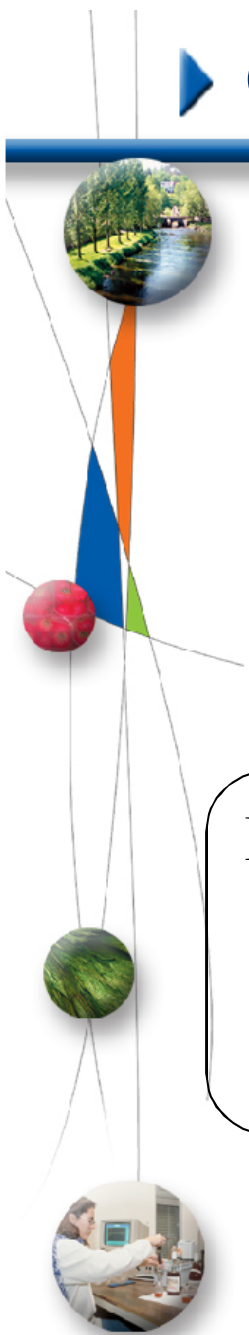




Caractérisation et modélisation des écoulements gazeux au cours du compostage de déchets organiques en taille réelle - Application à l'expertise et l'optimisation de procédés -

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

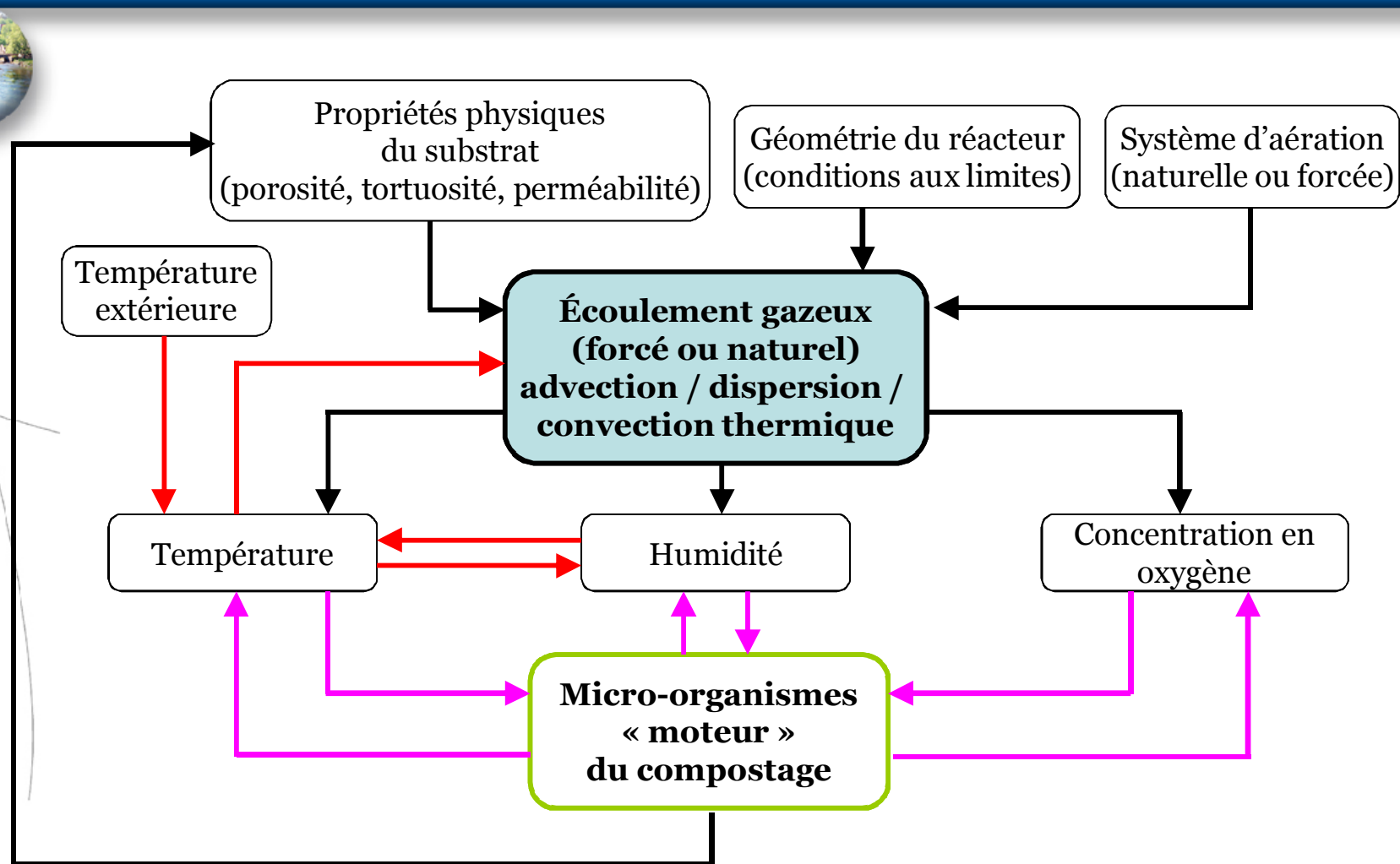
Oxygène dissout
en phase aqueuse

CO₂

Chaleur

H₂O

► Rôle de l'écoulement gazeux dans le compostage



Interactions d'origine physique

Interactions d'origine thermique

Interactions d'origine biochimique

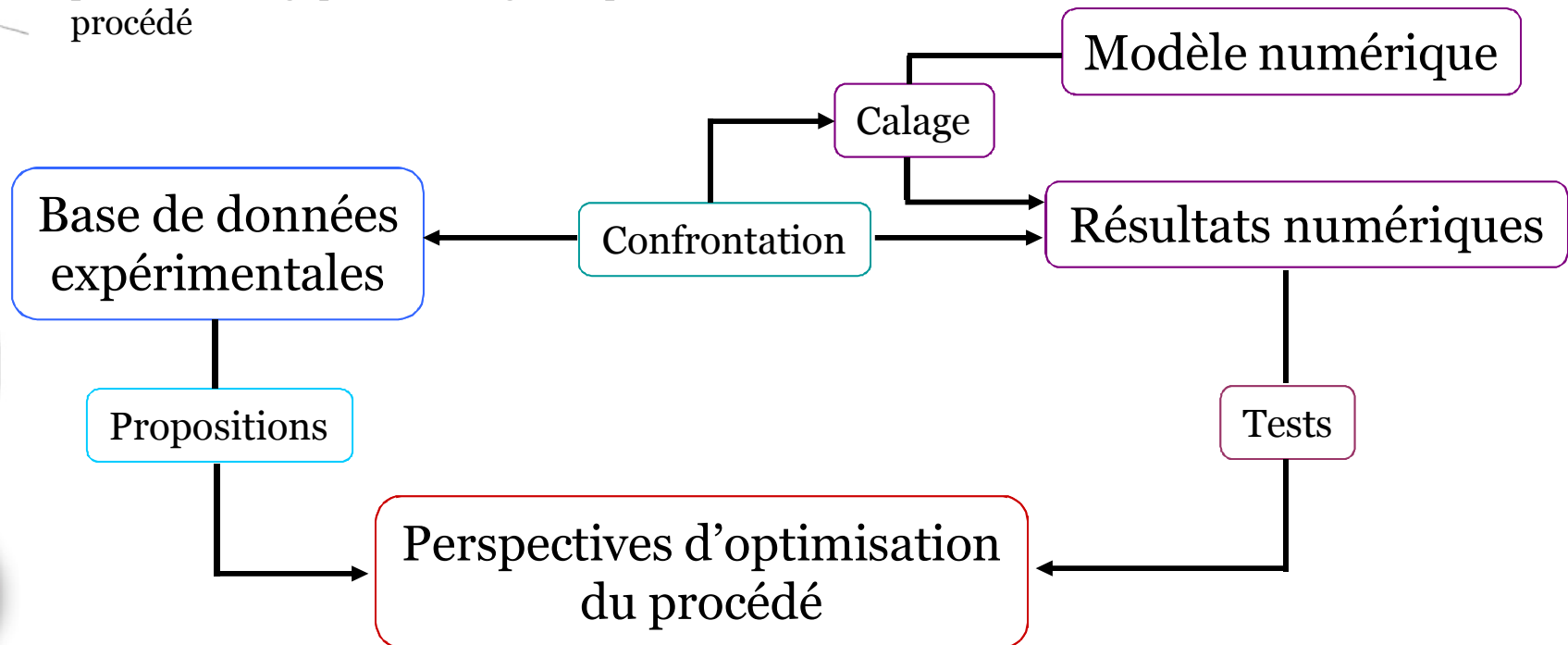
► Stratégie adoptée

● 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

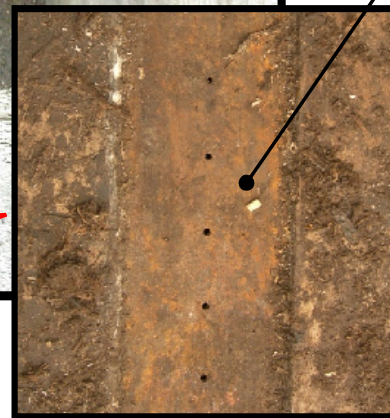
Procédé en aération positive forcée en Casier 18*4*2.5



Bouche d'évacuation

Massif de substrat

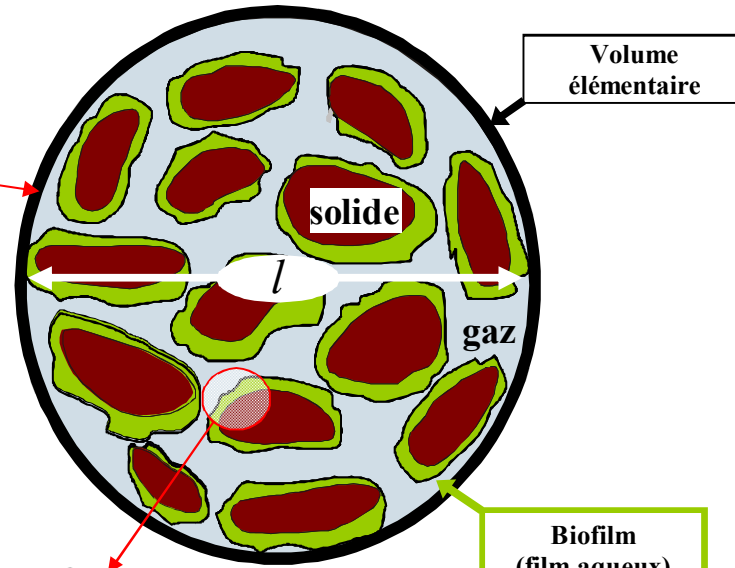
Système d'aération



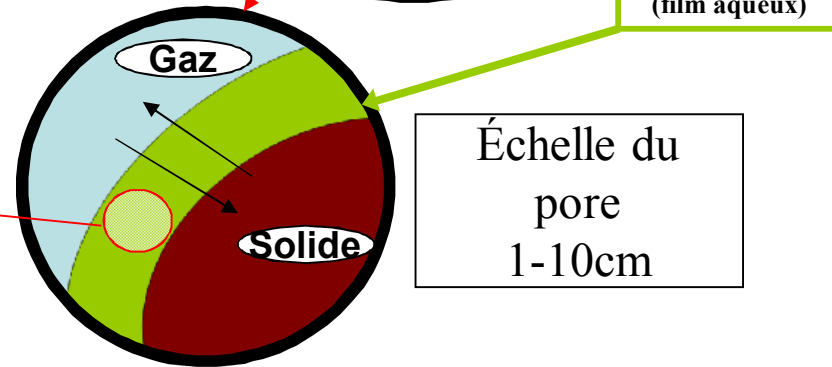
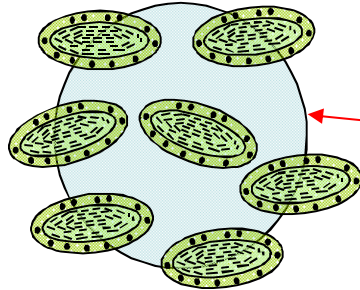
► Les échelles du problème



