

TRANSFERTS COUPLES DE MASSE ET DE CHALEUR DANS LES MECHEES POREUSES DES LHP

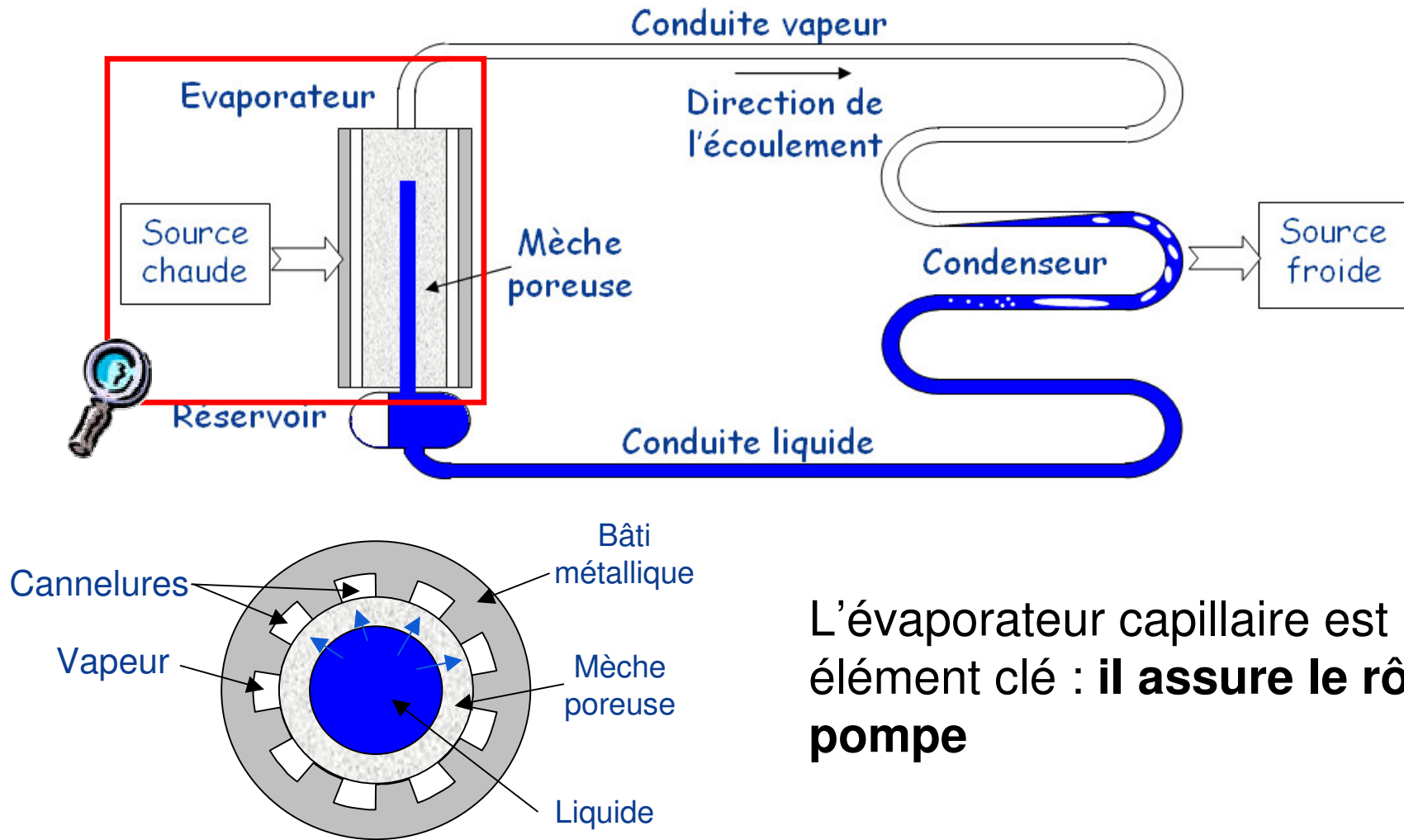
Clément LOURIOU

M. PRAT
A. LARUE de TOURNEMINE
T. COQUARD

IMFT (Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse)
CNES (Centre National d'Études Spatiales)
ASTRIUM

Contexte

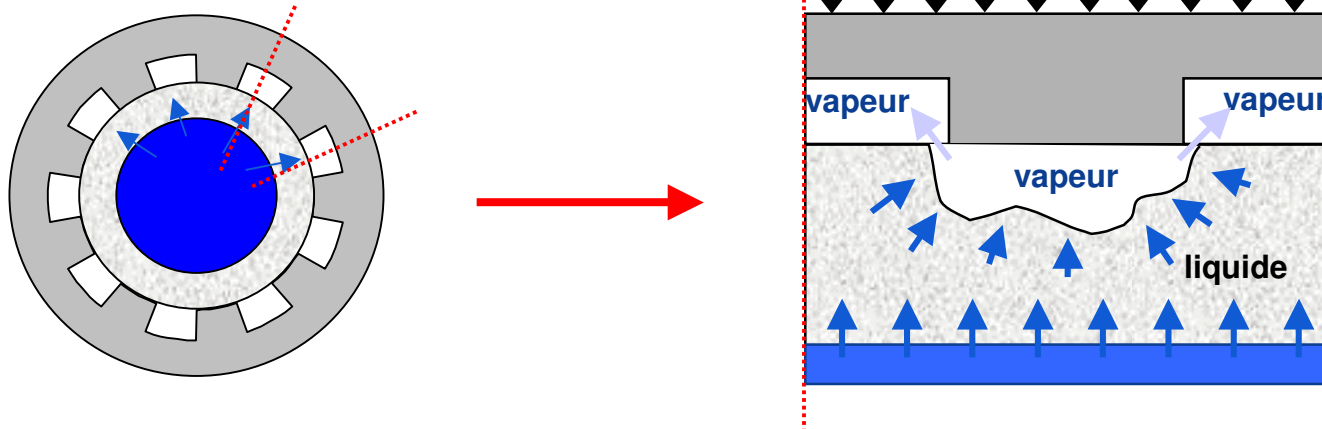
Boucle diphasique à pompage capillaire :



L'évaporateur capillaire est un élément clé : **il assure le rôle de pompe**

Objectifs

Modéliser finement les transferts de masse et de chaleur dans l'évaporateur



- Modèle 2D des transferts de masse et de chaleur avec changement de phase en régime stationnaire validé expérimentalement
- Exploitation afin d'optimiser l'évaporateur (propriétés de la mèche, conception ...)
- Couplage de ce modèle avec un modèle de boucle
- Extension du modèle pour des situations transitoires avec validation expérimentale
- Exploitation du modèle transitoire pour optimiser les performances de l'évaporateur dans certaines phases critiques de fonctionnement (démarrage ...)

Plan de l'exposé

1. Modélisation

1.1 Présentation du modèle

1.2 Limites de fonctionnement

2. Validation expérimentale

3. Exploitation

4. Couplage

5. Transitoires

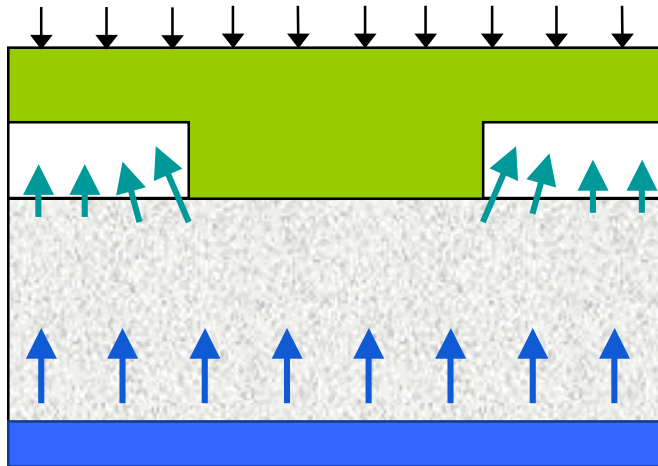
Conclusion

1.1 Modélisation : Présentation

2 régimes de fonctionnement sont étudiés

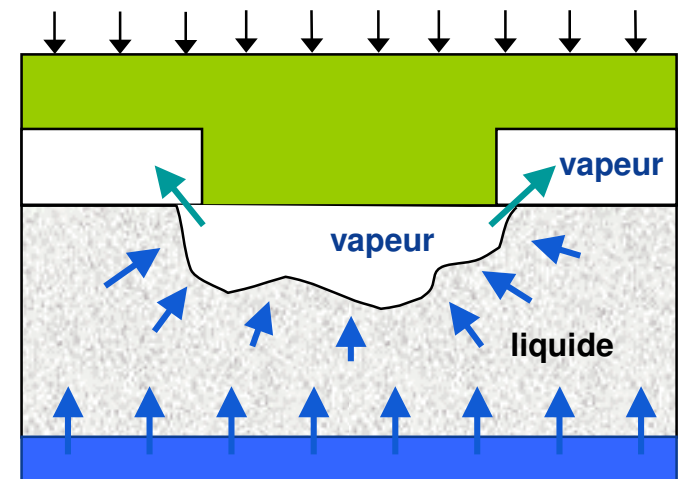
Mèche saturée de liquide :

Pour de faibles flux



Hypothèse de poche vapeur dans le milieu poreux :

Pour des flux plus élevés



Transition entre les deux régimes :

Hypothèse sur l'apparition de la vapeur par nucléation : $\Delta T_{\text{nucl}} = T_E - T_{\text{sat}} = 3^\circ\text{C}$

1.1 Modélisation : Présentation

Approche mixte (réseau de pores / Eq. Homogénéisées) :

➤ Chaque liaison à :

- une conductance hydraulique $K_{ij}(\bullet_{ij})=K_{\text{moy}}=K$
- une conductivité locale $\lambda_{ij}=\lambda^*_{\text{moy}}=\lambda^*$

➤ Champs de Température et Pression:

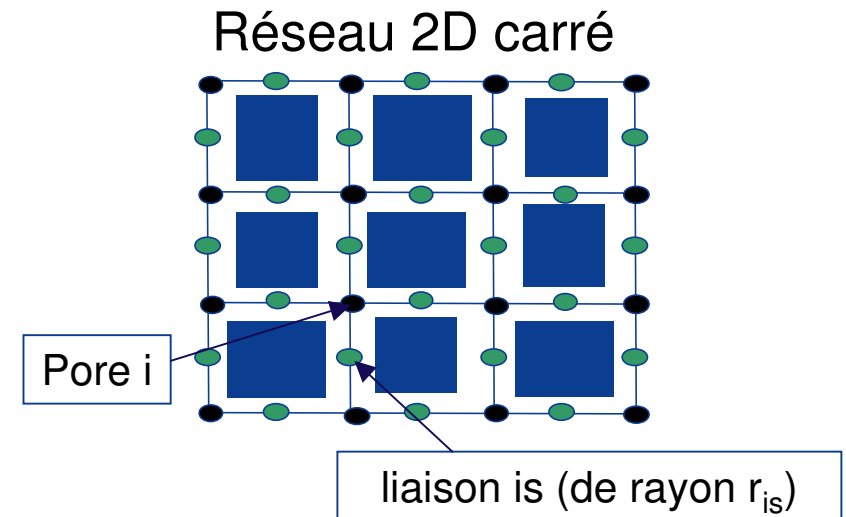
(nœuds \bullet : pores)

résolues par équations homogénéisées,

K et λ^* : paramètres macroscopiques.

