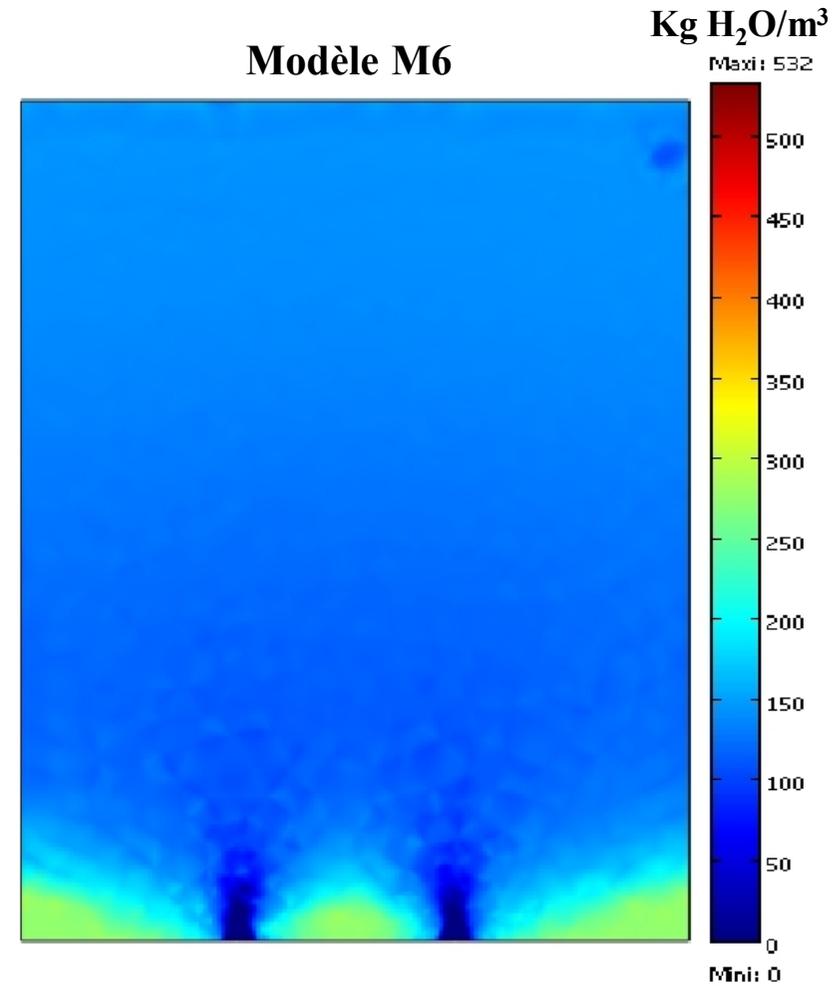
Sans retournement

Avec retournement

Modèle M5



Modèle M6





Peut-on utiliser cette énergie produite par l'activité bactérienne pour autre chose????

Connaissez-vous l'ordre de grandeur de cette énergie produite???

Peut-on l'estimer????

Bien sur... ☺