Échelle du V.E.R
10cm-1m

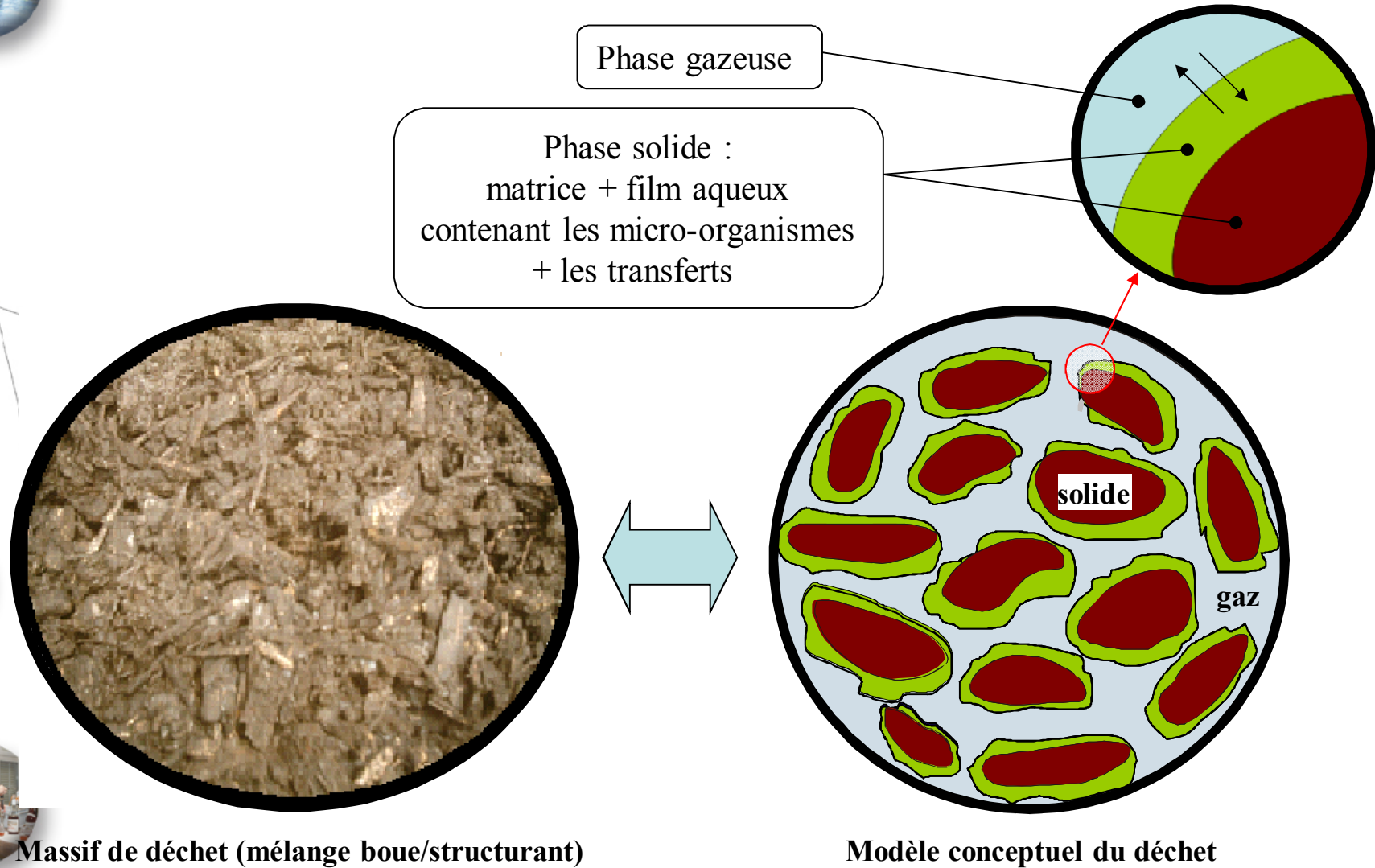


Échelle du biofilm
1-10mm



► Hypothèses fondamentales du modèle

- Substrat = milieu poreux saturé en gaz



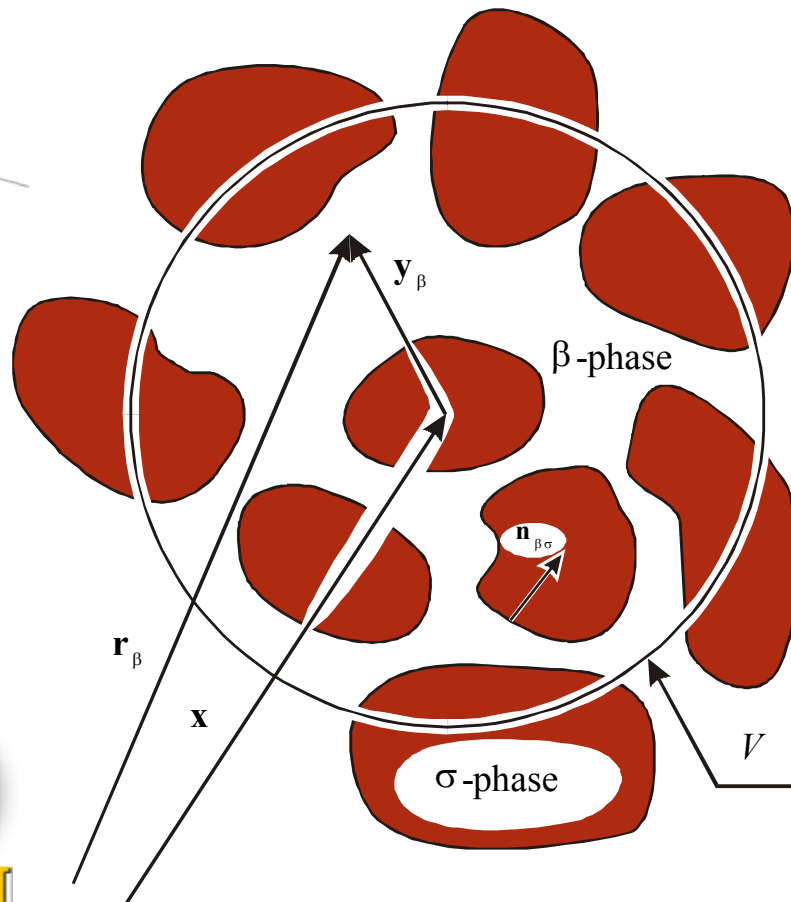
▶ Constituants du gaz et équilibre local

- **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

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

❖ 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 ($i=O_2, CO_2, H_2O$)

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

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

- 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

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

Termes réactifs

- **Equation de Darcy**

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

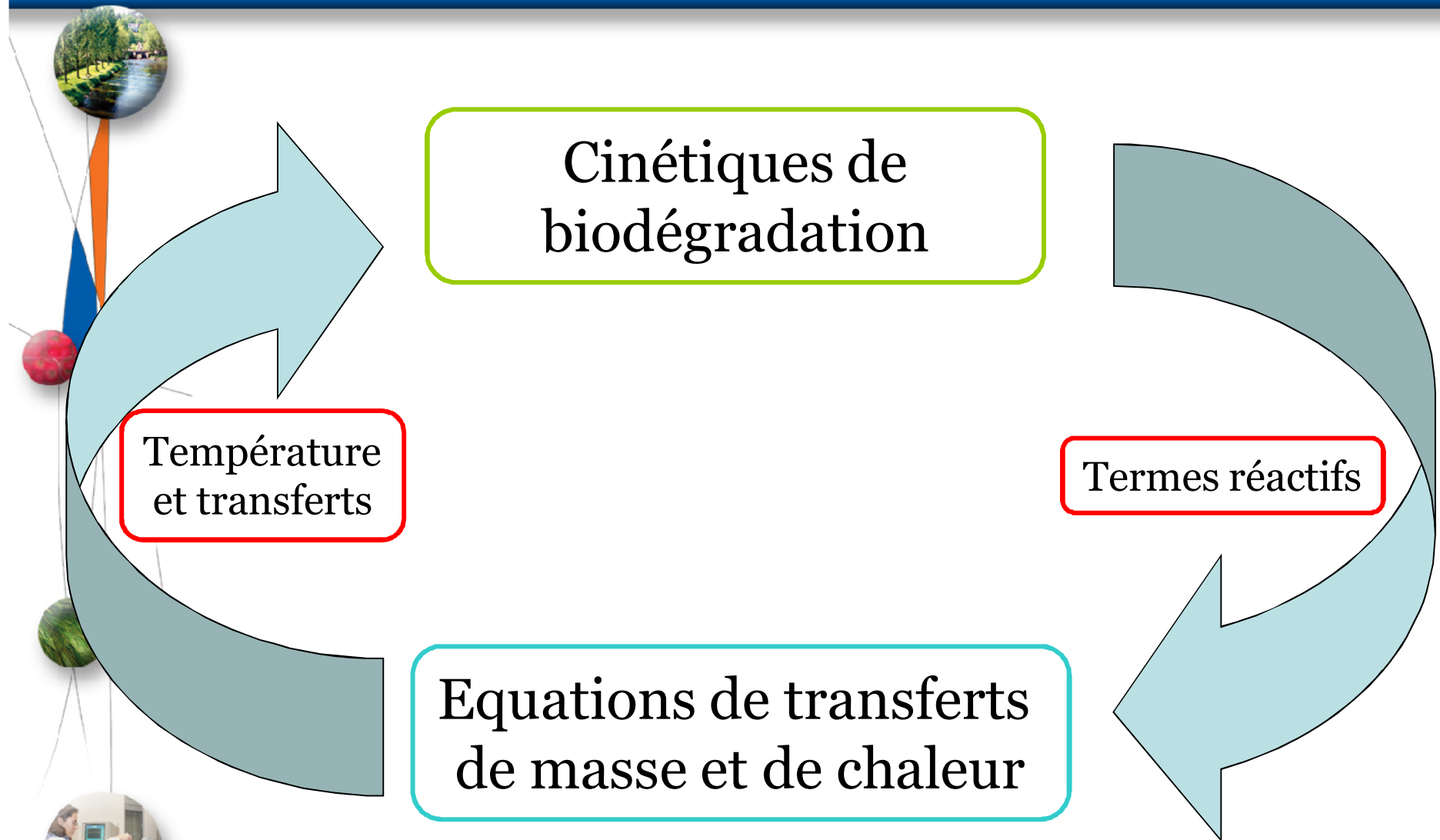
- **Equation de conservation de l'énergie**

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

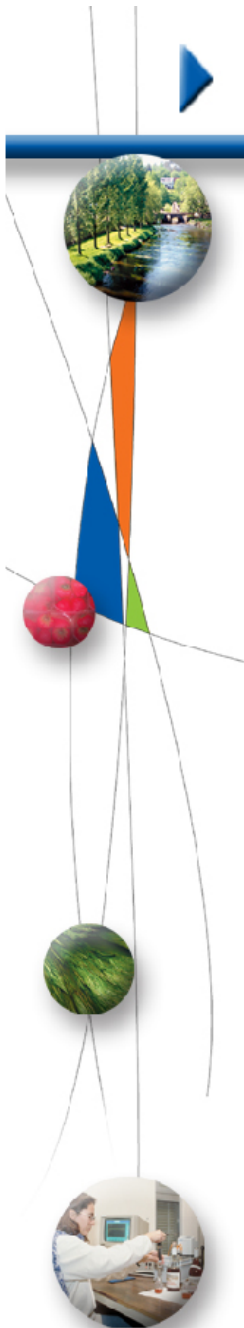
Termes réactifs

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

► 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 CO₂ et CH₄

Traçages au CH₄ :

