

# CASCO

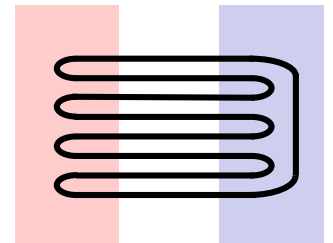
(Code Avancé de Simulation de Caloduc Oscillant)

## Résultats et défis

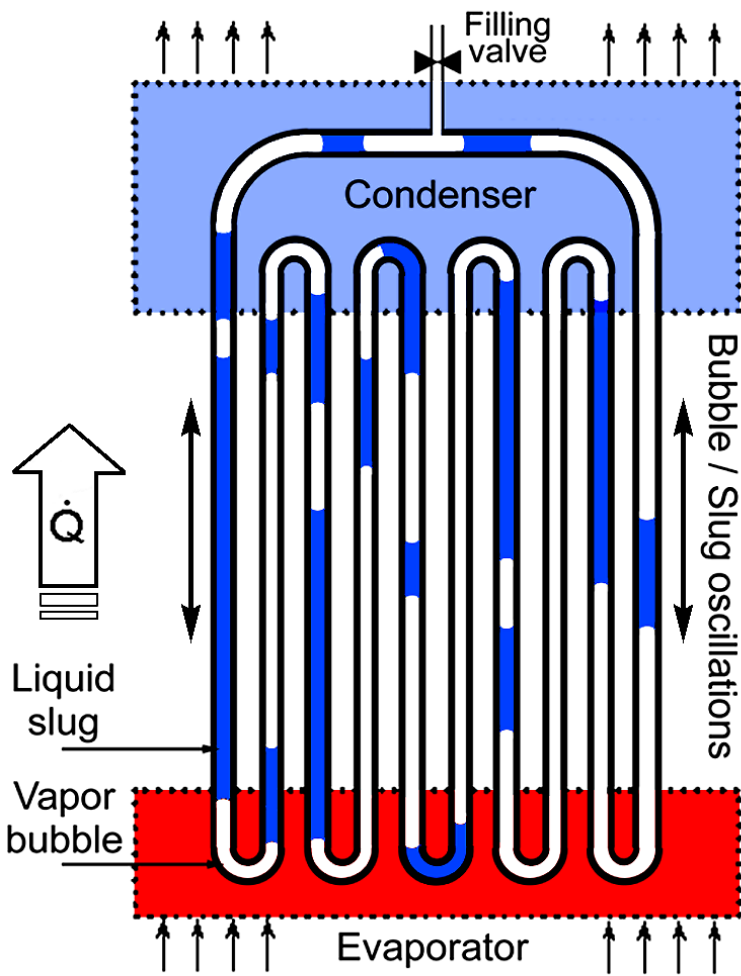
Iaroslav Nekrashevych\* et Vadim Nikolayev