➤ Forme poche vapeur :

s'appuie sur la structure réseau (dépend des rayons des liaisons (\bullet_{ij}))



Approche réseau classique \approx Approche mixte

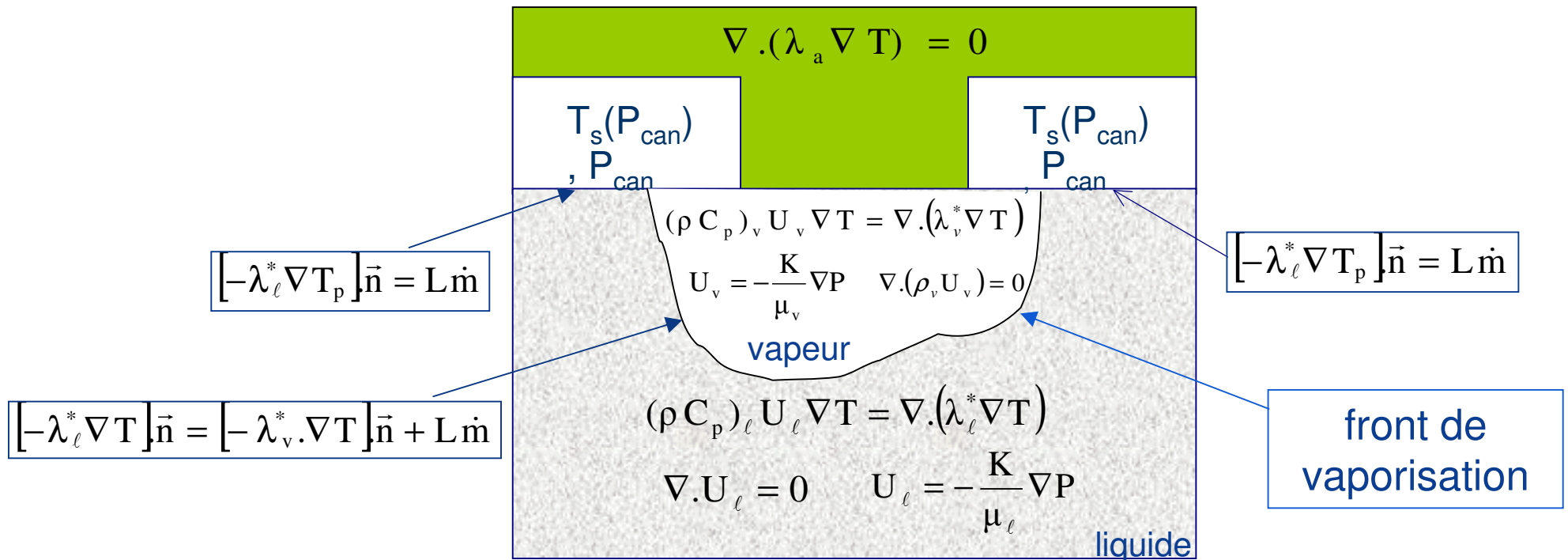
(distributions de conductances)

(paramètres de transports macroscopiques)

OK si distribution taille liaisons pas trop étalée

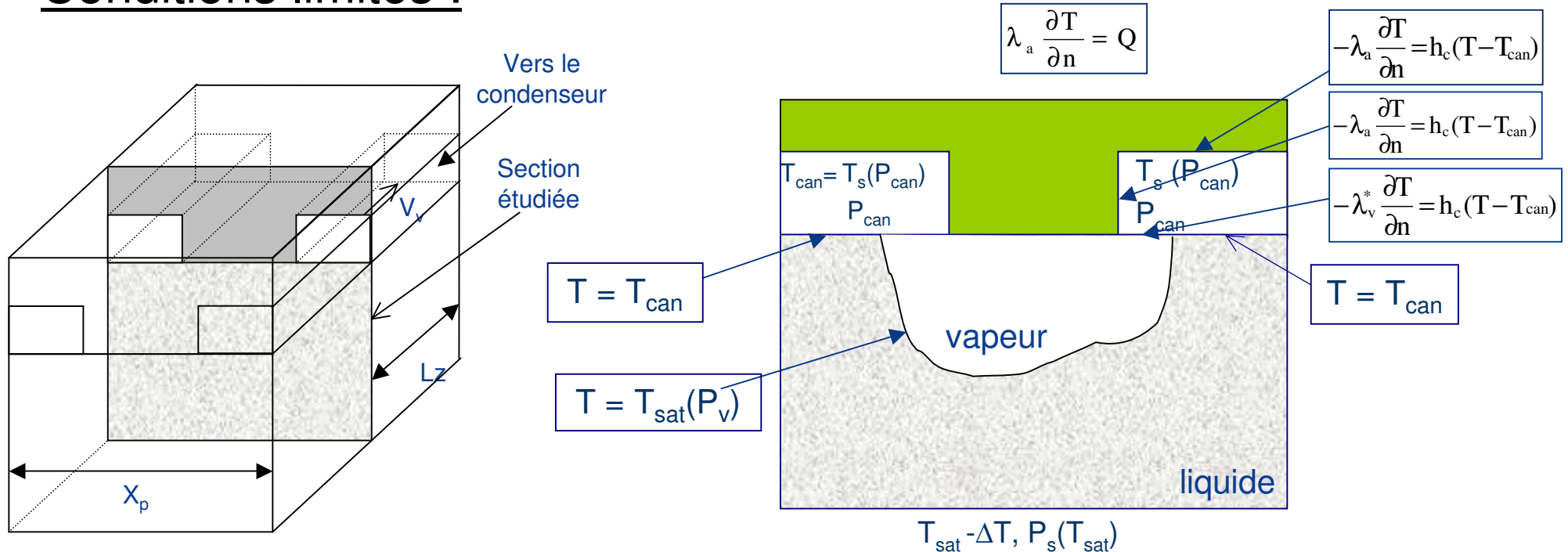
1.1 Modélisation : Présentation

Equations mises en jeu :



1.1 Modélisation : Présentation

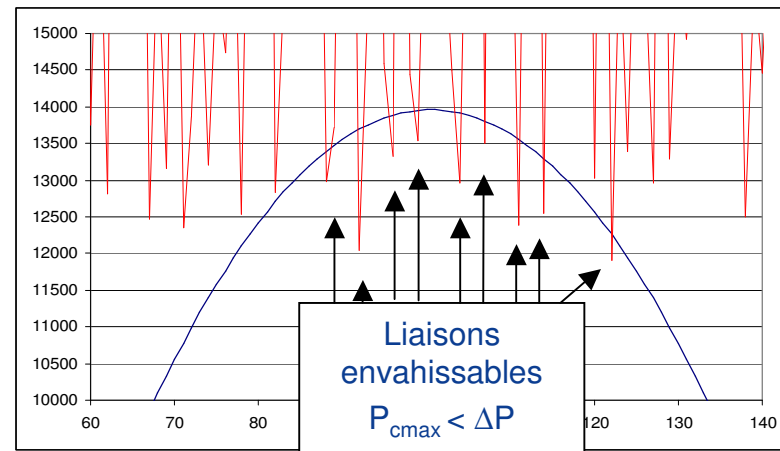
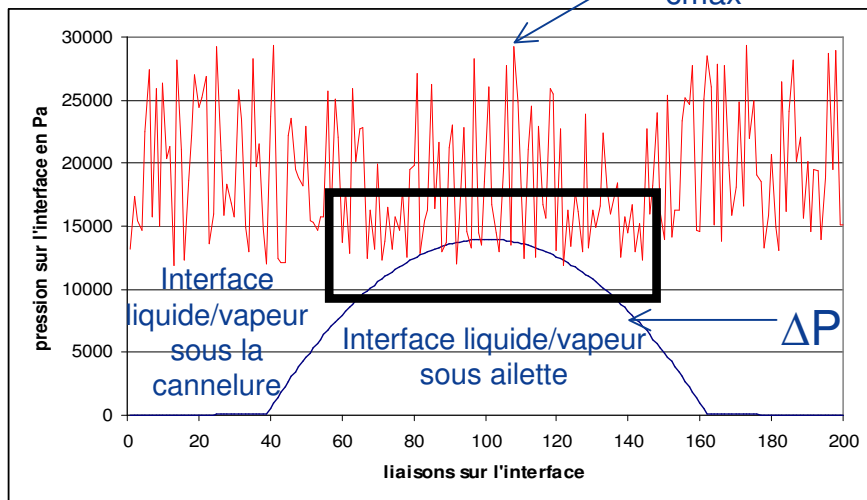
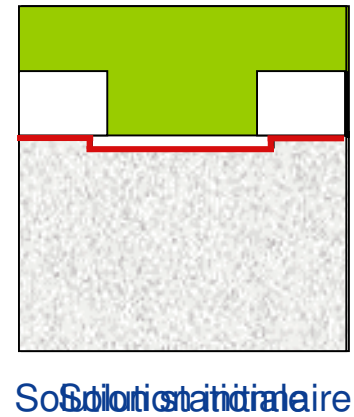
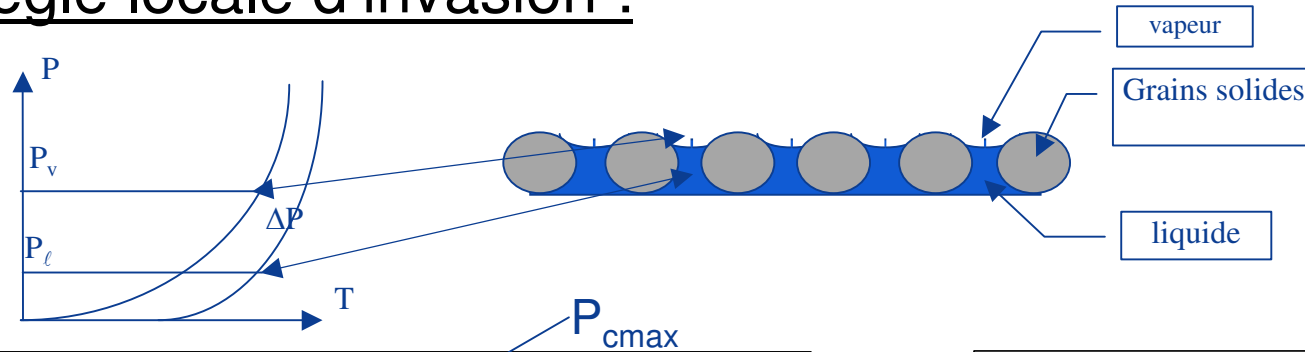
Conditions limites :



- **Écoulement vapeur dans cannelure** : Coefficient convectif h_c
- **Sur le bords** : Conditions de périodicités
- **Chute de pression linéaire** (ΔP_{reste}) :
$$\Delta P_{reste} = P_{can} - P_s(T_{sat}) = \frac{V_v \mu_v L_0}{\kappa}$$

1.1 Modélisation : Présentation

Règle locale d'invasion :



$$P_v - P_l = \Delta P \neq 0$$

$$P_{cmax} = 2\sigma / r_i$$

avec r_i diamètre de la liaison considérée

Si $\Delta P > P_{cmax}$
 alors la liaison i est envahissable
 Sinon pas d'invasion

→ **solution stationnaire**

1.1 Modélisation : Présentation

Bilan de flux

Le bilan total :

$$Q = Q_p + Q_c + Q_l + Q_v + Q_{\text{évap}}$$

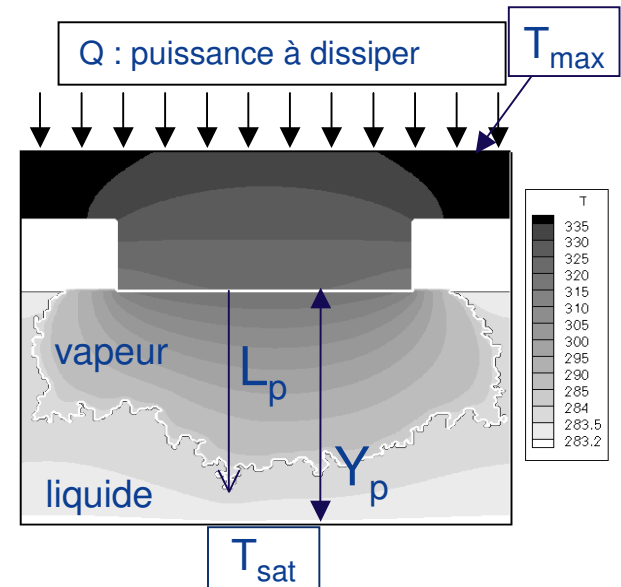
Q_p = Flux parasite perdu par conduction à l'entrée de la mèche