- 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

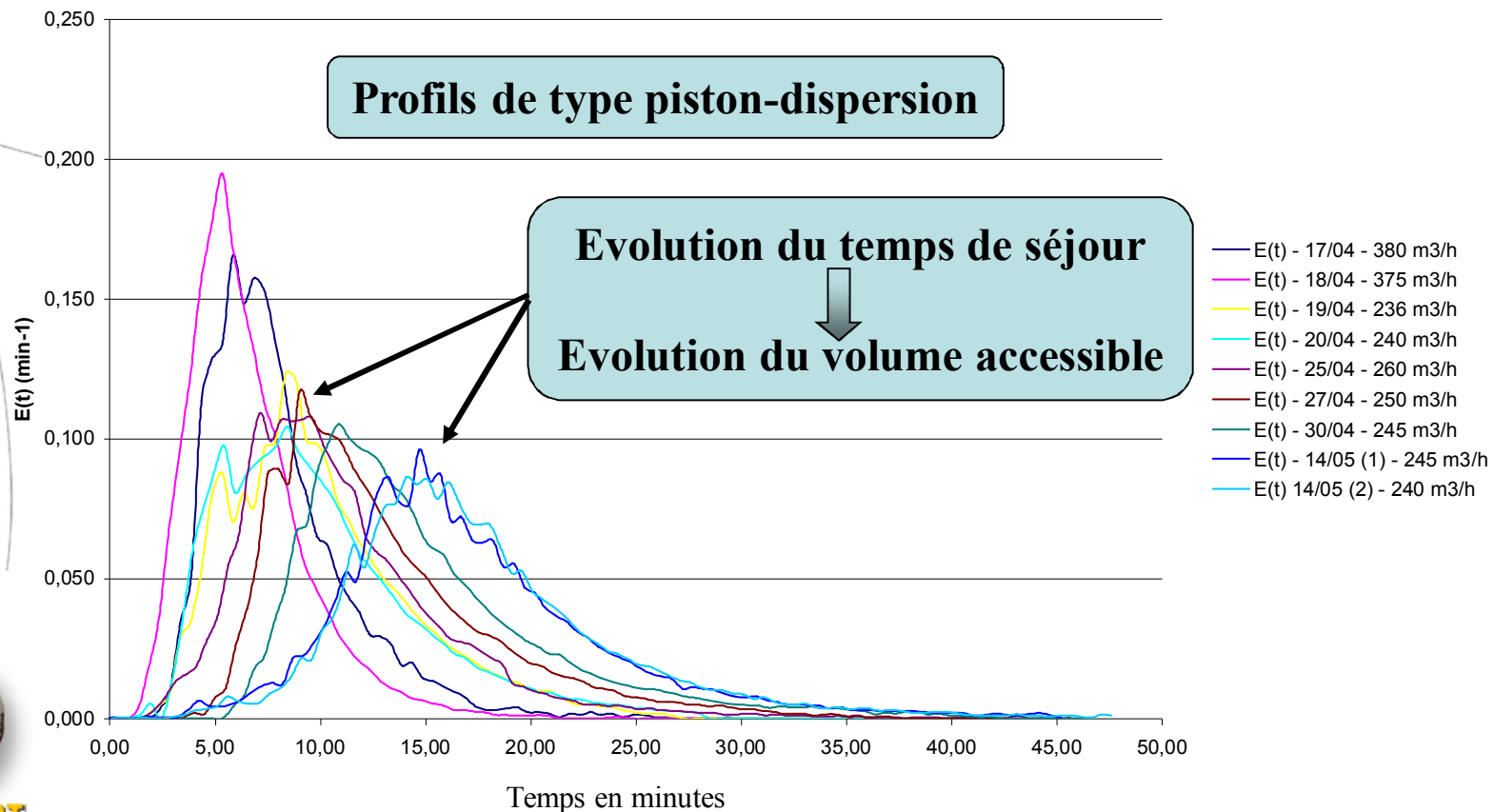
▶ Traçages campagne 2



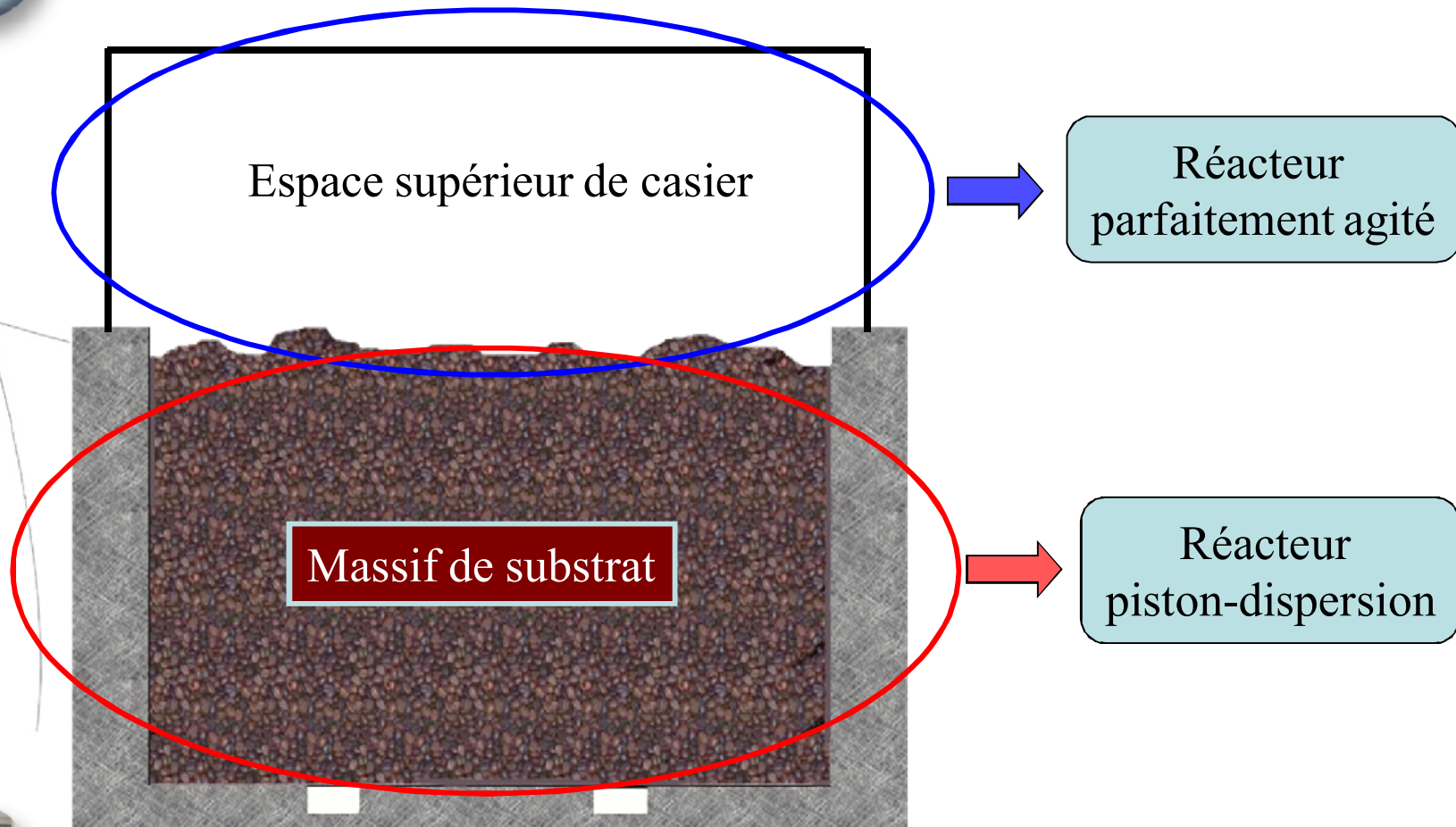
Récupération du traceur en entrée de bouche d'aspiration

Taux de récupération compris entre 60 et 160%

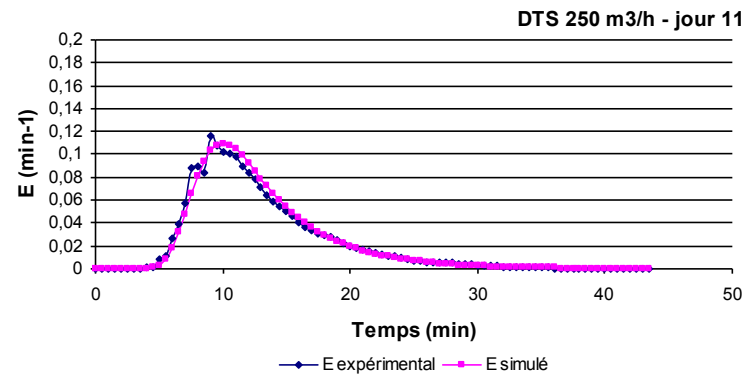
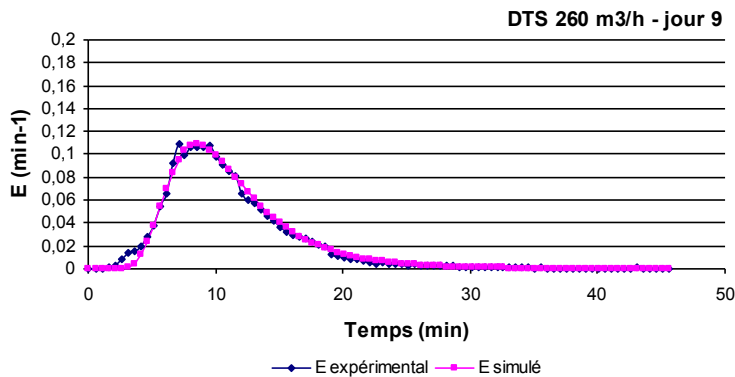
Evolution de la DTS



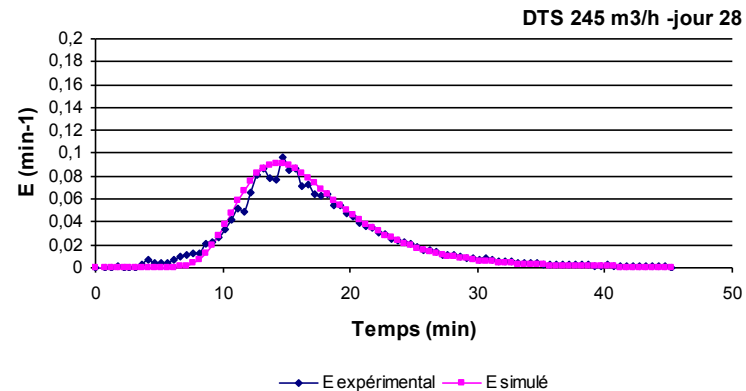
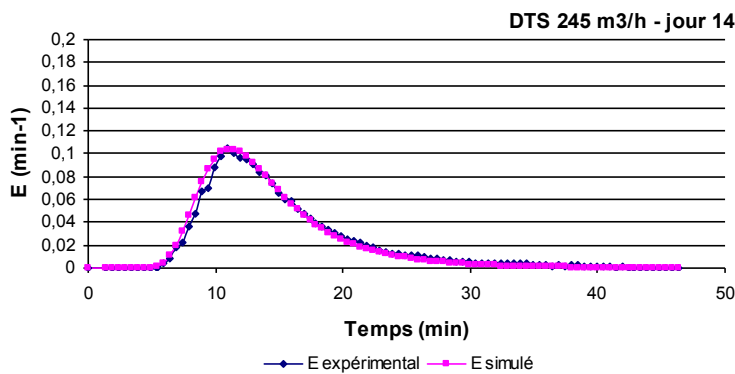
► Hypothèses de modélisation des courbes DTS



► 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	7.4×10^{-4}	4.3×10^{-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	7.8×10^{-4}	4.2×10^{-4}
27/04 jour11					40	3.2×10^{-4}	2×10^{-4}
30/04 jour14					40	2.9×10^{-4}	2×10^{-4}
14/05 jour28	245	12	49	19.6	40	2.2×10^{-4}	2×10^{-4}
14/05 jour28	240	12	48	19.2	36	2.4×10^{-4}	2.1×10^{-4}

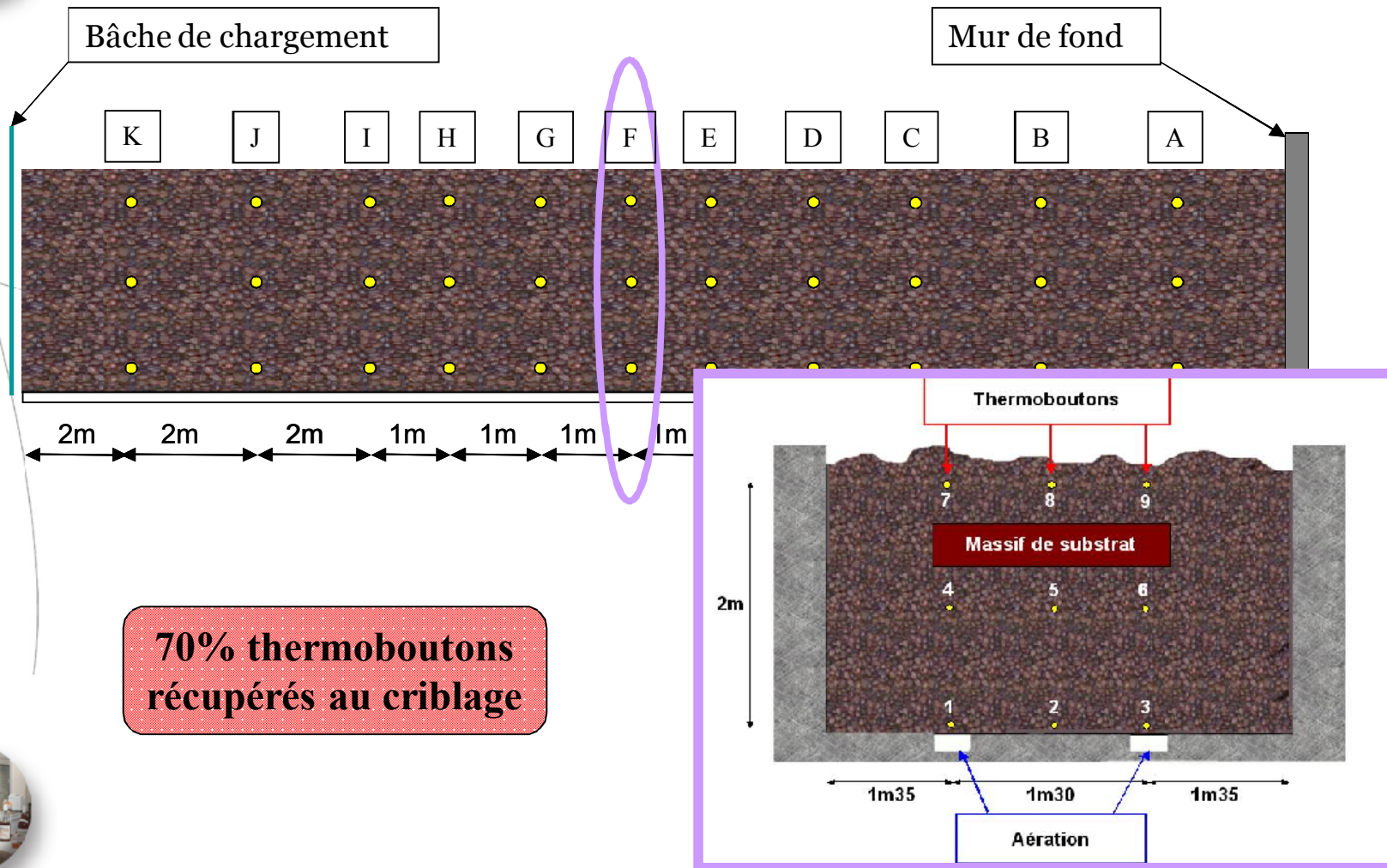
Portion de volume non soumise à l'aération en début de cycle