*CEA-Saclay,  
Service de Physique de l'Etat Condensé*

*\*Heat pipe laboratory,  
Institut polytechnique de Kiev, Ukraine*



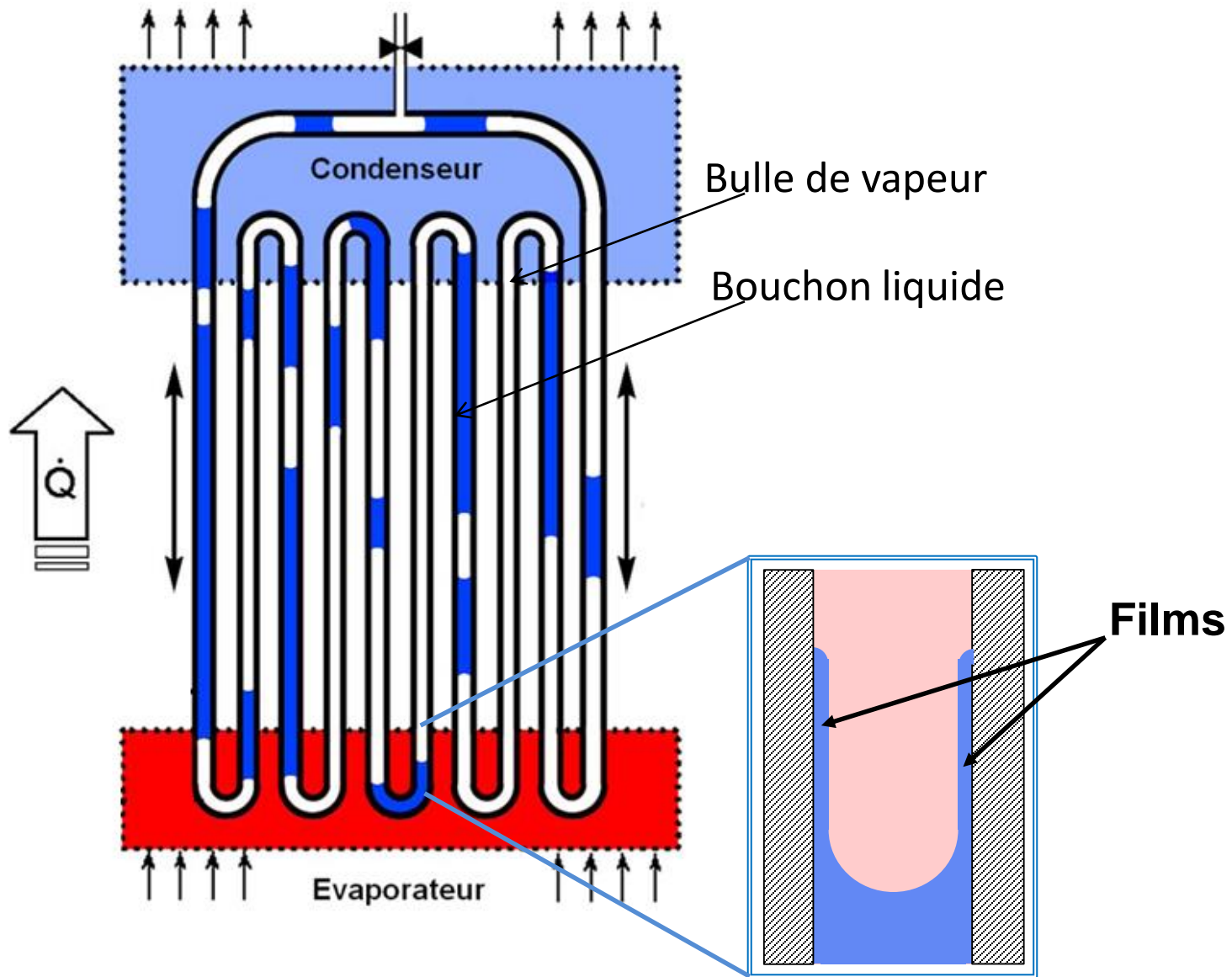
# Caloduc oscillant (Pulsating Heat Pipe, PHP)



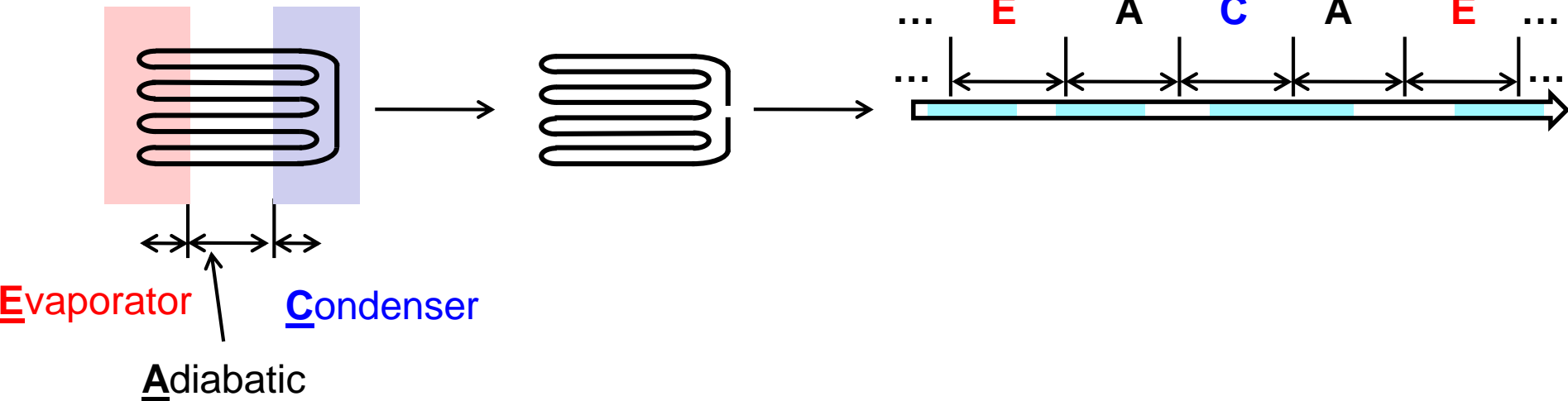
PHP is simple and efficient (latent heat exchange + heat advection) .