Q_c = Flux perdu par convection au niveau des cannelures

Q_l = Flux perdu pour réchauffer la phase liquide

Q_v = Flux perdu pour réchauffer la phase vapeur

$Q_{\text{évap}}$ = Flux servant à vaporiser le liquide



Paramètres étudiés

le rendement (η en %)

$$\rightarrow \eta = Q_{\text{évap}}/Q$$

la profondeur de la poche vapeur

$$\rightarrow L_p/Y_p$$

la saturation : nombre de pores envahis par vapeur / nombre de pores total

la surchauffe du bâti métallique

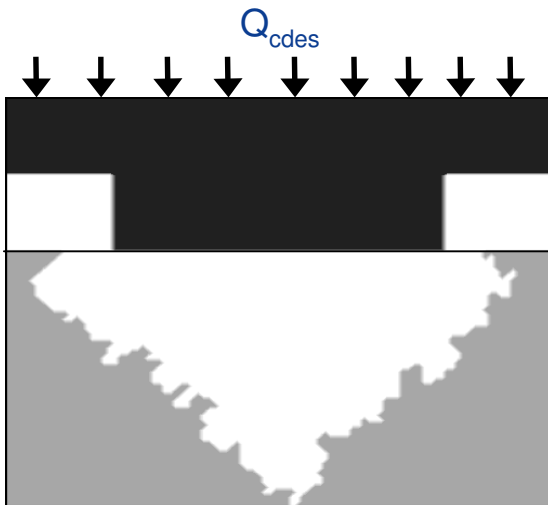
$$\rightarrow \Delta T_{\text{max}} = T_{\text{max}} - T_{\text{sat}}$$

le flux parasite (en %)

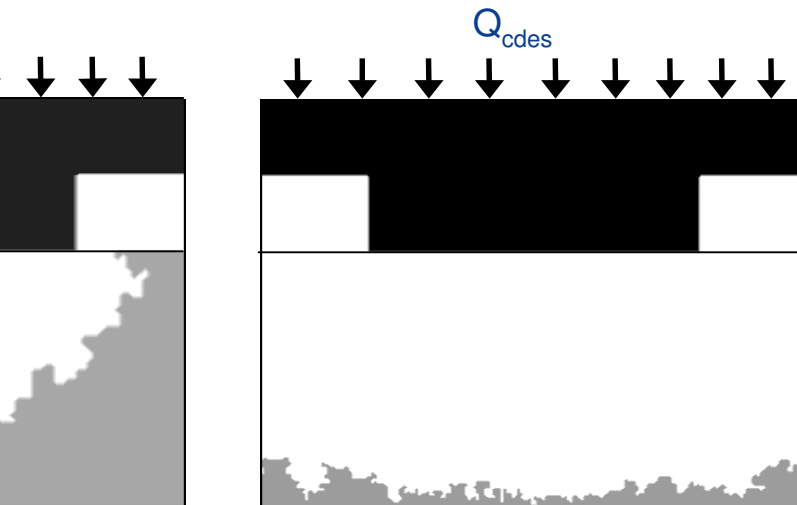
$$\rightarrow Q_p/Q$$

1.2 Limites de fonctionnement

Limite de
Désamorçage

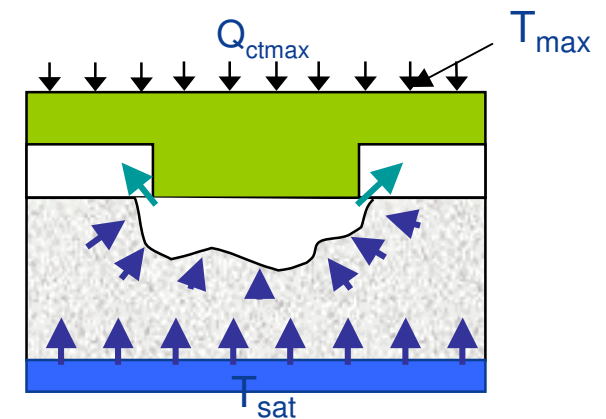


Si la vapeur traverse
complètement la
mèche



Si la vapeur sature à
plus de 85% la
mèche

Limite de
Surchauffe



$$\Delta T_{\max} = T_{\max} - T_{\text{sat}} = \Delta T_{\text{limite}}$$

Plan de l'exposé

1. Modélisation

2. Validation expérimentale

2.1 Dispositif expérimental

2.2 Résultats expérimentaux

3. Exploitation

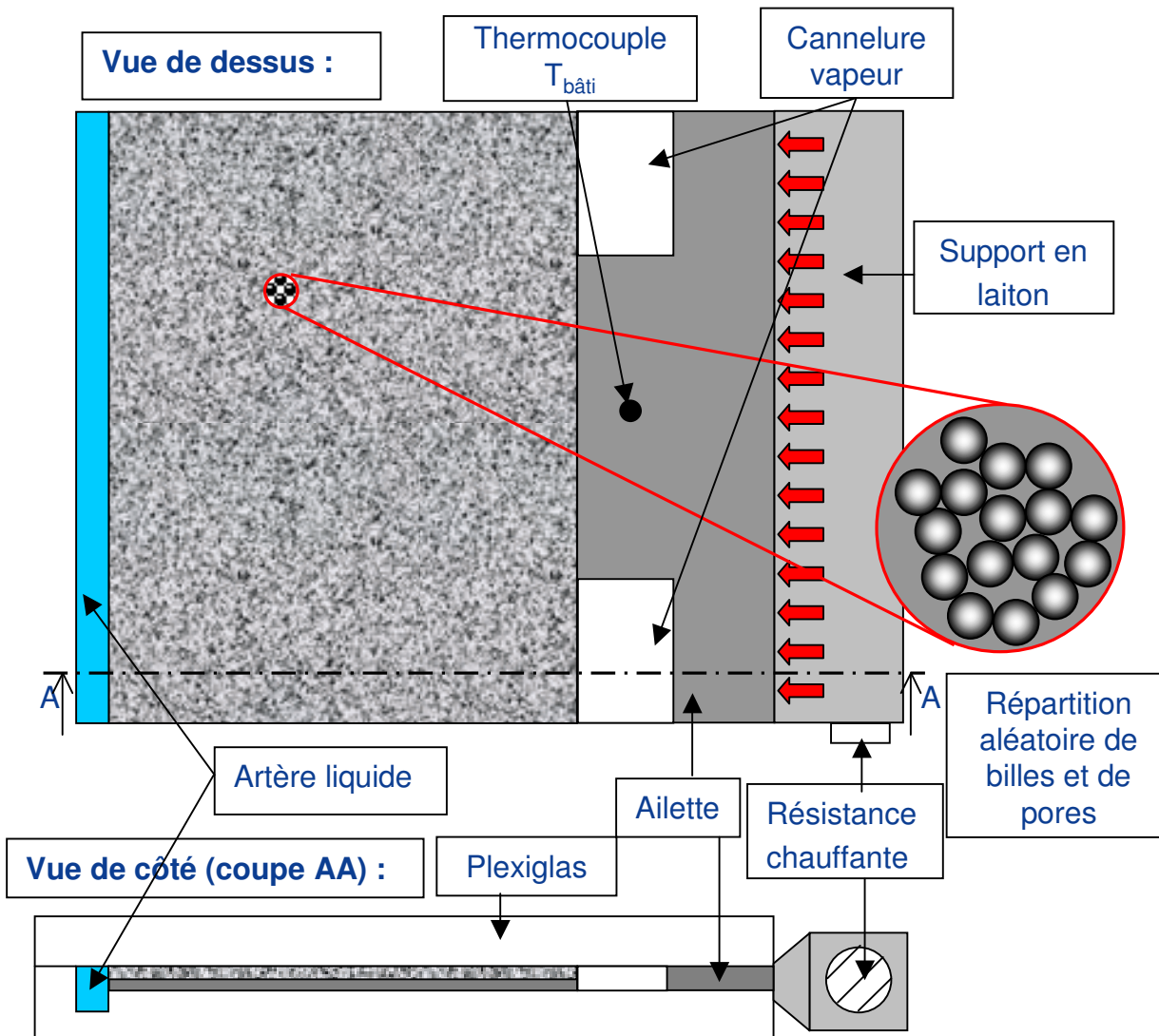
4. Couplage

5. Transitoires

Conclusion

2.1 Dispositif expérimental

Le micromodèle :




Caractéristiques :

- Répartition aléatoire monocouche de billes de 1mm de diamètre,
- Perméabilité : $K = 9,68 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$
- Porosité : $\varepsilon = 0.52$
- Fluide utilisé : **Fluorinert**
(température d'ébullition de 50°C)
- Saturation du micromodèle par immersion dans le fluide caloporteur et dépressurisation dans une enceinte à vide



2.2 Résultats expérimentaux

Micromodèle 
<i>Essai à 2W</i>
$T_{\text{chambre}} = 42^{\circ}\text{C}$
$T_{\text{bâti}} = 48^{\circ}\text{C}$
$T_{\text{liq}} = 42^{\circ}\text{C}$
Durée : 20 min
Débit très faible
La poche vapeur se développe dans toute la mèche poreuse