Homogénéisation structurale du massif
Diminution de la dispersion mécanique

Ouverture des pores due à la biodégradation du substrat

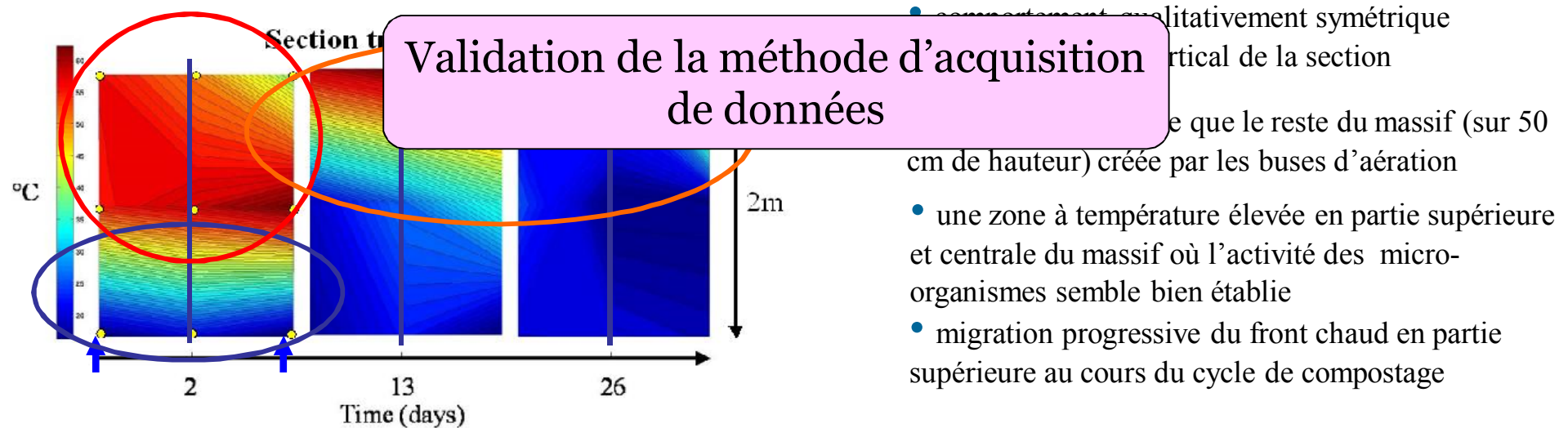
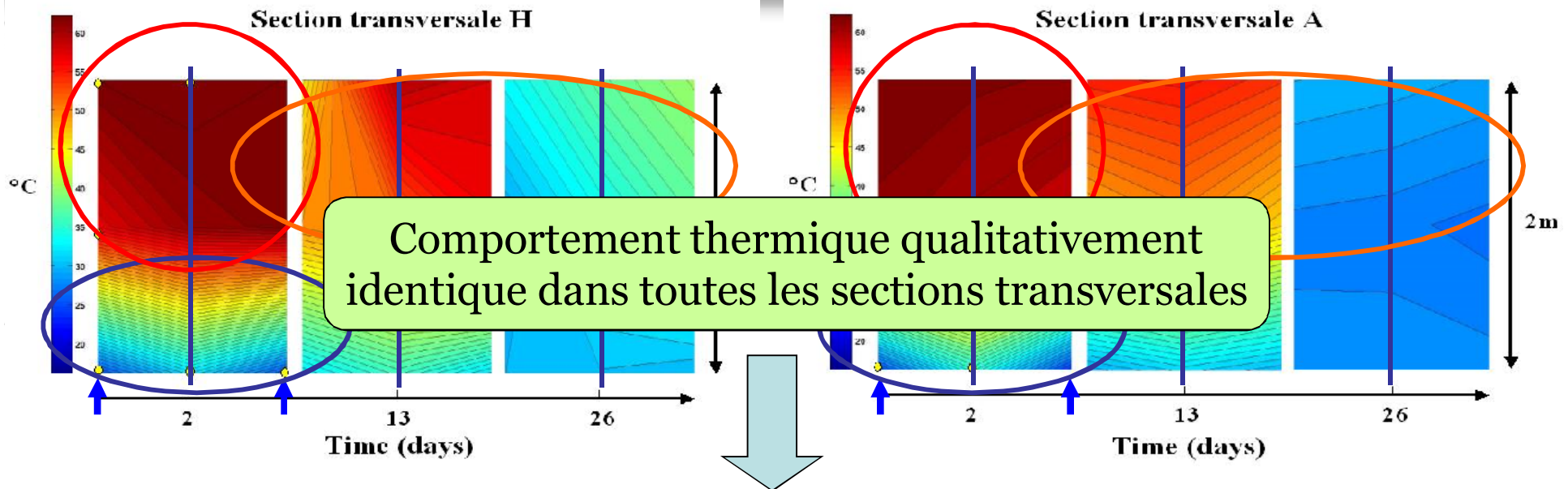
► Suivi de température campagne 1

Onze sections transversales

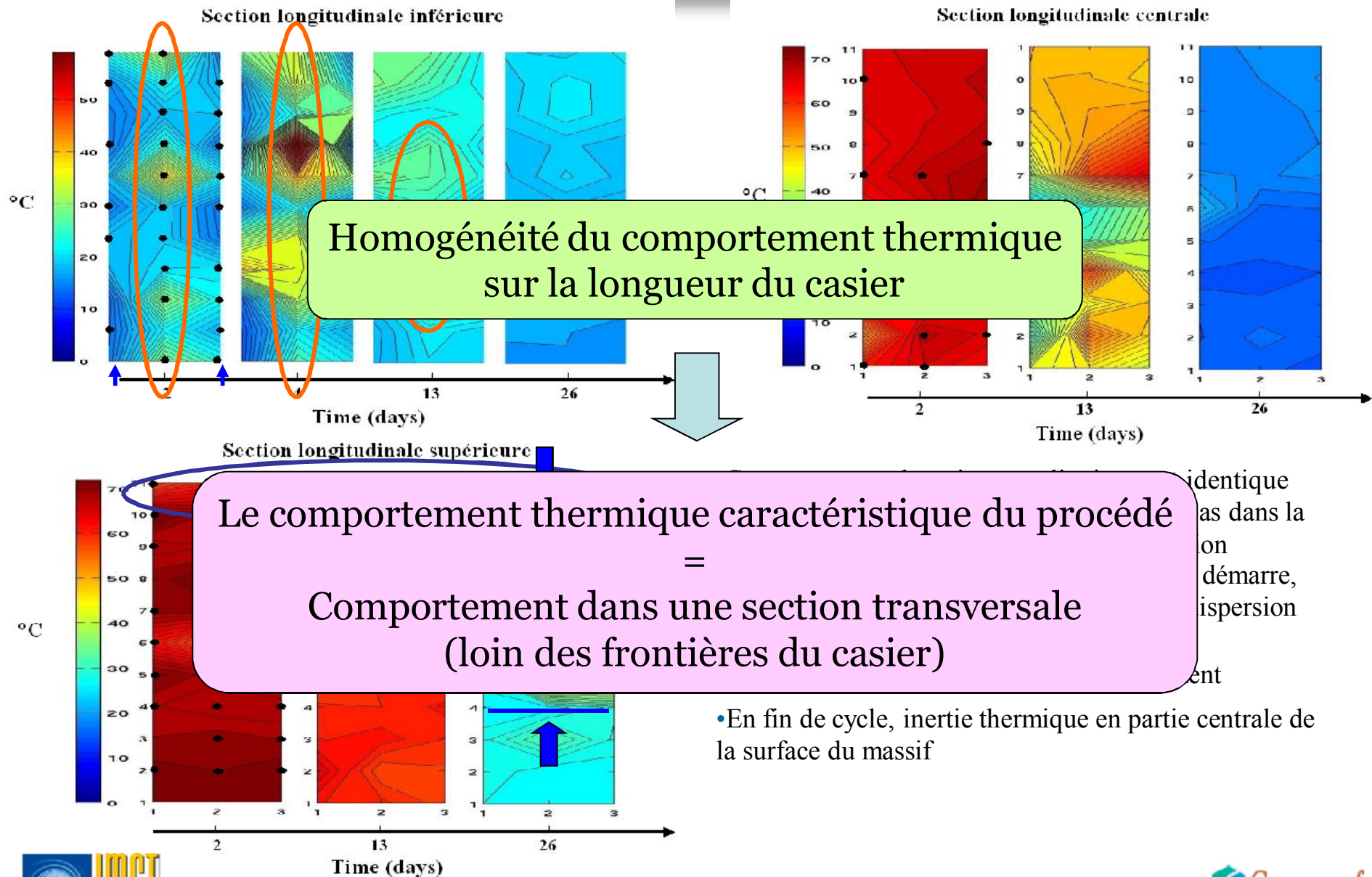


70% thermoboutons
récupérés au criblage

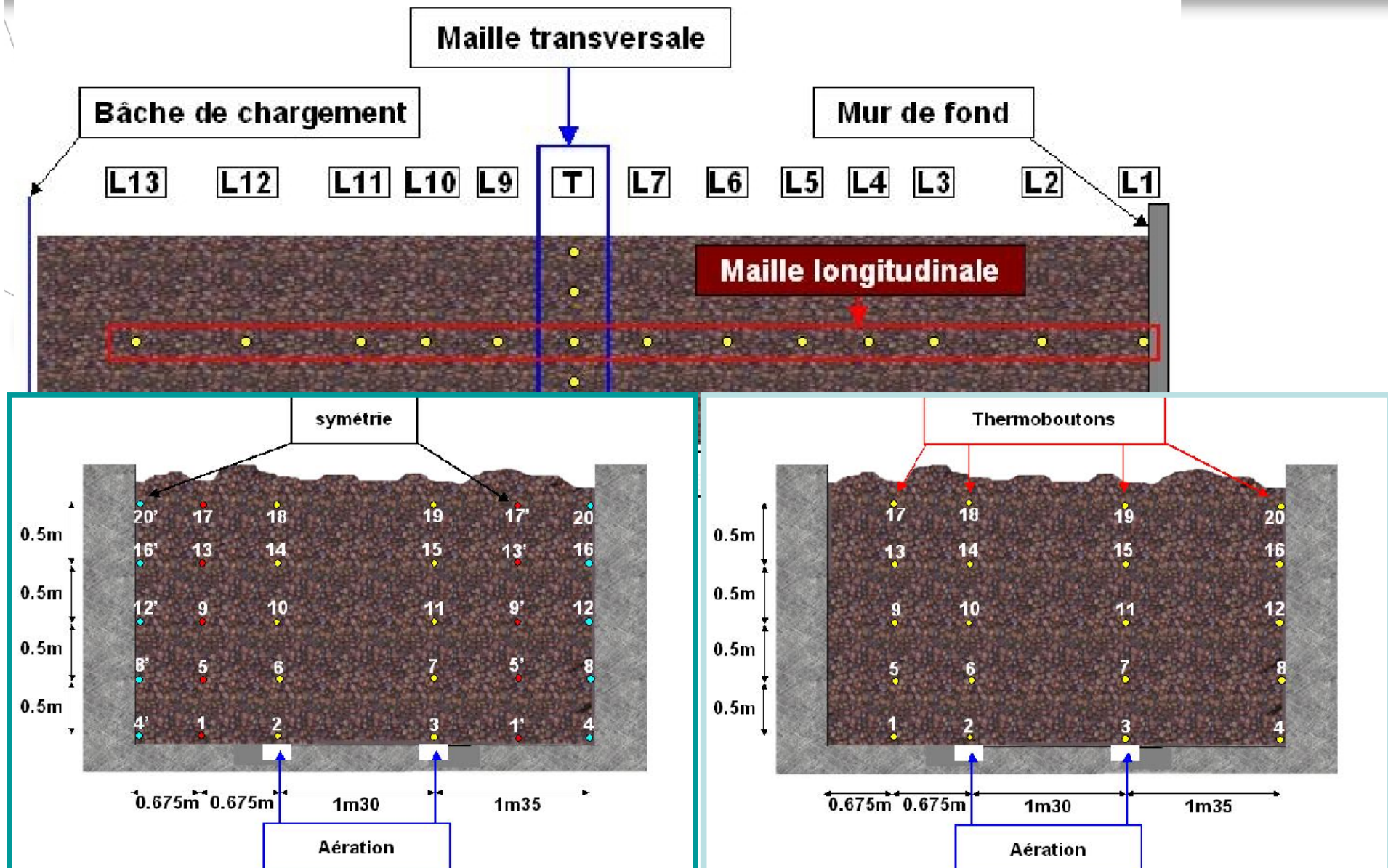
► Sections transversales campagne 1



▶ Sections longitudinales campagne 1

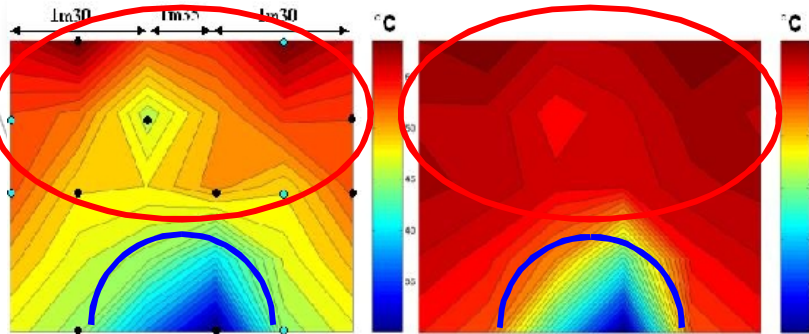


► Suivi de température campagne 2



► Sections transversales campagne 2

Section transversale reconstituée

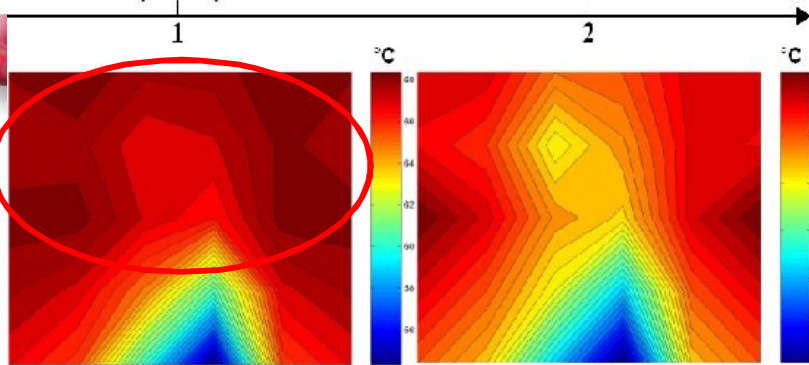


1er jour

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

2e jour

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

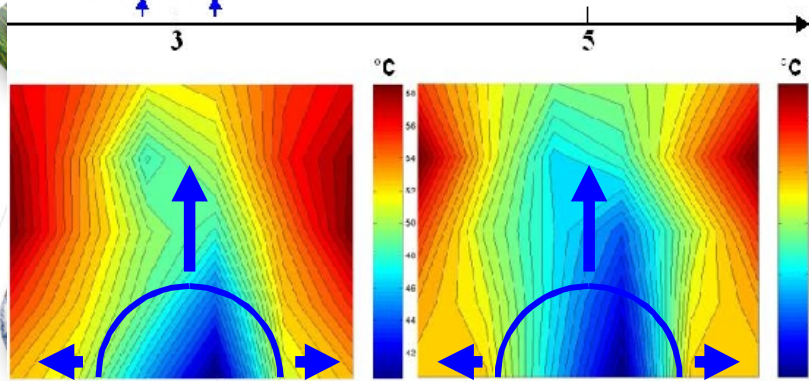


3e jour

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

5e jour

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



10e jour

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

11e jour

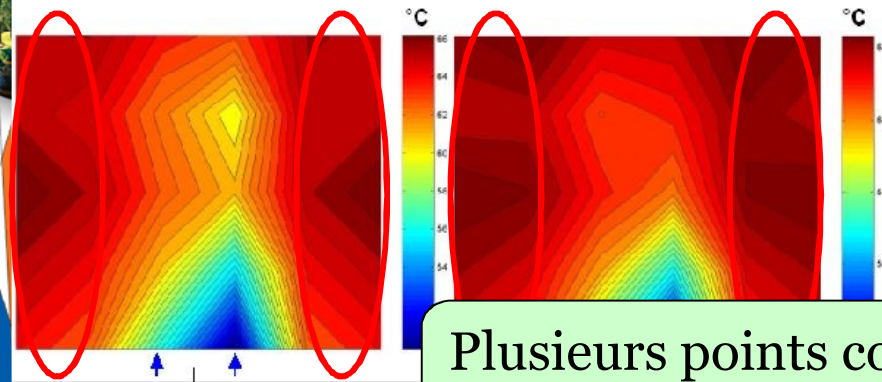
$$Q_{\text{aer}} = 240 \text{ m}^3 / \text{h}$$

- 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

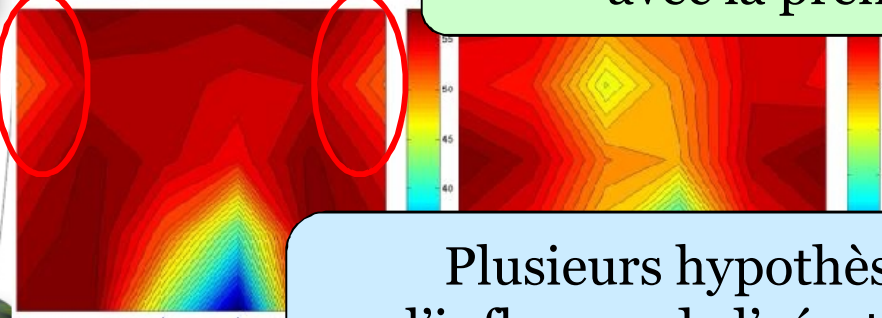


12e jour
 $Q_{aer} = 240 \text{ m}^3 / \text{h}$

• Accumulation thermique aux parois

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

Plusieurs points communs sont observés avec la première campagne

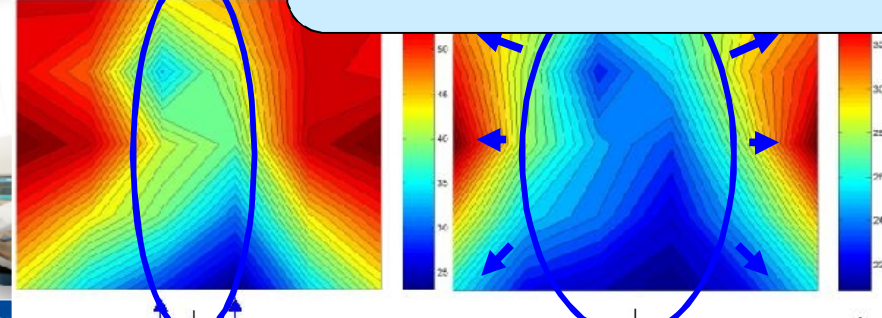


19e jour
 $Q_{aer} = 240 \text{ m}^3 / \text{h}$

→ Réduction 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

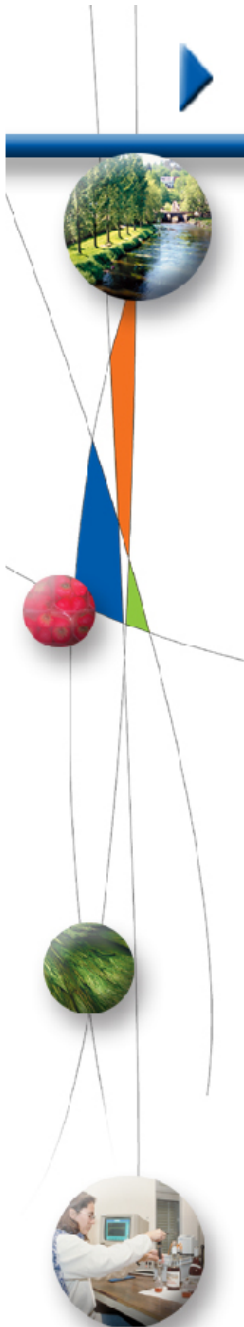
$Q_{aer} = 930 \text{ m}^3 / \text{h}$

Temps (jours)

▶ Conclusions sur les champs de température

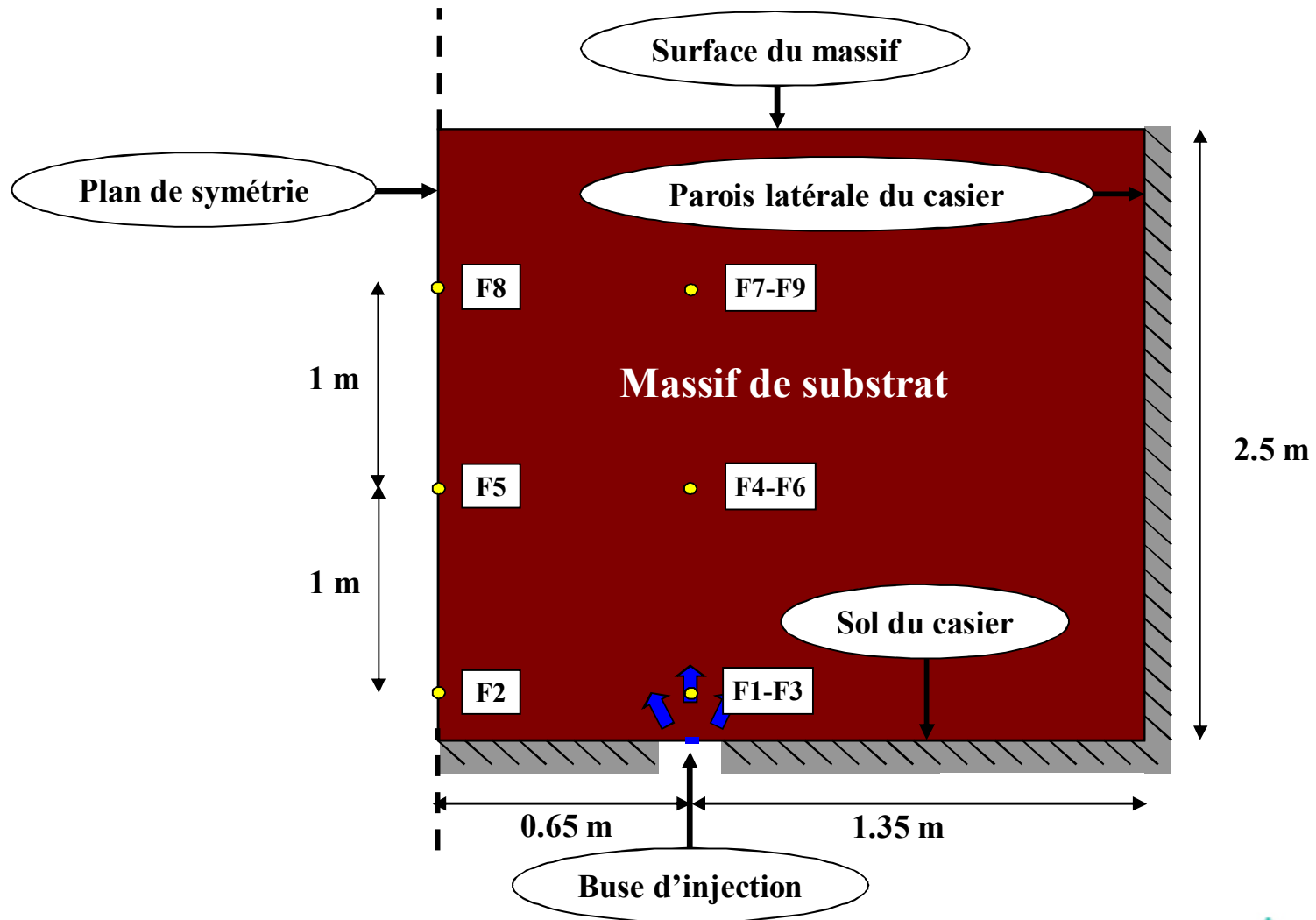
- Comportement thermique caractéristique du procédé peut être défini en première approximation comme étant le comportement dans une section transversale centrale
- Le comportement thermique est symétrique par rapport à l'axe central d'une section transversale
- Transfert thermique peu important aux parois 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



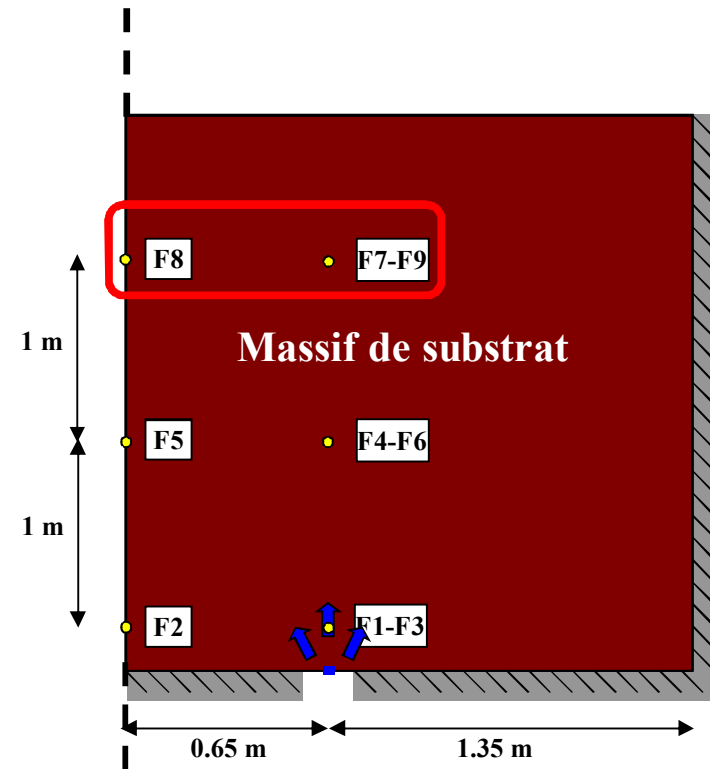
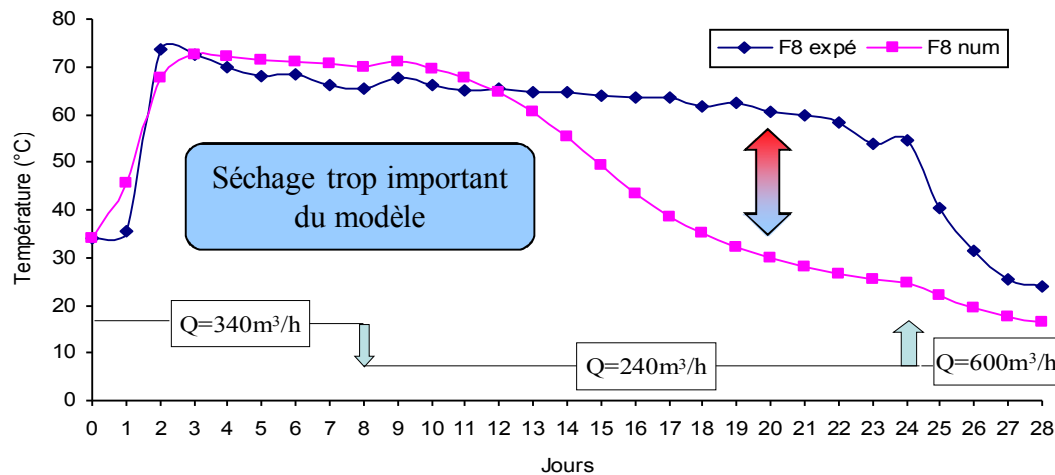
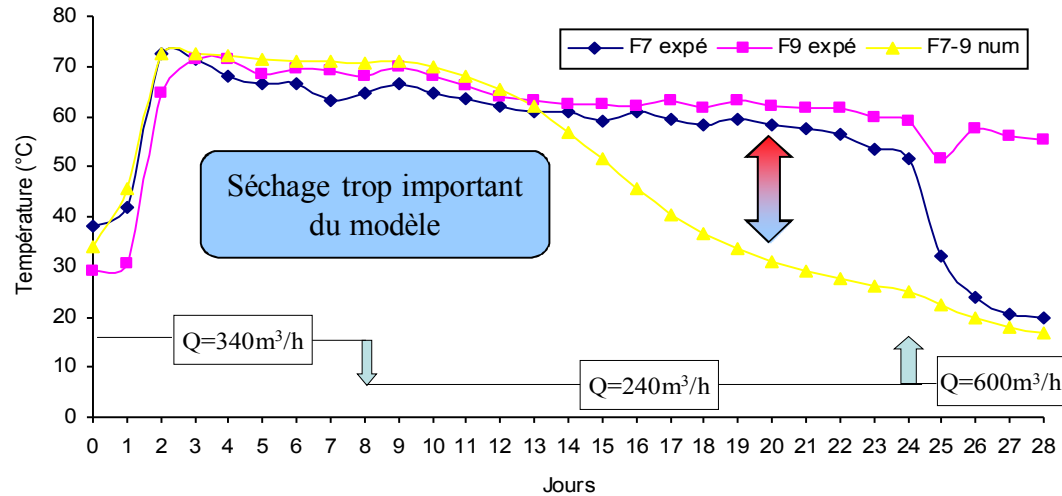
► Géométrie modélisée