Le code est validé de manière qualitative et quantitative

Plan de l'exposé

1. Modélisation

2. Validation expérimentale

3. Exploitation

3.1 Conductivité thermique de la mèche

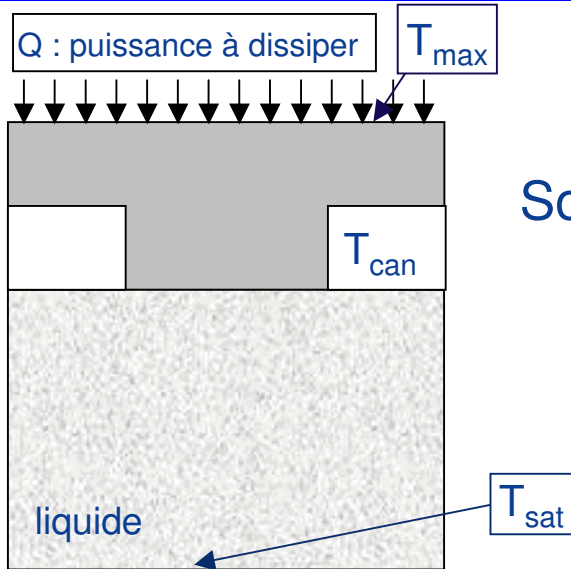
3.2 Modèle bicouche

4. Couplage

5. Transitoires

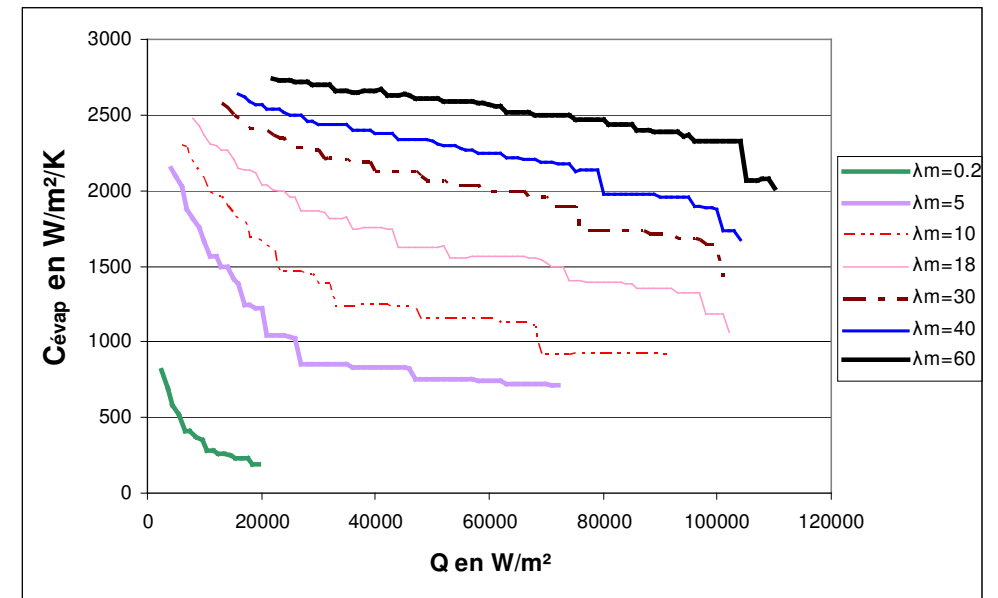
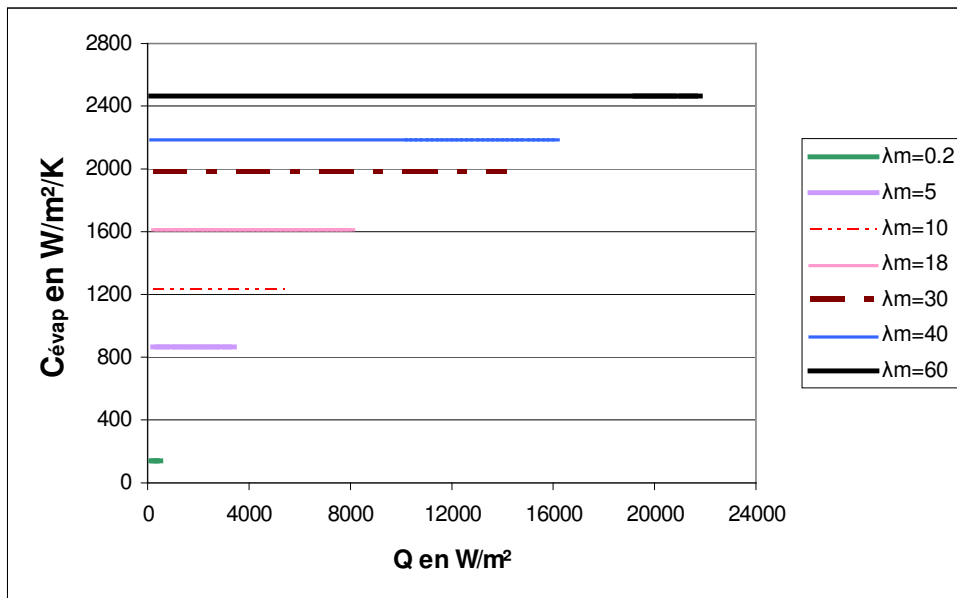
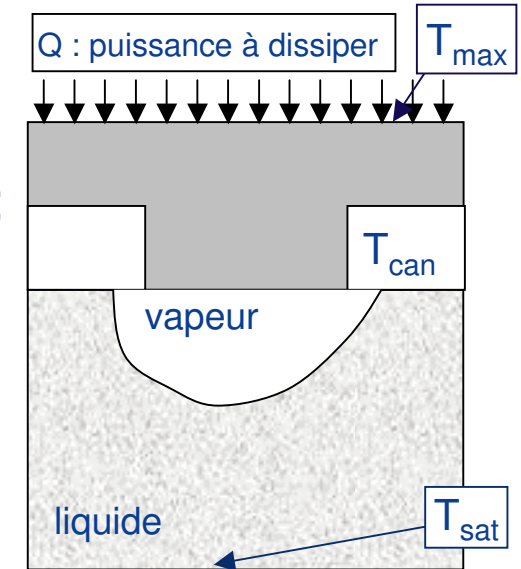
Conclusion

3.1 Conductivité thermique

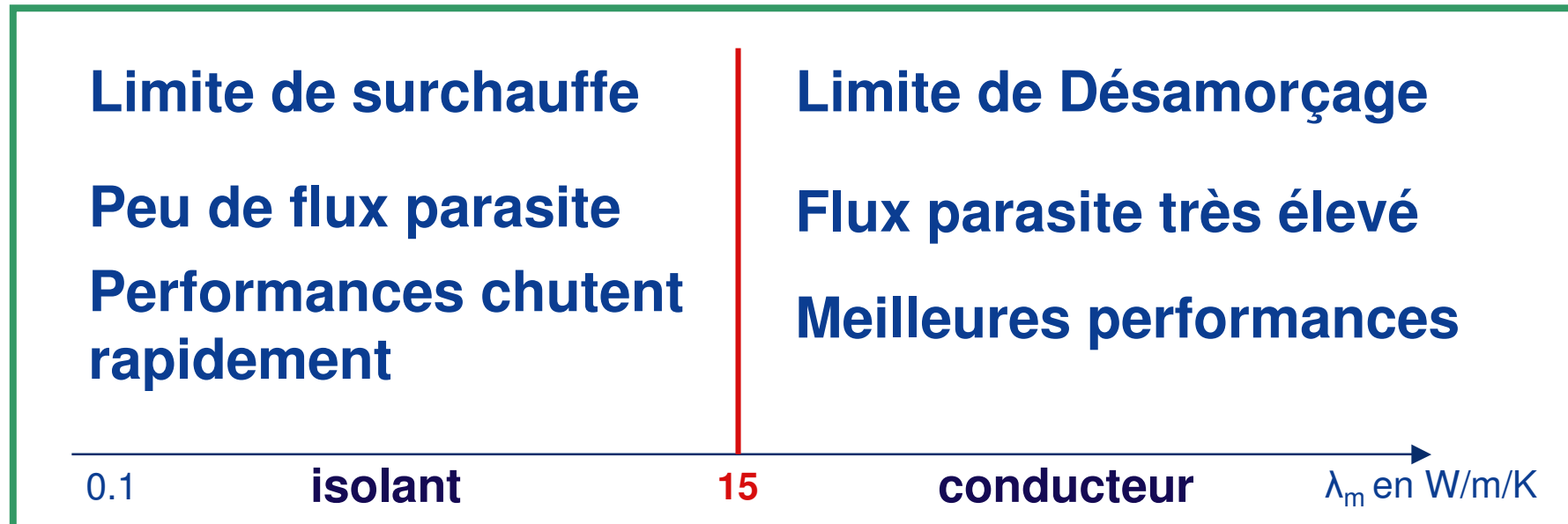


Soit $C_{évap}$ la conductance à l'évaporateur:

$$C_{évap} = Q / (T_{max} - T_{can})$$



3.1 Conductivité thermique



Pour limiter le flux parasite :

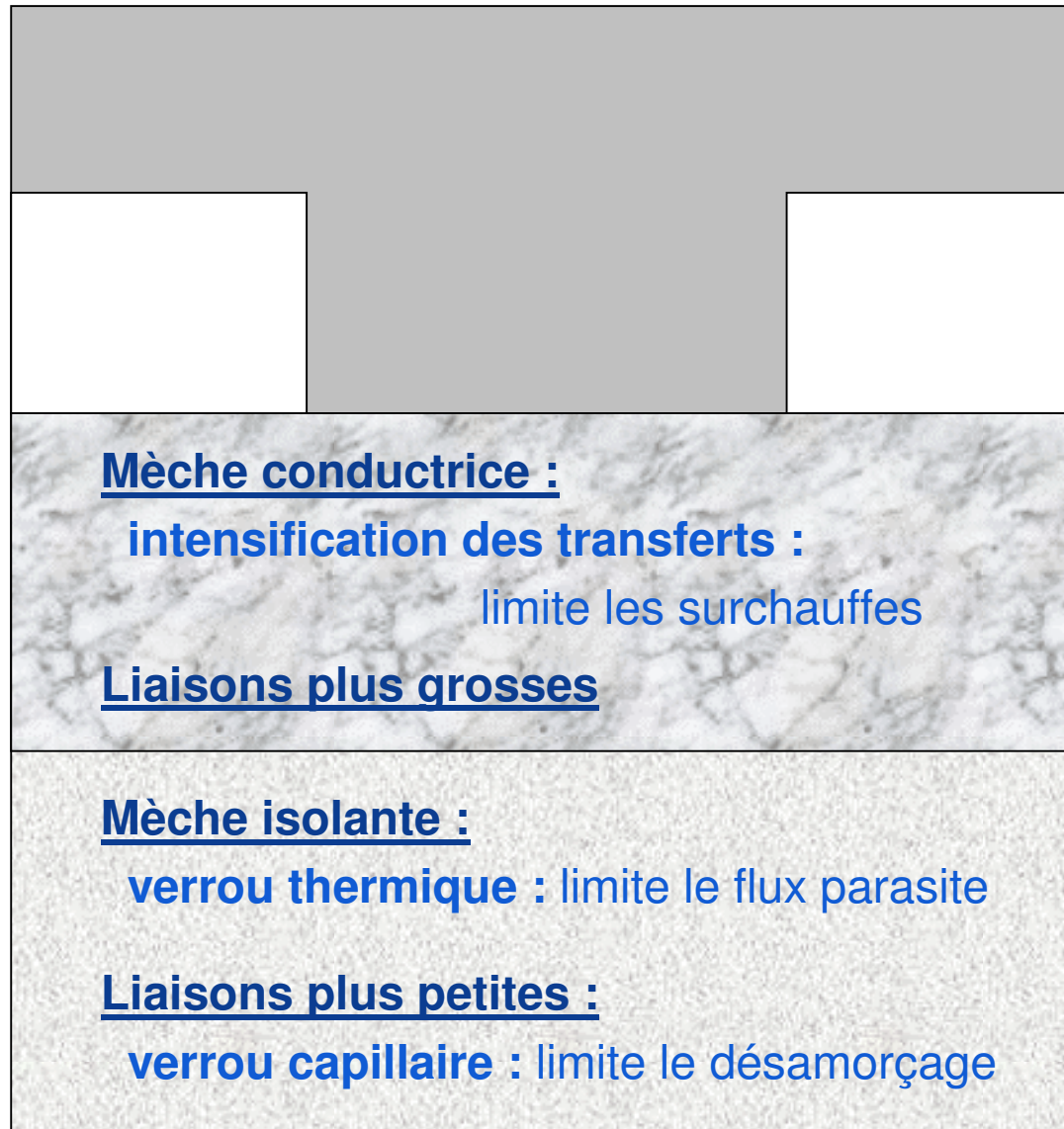
mettre couche isolante à l'entrée de la mèche