Comportement thermique symétrique observé expérimentalement

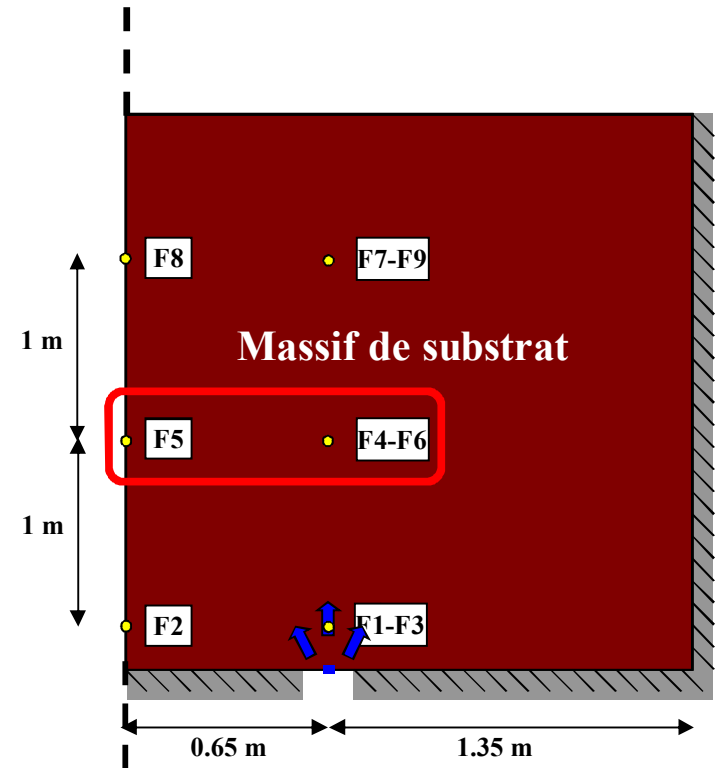
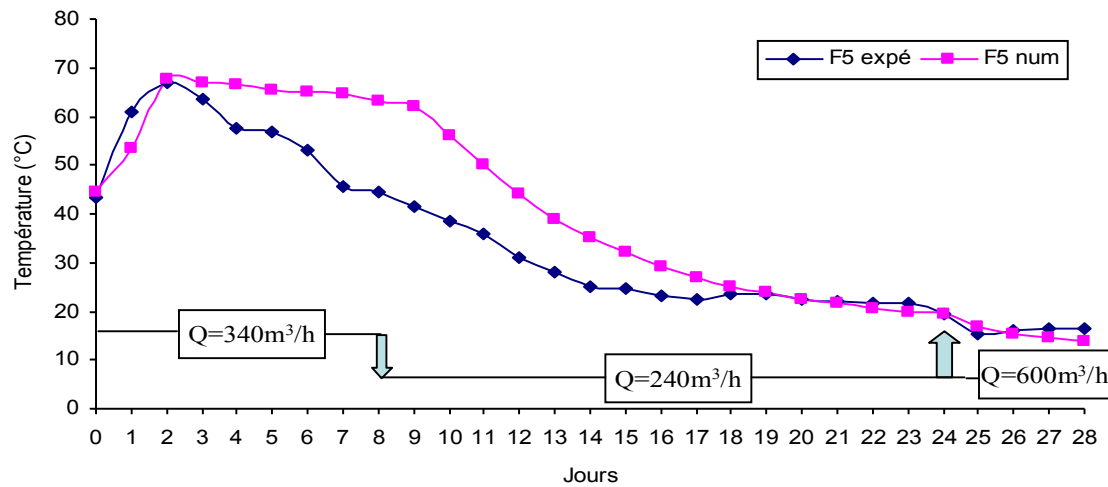
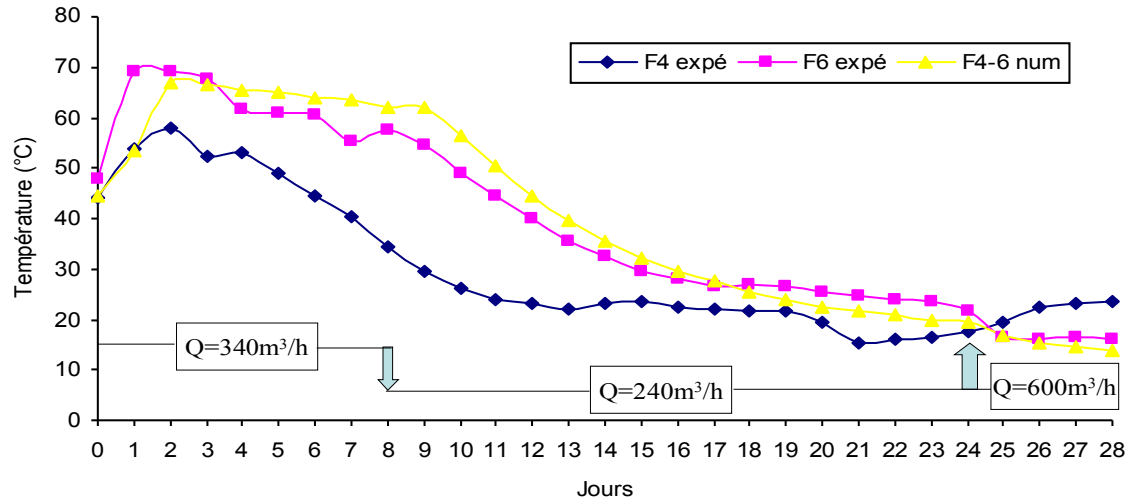


► Résultats de modélisation de la première campagne

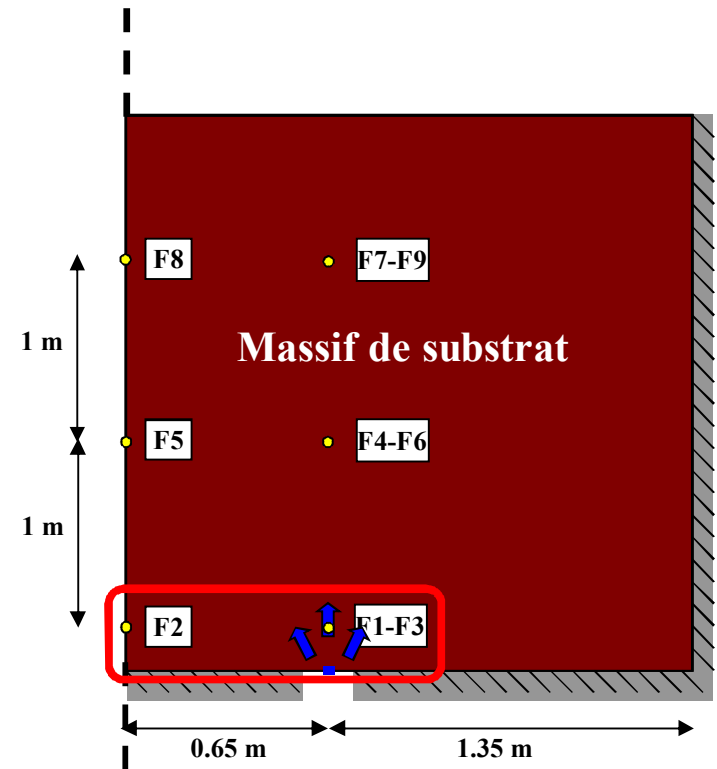
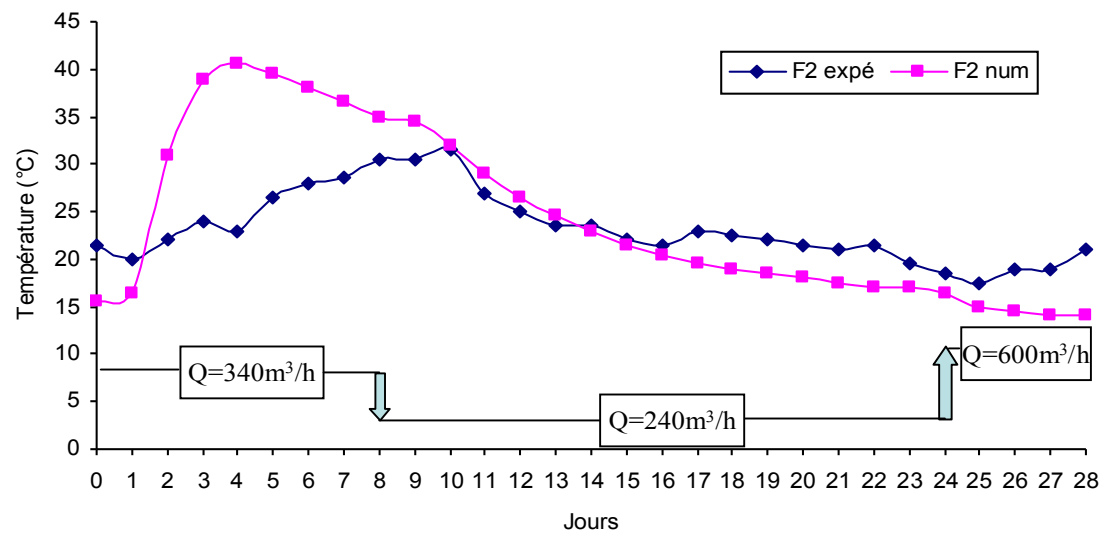
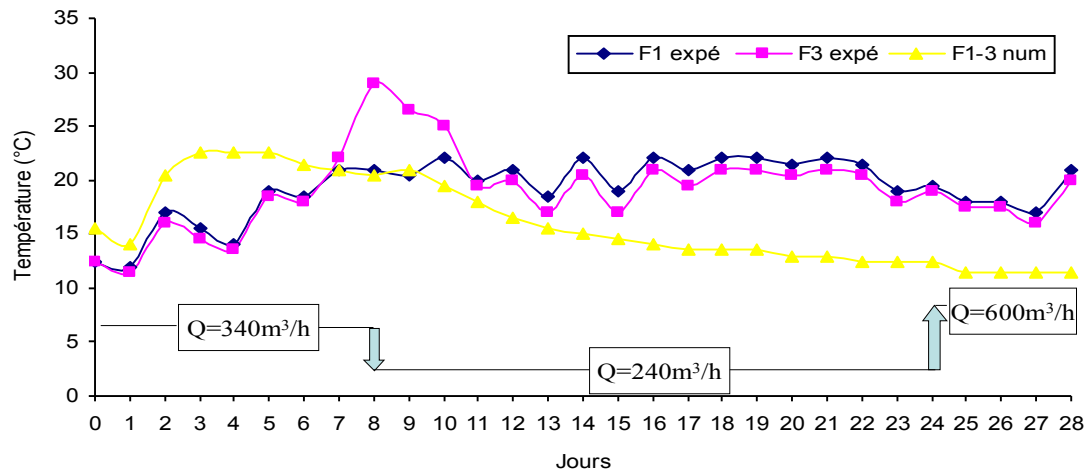
Partie supérieure du massif de substrat



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 ₂ /g MS ou T O ₂	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 ₂ O (% de la masse initiale)	72.1	93