Pour limiter les surchauffes :

mettre couche conductrice sous le bâti métallique



3.2 Modèle bicouche



Plan de l'exposé

1. Modélisation

2. Validation expérimentale

3. Exploitation

4. Couplage

4.1 Modèle de boucle mixte (nodal – réseau de pore)

4.2 Courbes de fonctionnement

5. Transitoires

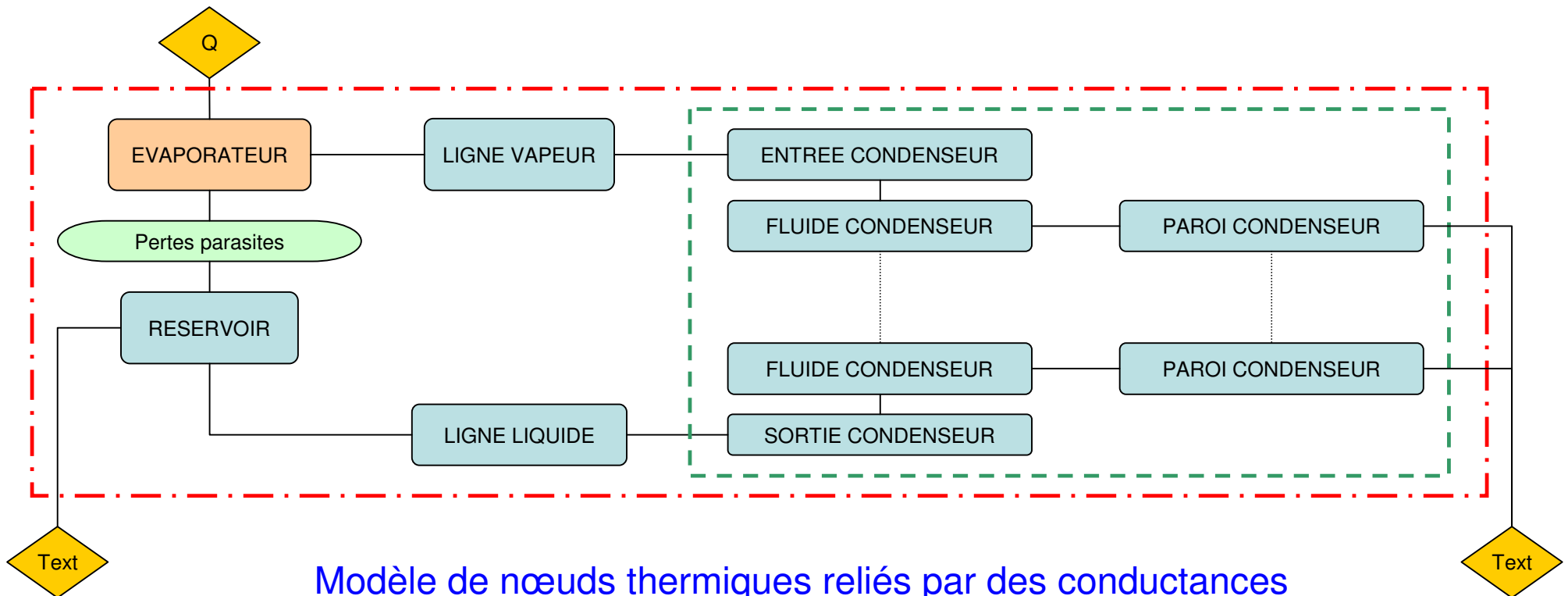
Conclusion

4.1 Modèle de boucle mixte (nodal – réseau de pore)

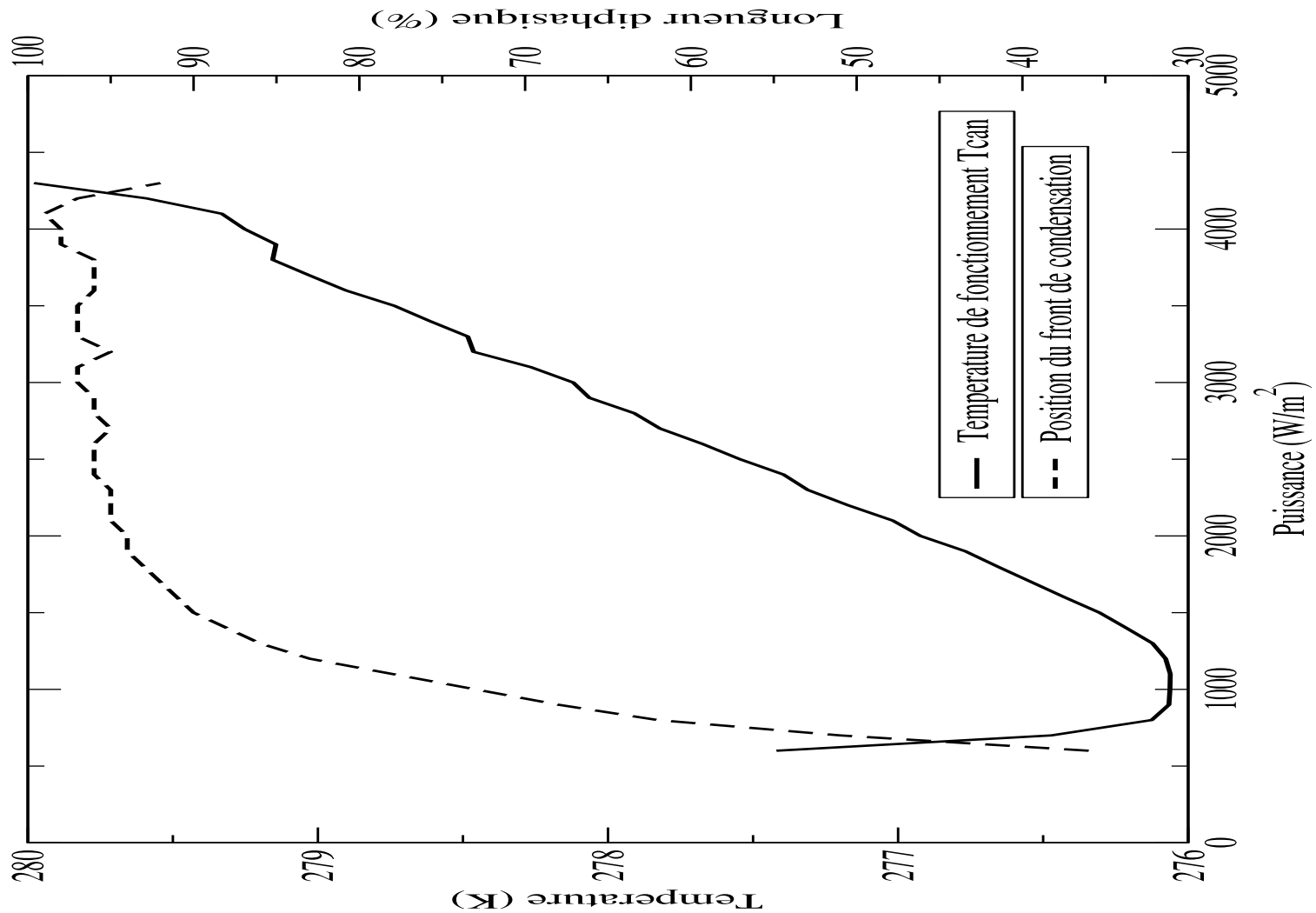
Objectifs : Meilleure maîtrise des conditions limites

Aider à trouver un optimum de perméabilité (par le calcul des pertes de pression)

Retrouver la courbe de fonctionnement des LHP



4.2 Courbes de fonctionnement



Plan de l'exposé

1. Modélisation
2. Validation expérimentale
3. Exploitation
4. Couplage
5. Transitoires
 - 5.1 Objectifs
 - 5.2 Méthode

Conclusion

5.1 Transitoires : Objectifs

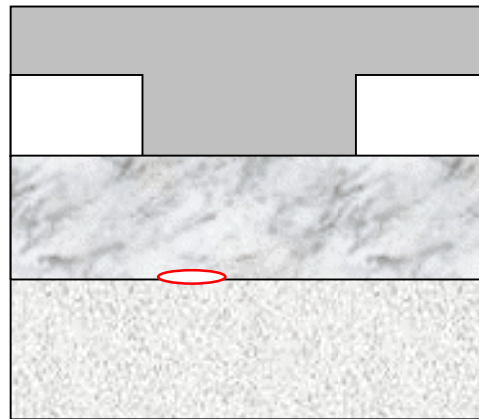
Amélioration de la solution stationnaire

Comprendre la dynamique de certains fonctionnements critiques en vue d'optimiser l'évaporateur :

- Changements de puissance
- Démarrages
- Puissance sur le réservoir

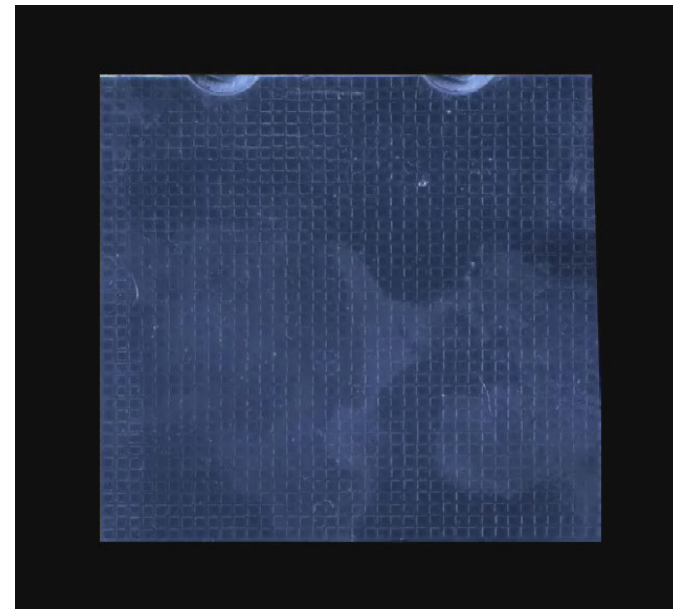
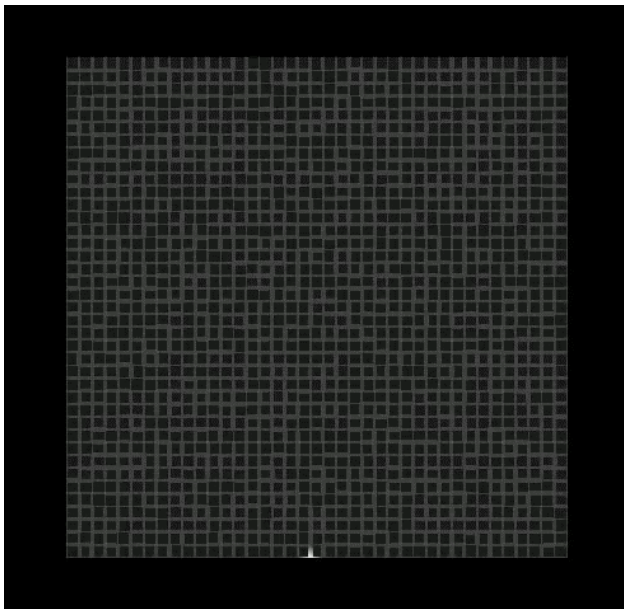
Modéliser de nouveaux problèmes liés aux mèches bicouches :

- Apparition de vapeur entre les deux couches



5.2 Transitoires : Méthode

1. Étude isotherme de la croissance d'une poche de vapeur dans un milieu poreux pilotée par la pression du gaz uniquement
2. Étude de la croissance d'une poche de vapeur dans un milieu poreux pilotée par le changement de phase
3. Validation expérimentale des étapes 1 et 2
4. Exploitation du modèle



Conclusion

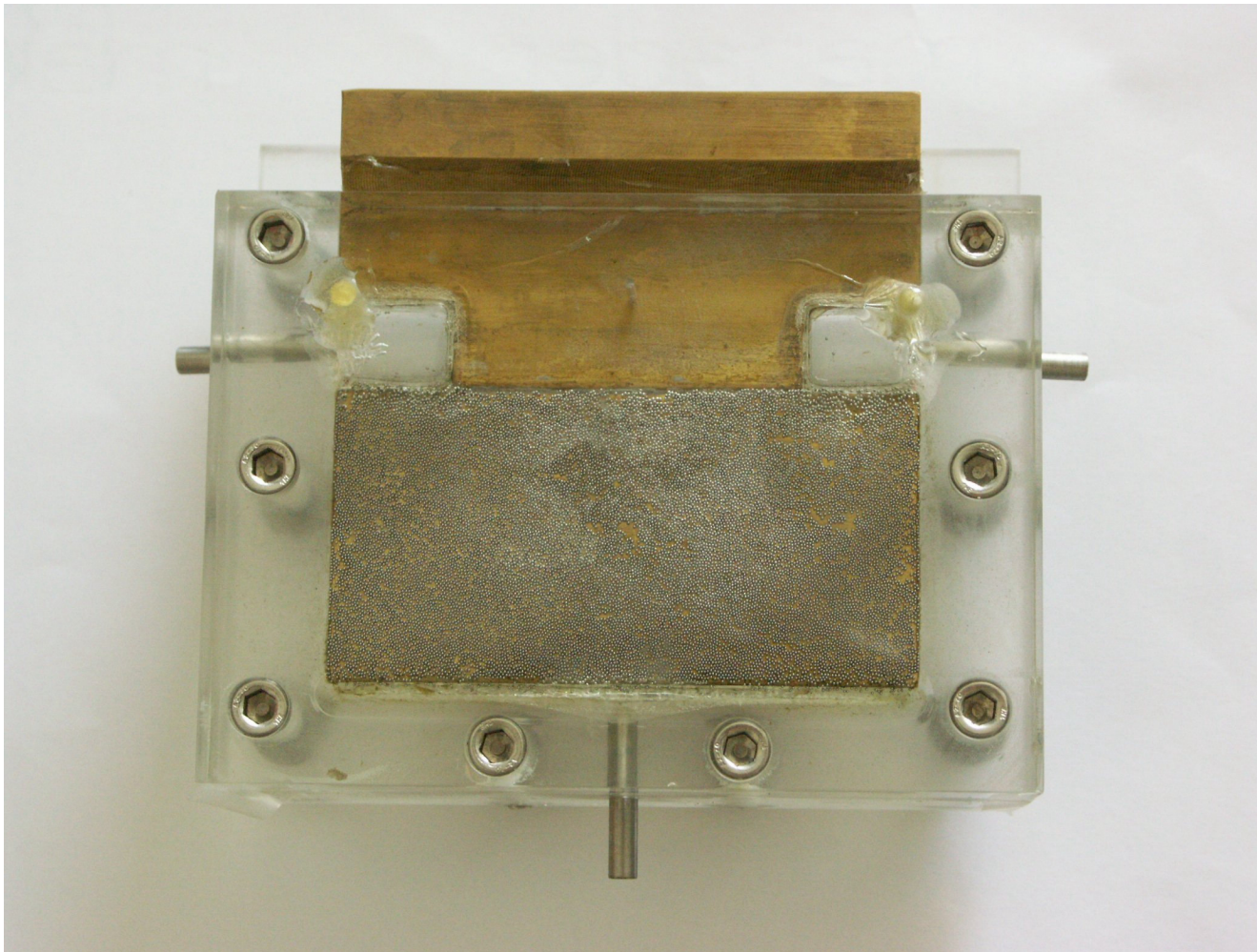
- **Outil de simulation des transferts couplés au sein d'un élément d'évaporateur**
- **Validation du modèle par une expérience de visualisation**
- **Optimisation du design : modèle bicouche**
- **Couplage à un modèle de boucle**

Perspectives :

- Réaliser une étude systématique des transferts dans l'évaporateur avec le modèle de boucle
- Valider expérimentalement le code numérique de croissance dans un milieu poreux pilotée par la mise en pression de la poche vapeur
- S'appuyer sur les résultats précédents pour développer le modèle de transfert de masse et de chaleur avec changement de phase en transitoire dans l'évaporateur



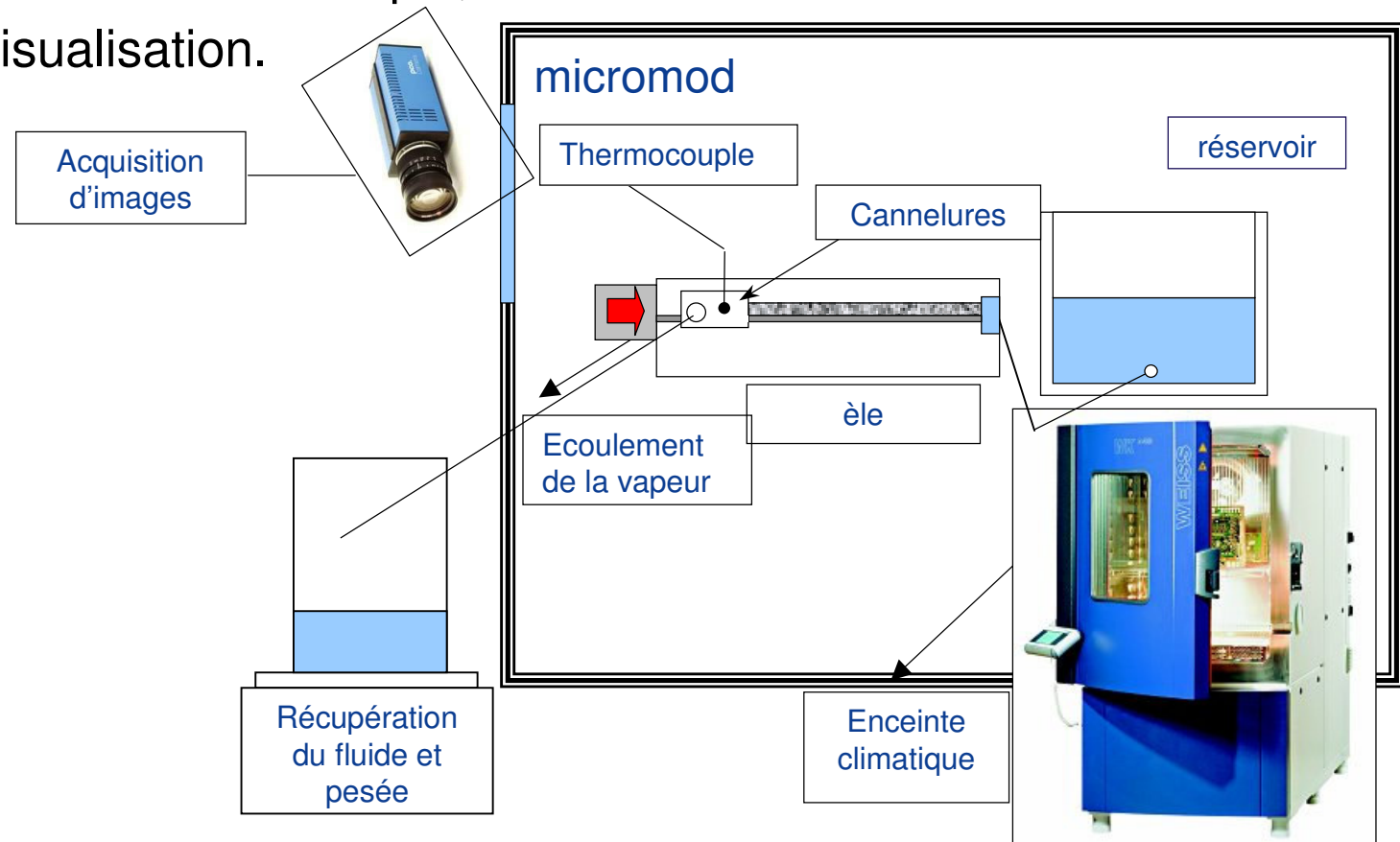
Micromodèle



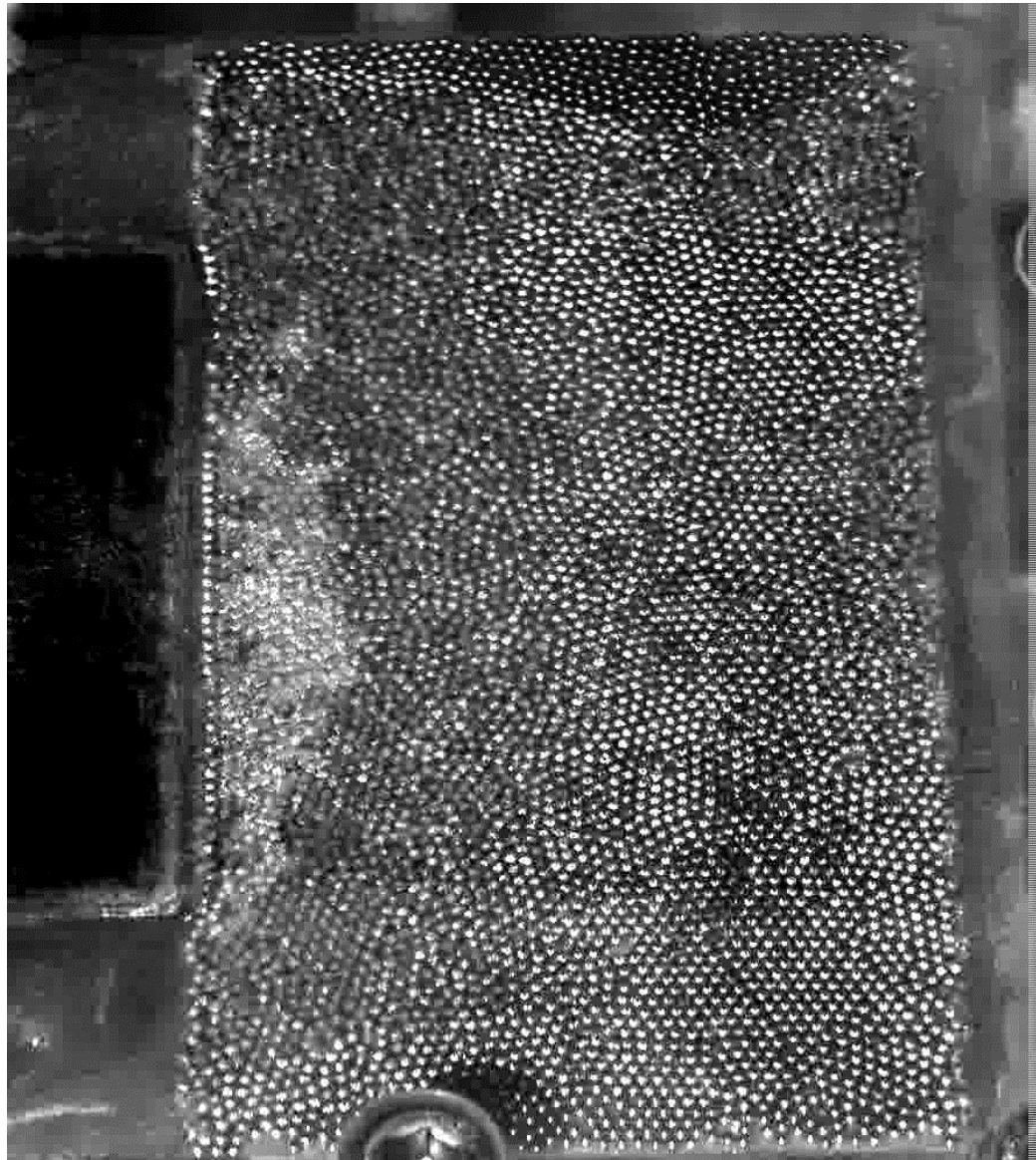
2.1 Dispositif expérimental

● Présentation générale :

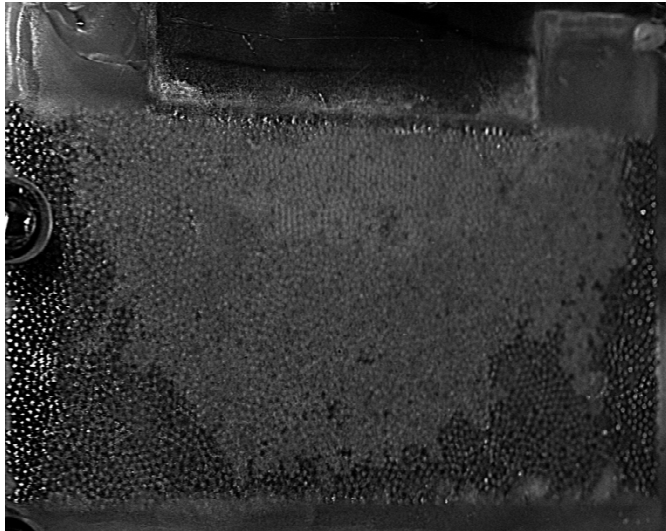
- système ouvert contenant un modèle d'évaporateur capillaire 2D,
- « évaporateur » relié à un réservoir et à un bac de récupération, ensemble placé dans un enceinte climatique,
- caméra pour visualisation.