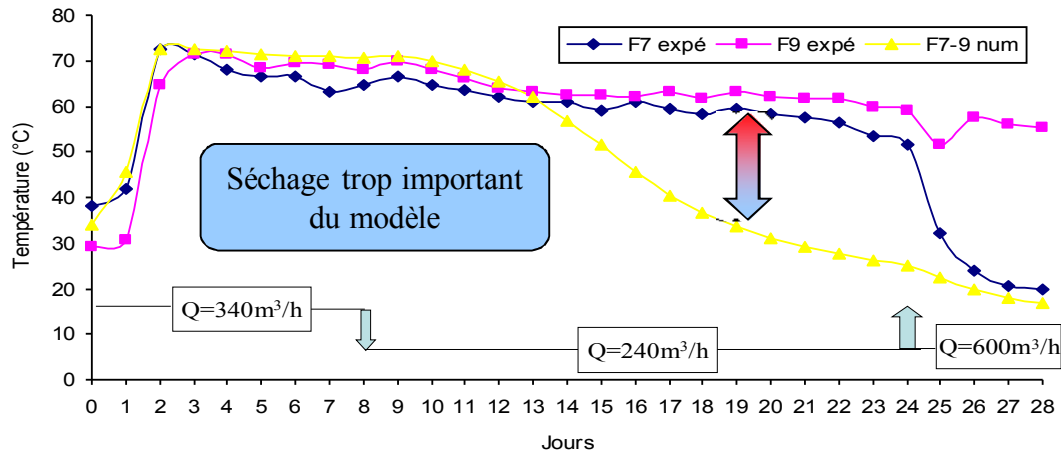
► Bilan thermique à faire



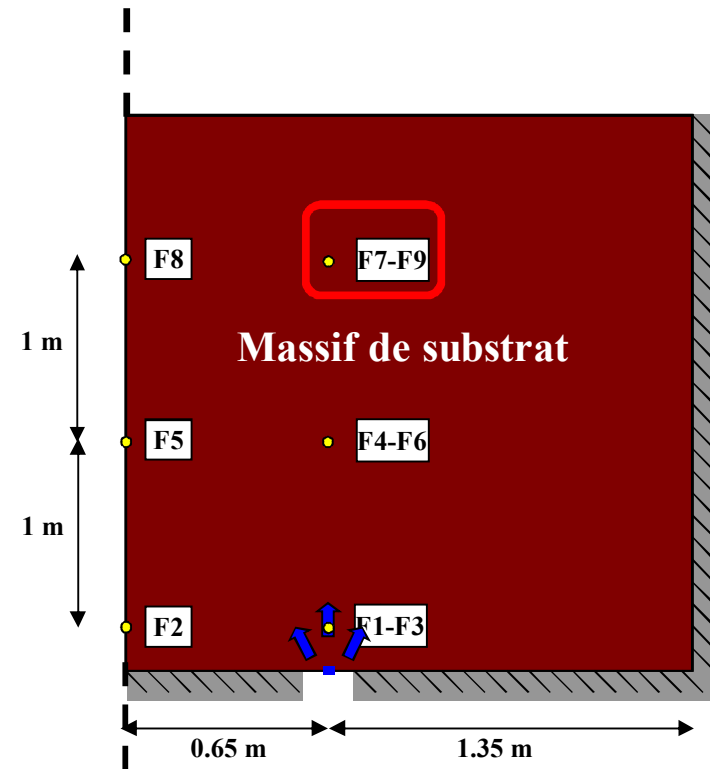
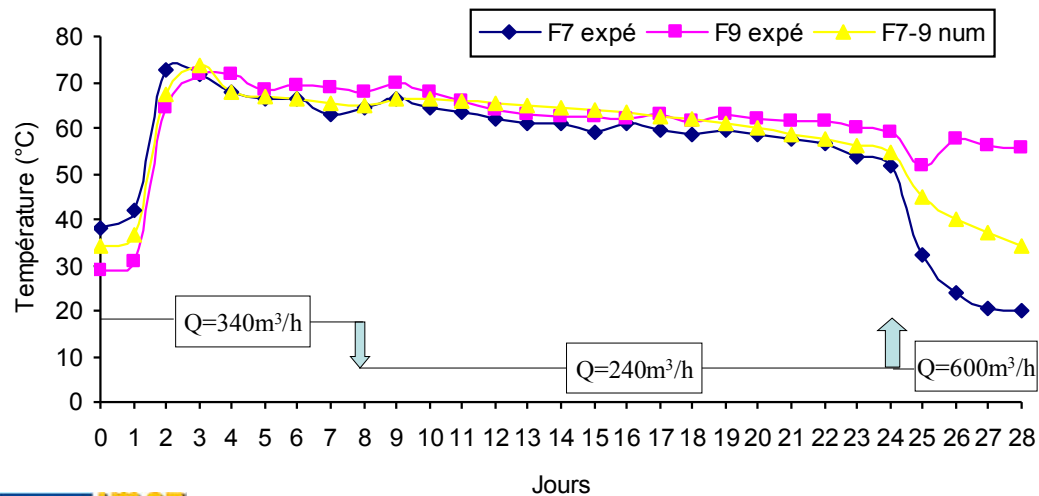
- TD à faire / personne
- Le 2/2/2015, rendre le rapport Bilan à Mme André (N7)
- Le 2/2/2015, rendre le rapport épandage à Mme Eftymiades
- Maximum 10 pages.



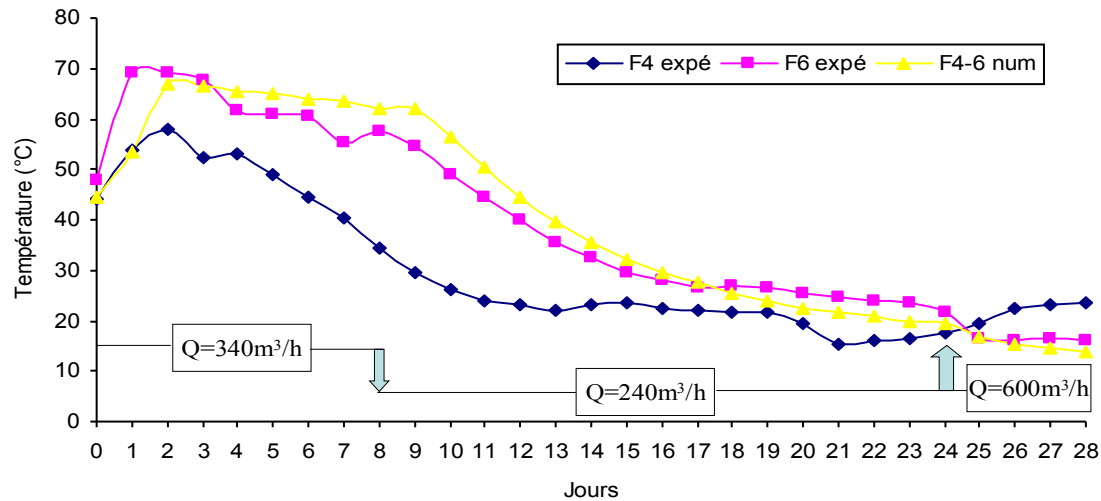
Partie supérieure du massif de substrat



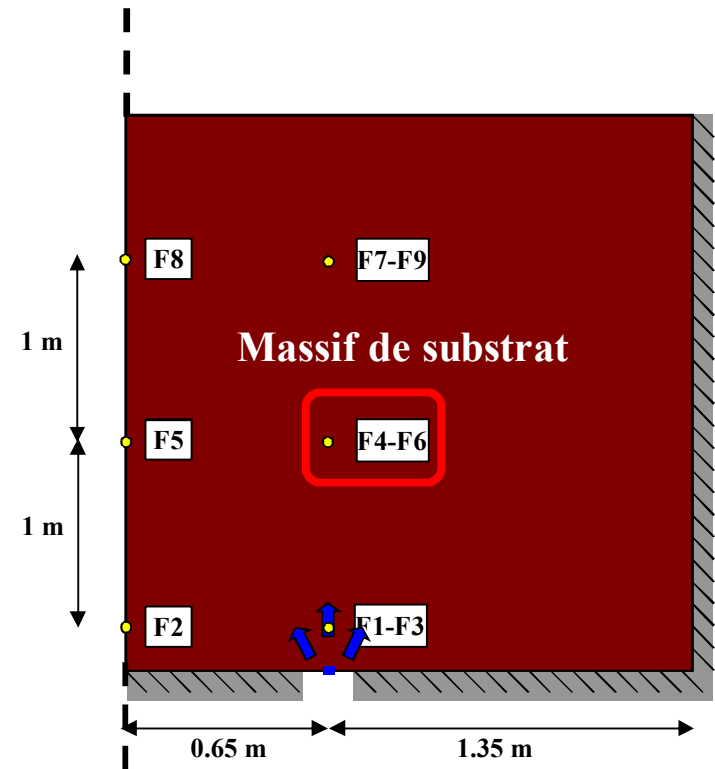
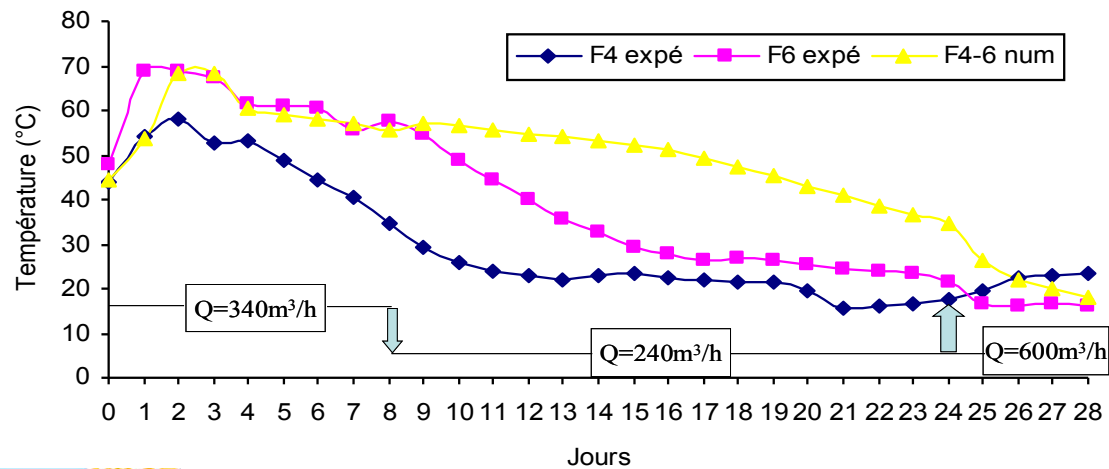
Prise en compte de l'évolution de l'enthalpie de consommation d'oxygène



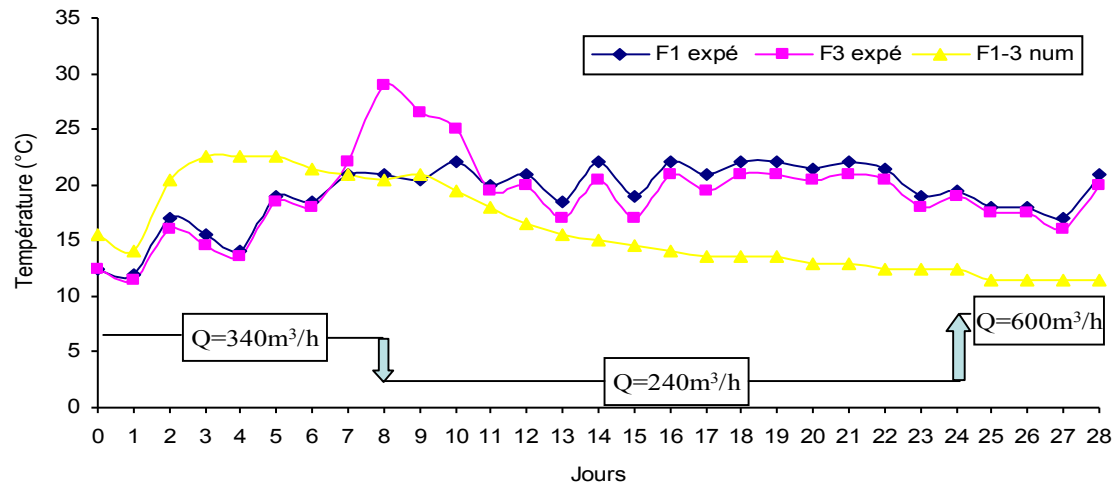
Partie centrale du massif de substrat



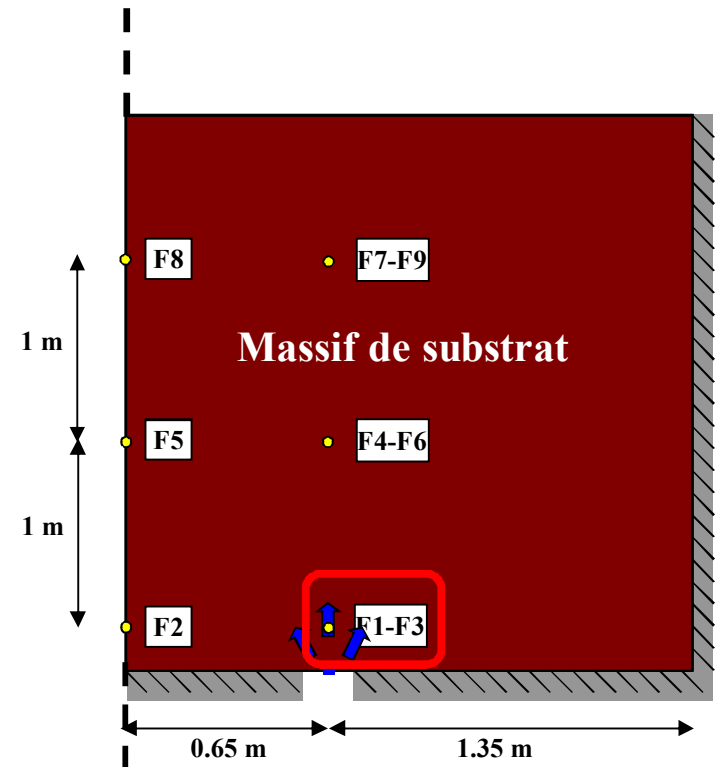
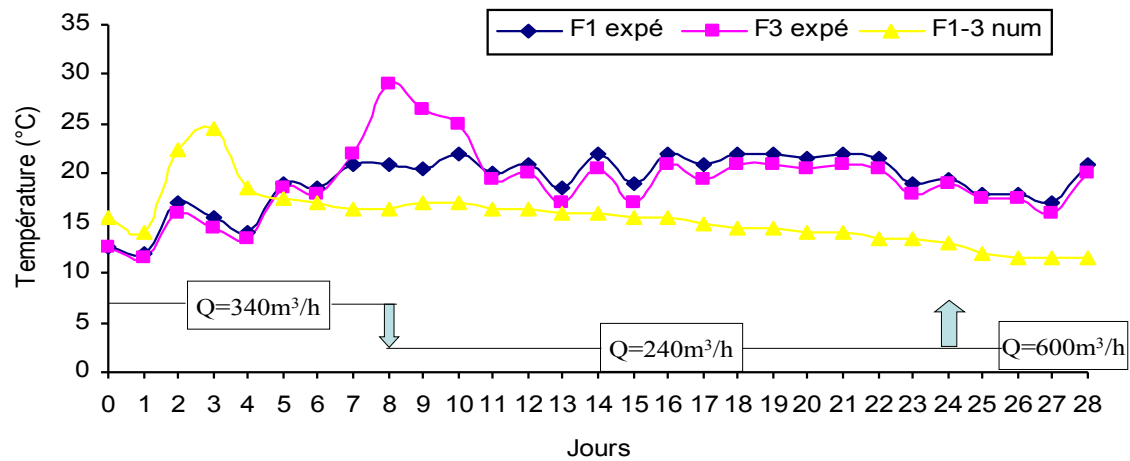
Prise en compte de l'évolution de l'enthalpie de consommation d'oxygène