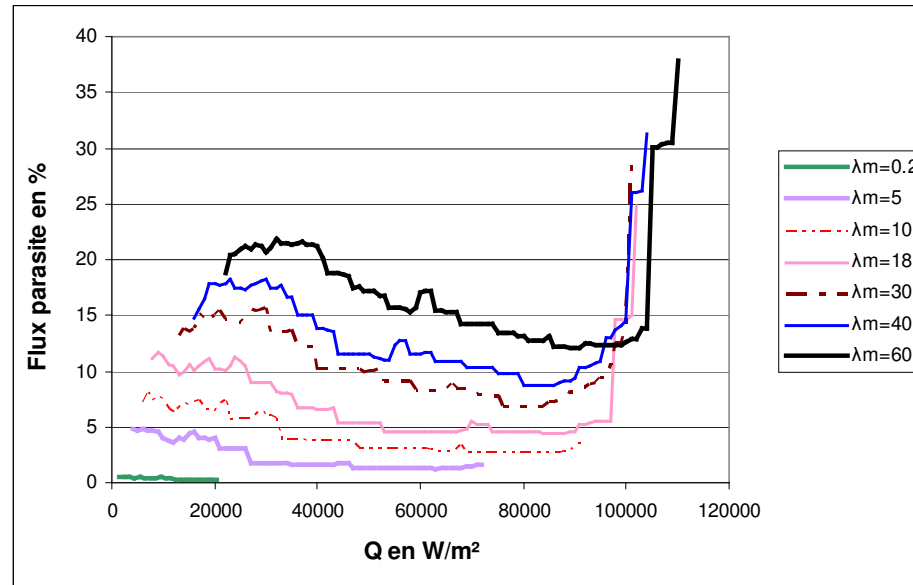
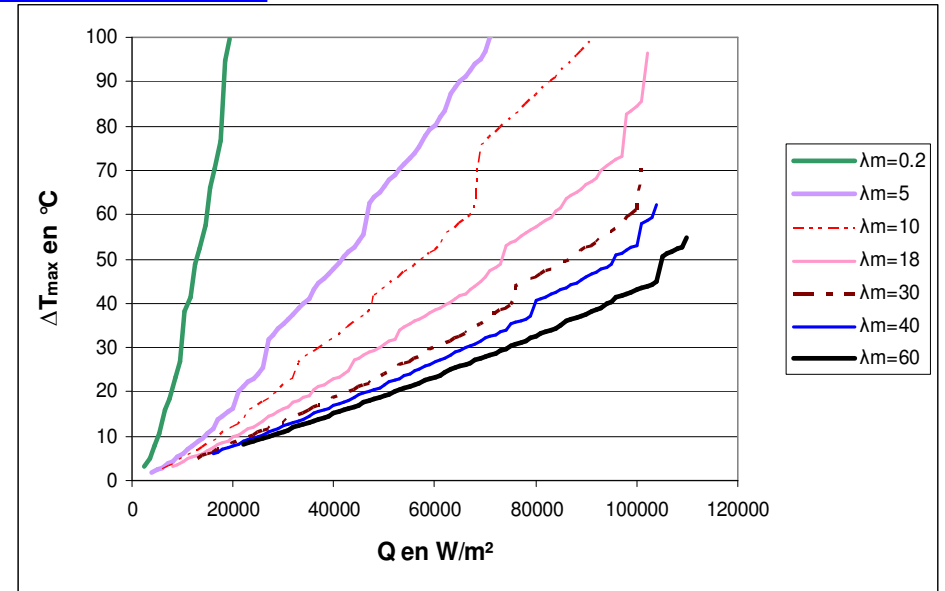
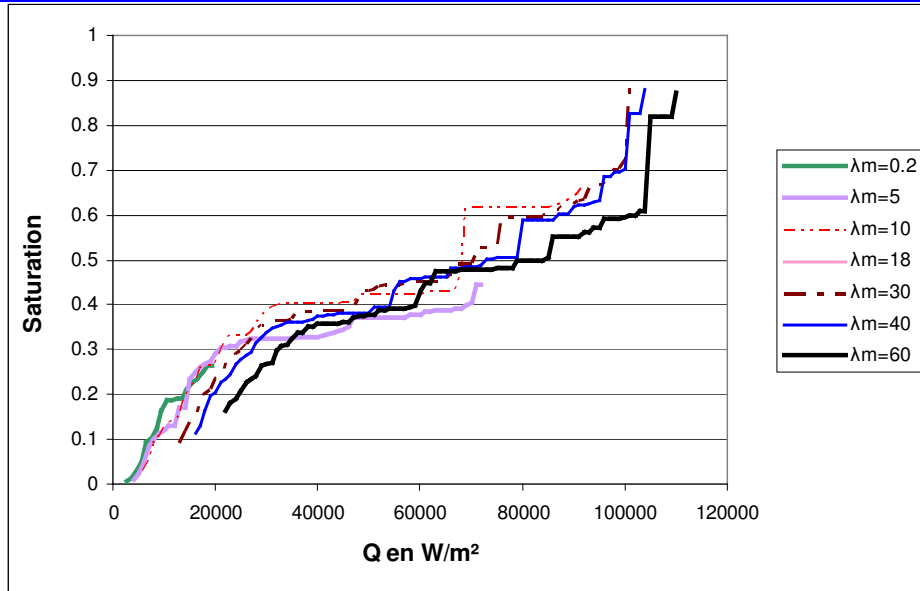
Micromodèle



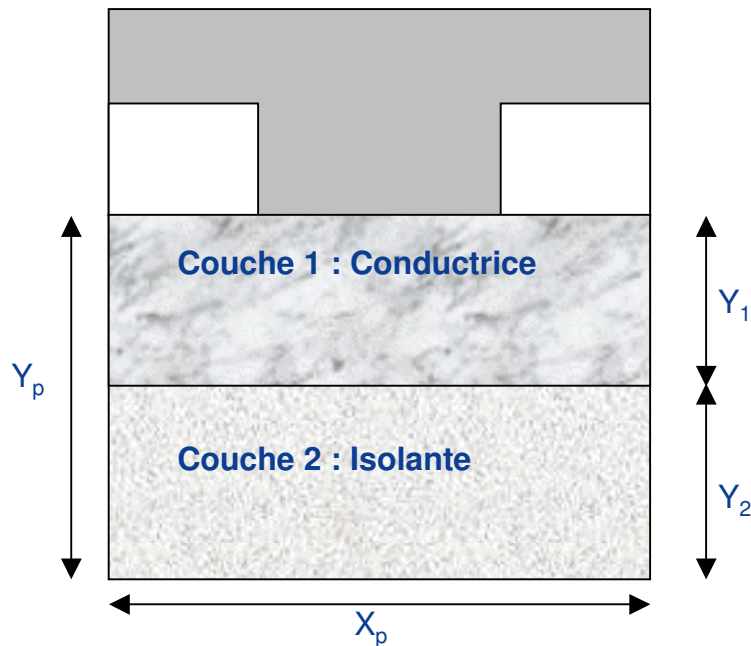
Micromodèle



3.1 Conductivité thermique



3.2 Modèle bicouche



➤ **e** : épaisseur relative, $e = \frac{Y_1}{Y_p}$

$$0.11 < e < 0.75$$

➤ **Conductivité :**

couche 1 conductrice : $\lambda_{m1} = 30 \text{ W/m/K}$

couche 2 isolante : $\lambda_{m2} = 0.2 \text{ W/m/K}$

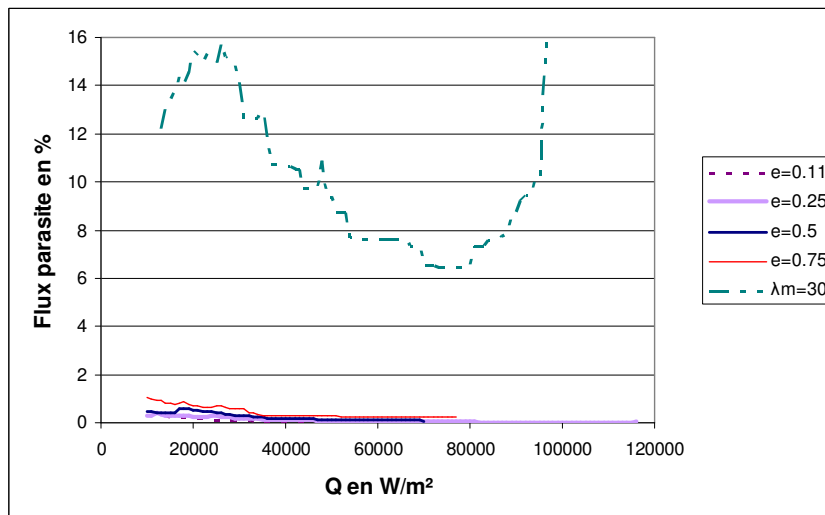
➤ **Distribution taille des liaisons :**

couche 1 et 2 : r_{\min} et r_{\max}

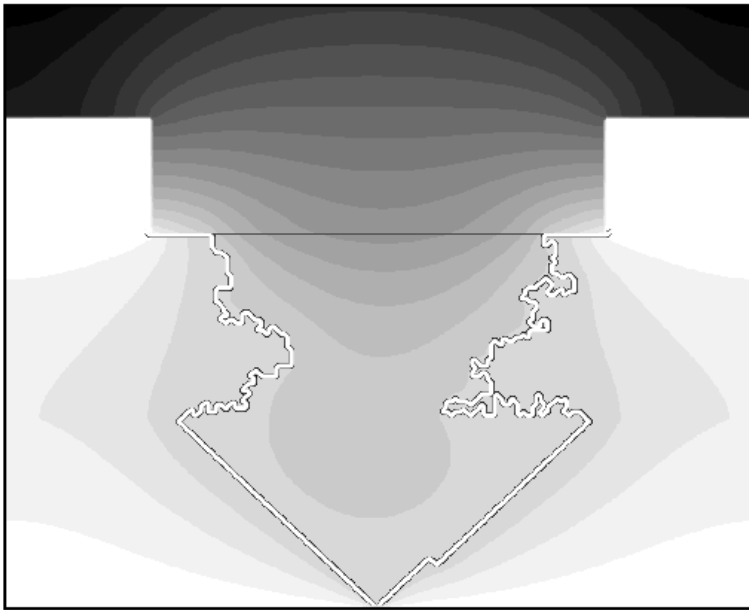
➤ **Perméabilité :**

$$K_1 = K_2 = 4 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$$

$\lambda_m = 30$: mèche homogène conductrice de 30 W/m/K
(mêmes propriétés que couche 1 et 2)

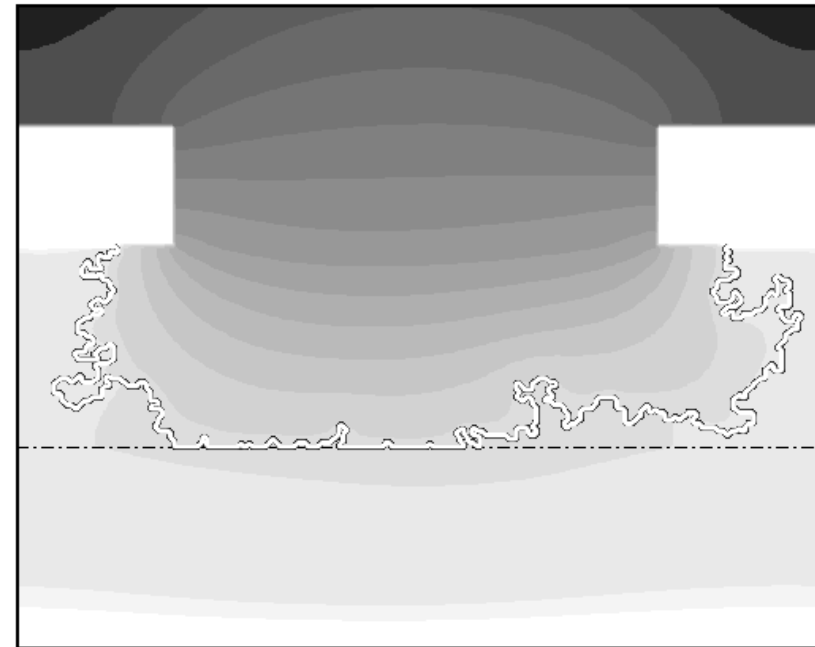


3.2 Modèle bicouche



Couche 1 : petites liaisons

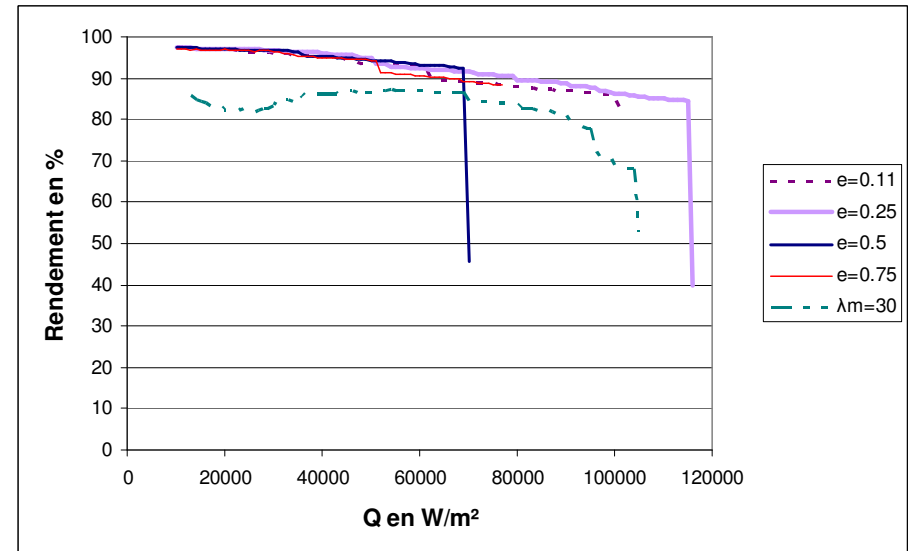
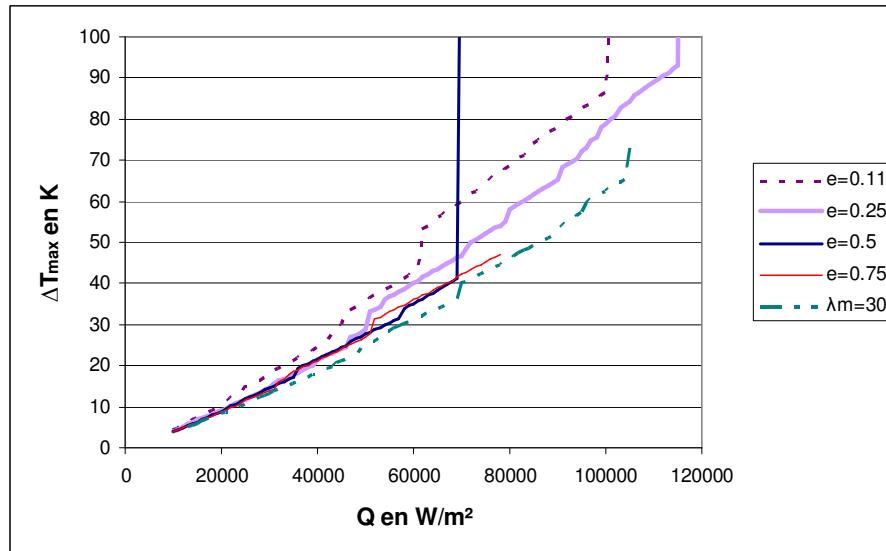
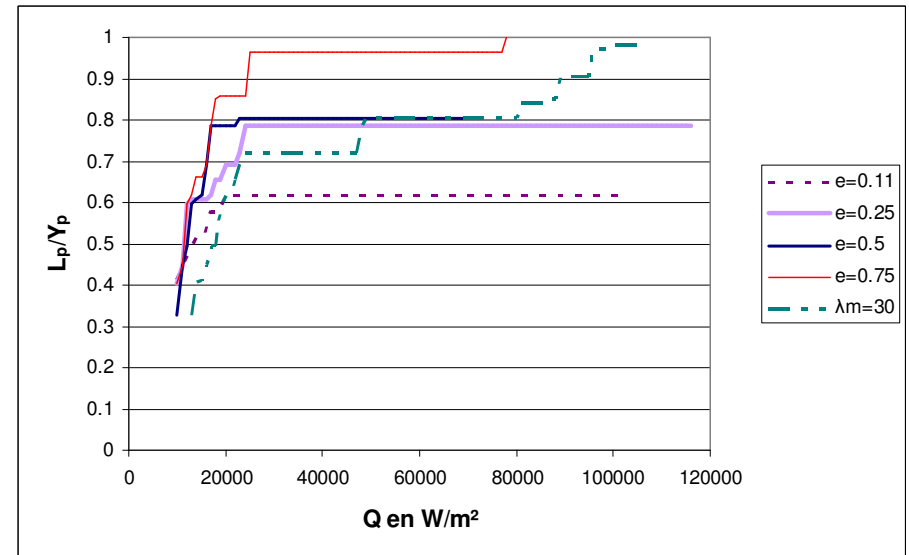
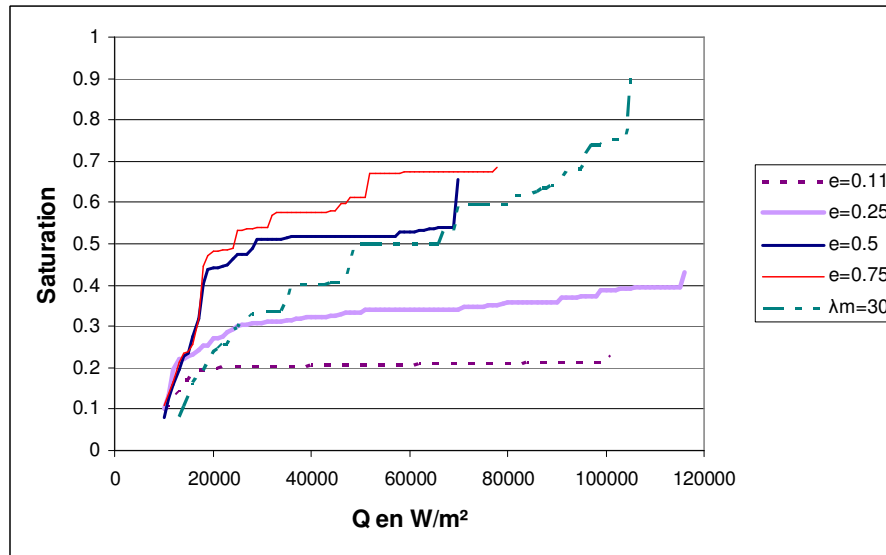
Couche 2 : grosses liaisons



Couche 1 : grosses liaisons

Couche 2 : petites liaisons

3.2 Modèle bicouche

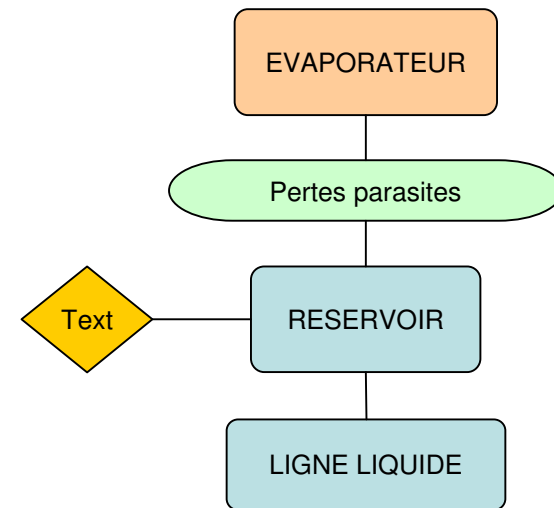


4.1 Modèle de boucle mixte (nodal – réseau de pore)

Détail du réservoir : $\dot{Q}_P = \dot{Q}_{SR} + \dot{Q}_{EXT}$

$$\dot{Q}_{SR} = \dot{m}C_p (T_{res} - T_{ll})$$

$$\dot{Q}_{EXT} = C_{EXT} (T_{res} - T_{ext})$$



Détail des lignes fluides :

• Supposées adiabatiques $T_{lv} = T_{can}$ $T_{ll} = T_{sortiecondenseur}$

• Calcul des pertes de pression $\Delta P = \frac{\lambda L \rho U^2}{2D_h}$

Ligne vapeur (turbulent) $\lambda = \frac{0.316}{R_e^{0.25}}$ Ligne liquide (laminaire) $\lambda = \frac{64}{R_e}$

4.1 Modèle de boucle mixte (nodal – réseau de pore)

Détail du condenseur :

Calcul de la température de paroi :

$$C_{EXT} (T_{ext} - T_{p_i}) = h_{conv} dS (T_{p_i} - T_{f_i})$$

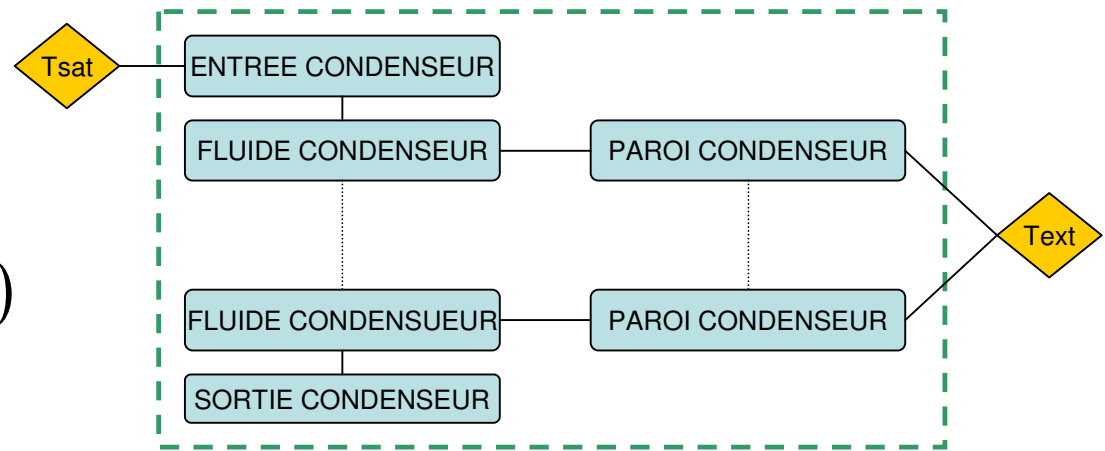
Calcul de la température du fluide :

$$\dot{m} C_p (T_{f_{i-1}} - T_{f_i}) = h_{conv} ds (T_{p_i} - T_{f_i})$$

Calcul du titre vapeur :

$$X(i) = \frac{H(i) - H_{liq}(T_{sat})}{H_{vap}(T_{sat}) - H_{liq}(T_{sat})}$$

$$H(i) = H(i-1) + \frac{Q_{ech}}{\dot{m}}$$



Calcul des pertes de pression :

$$\rho = \left(\frac{x}{\rho_v} + \frac{(1-x)}{\rho_l} \right)^{-1} \quad \mu = \left(\frac{x}{\mu_v} + \frac{(1-x)}{\mu_l} \right)^{-1}$$

Transitoire