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

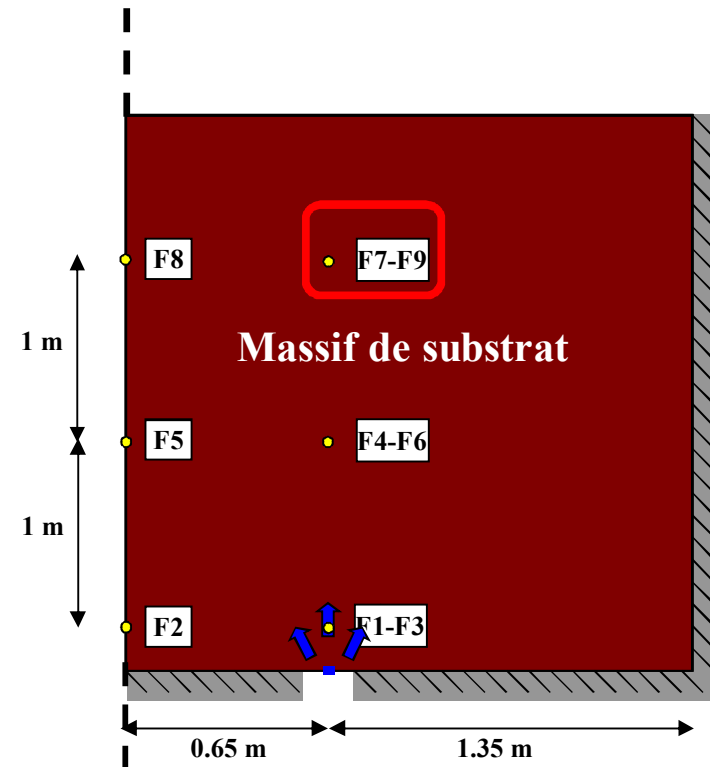
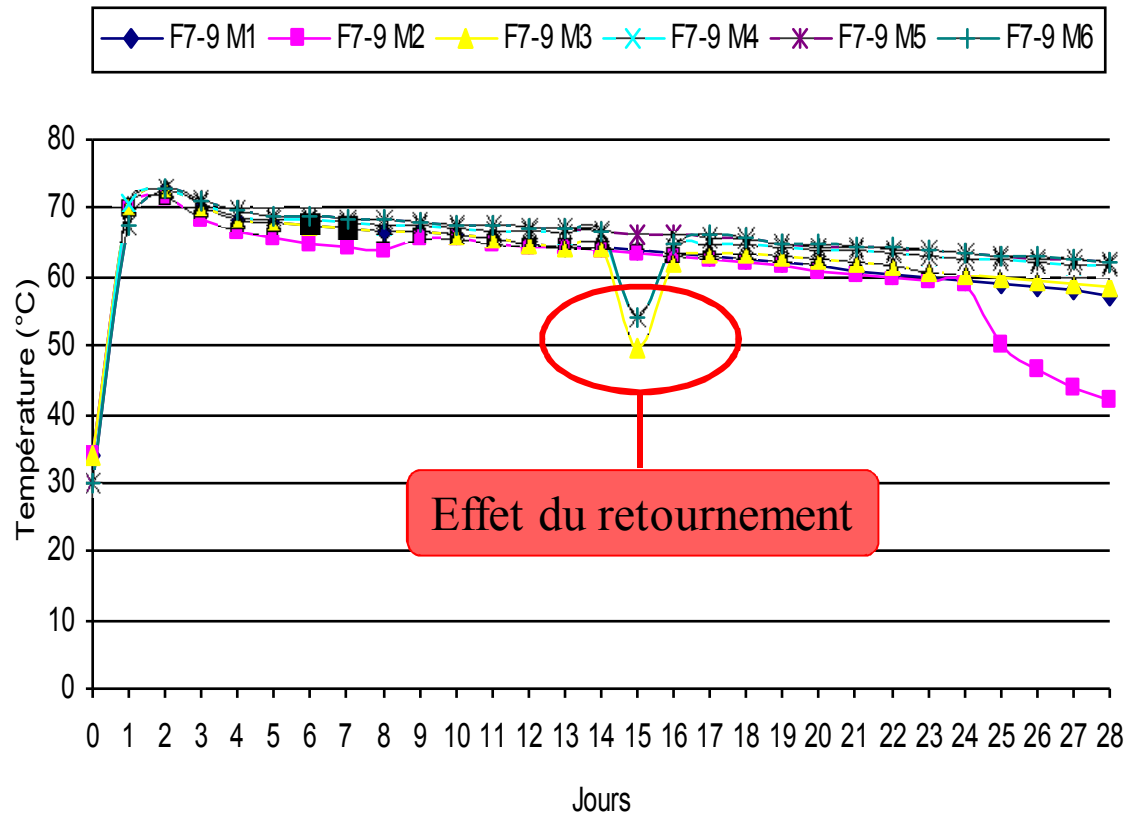
Campagne 1		Mélange initial		Mélange final		Pertes	
		Concentration	masse	Concentration	masse	masse	% de la masse initiale
Matière brute	T	-	97,12	-	59.36	37.76	38.9
Matière sèche	% ou T	54	52.44	79	46.89	5.55	10.58
Eau	% ou T	46	44.68	21	12.47	32.21	72.1
Matière organique	% ou T	92	48.25	90.2	42.3	5.95	12.33
DCO	mgO ₂ /g MS ou T O ₂	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 ₂ O (% de la masse initiale)	72.1	73.5

► Résultats sur l'évolution de température



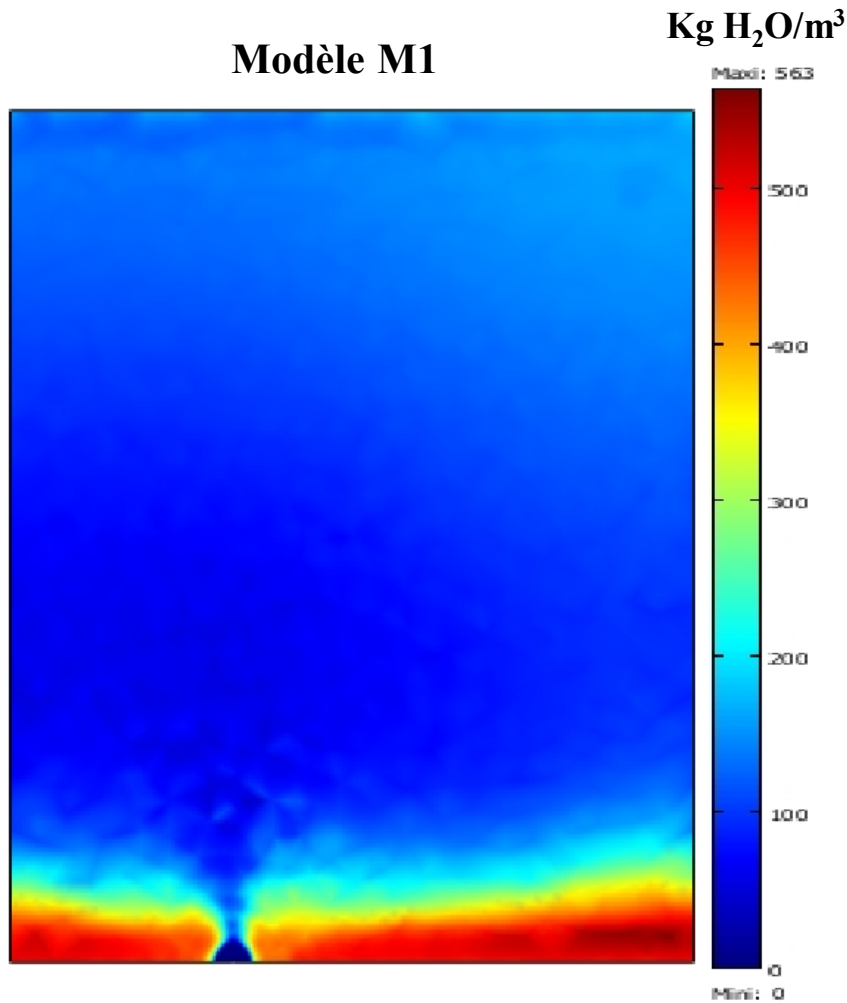
Partie supérieure du massif de substrat



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

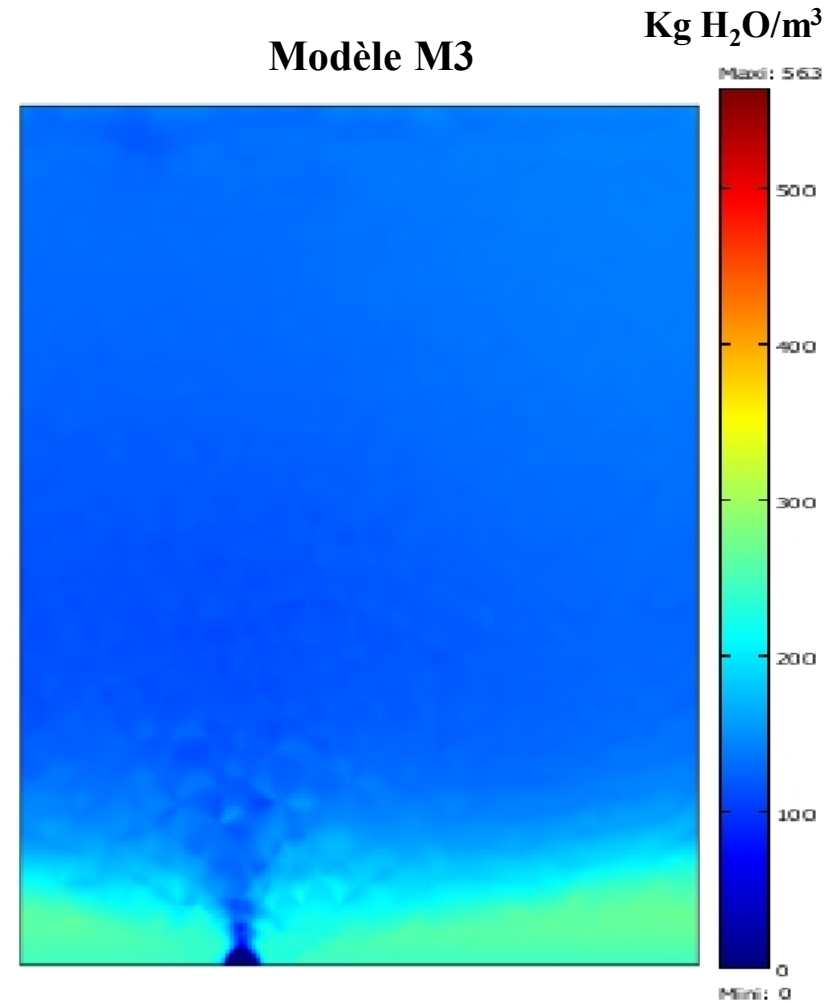
Sans retournement

Modèle M1



Avec retournement

Modèle M3





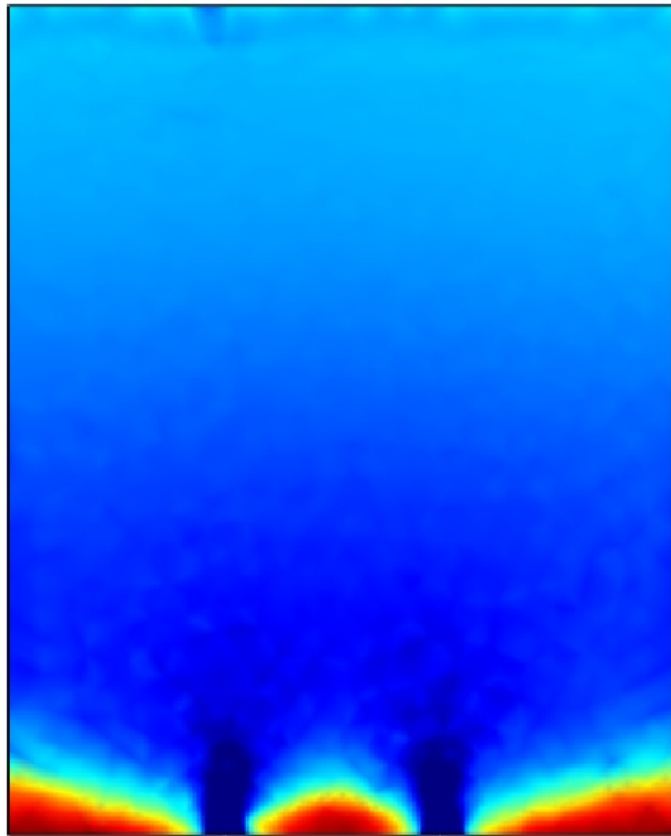
Sans retournement

Avec retournement

Modèle M5

Kg H₂O/m³

Maxi: 532

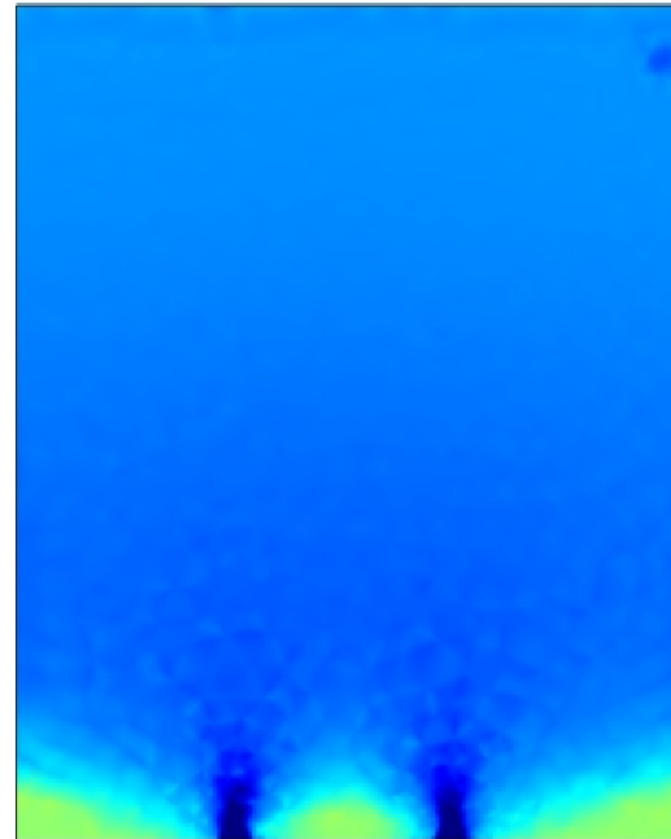


Mini: 0

Modèle M6

Kg H₂O/m³

Maxi: 532



Mini: 0



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... ☺