**Thermally induced oscillations start spontaneously.**

# Caloduc oscillant (Pulsating Heat Pipe, PHP)



# Approche Shafii, Faghri, Zhang (2001)



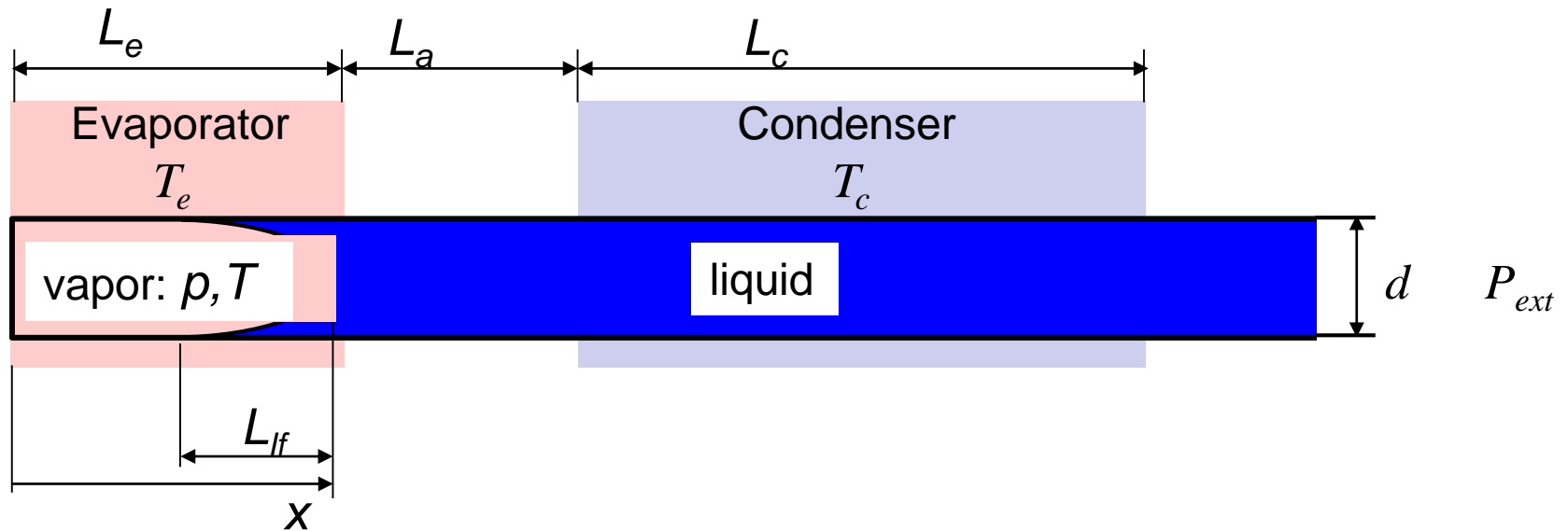
L'approche fondamentale:

1. Réduction 1D: dépliage de PHP bouclé sur un axe avec condition limites périodiques.
2. Description thermodynamique correcte de la vapeur (eq. pour  $T_v$ ).
3. Conduction thermique dans le liquide.

Mais:

1. Echange de masse et de la chaleur sur les ménisques incorrect  $\sim (T_{paroi} - T_v)$
2.  $T_c$  et  $T_e$  fixes (variation discontinue, pas de couplage fluide-paroi)
3. Pas de film

# Introduction des films: Dobson (2004)



1. Découverte du PHP le plus simple (monobranche)
2. Introduction des films de l'épaisseur constante mais longueur variable
3. Mais: Description thermodynamique de la vapeur incorrecte
4. Echanges décrites toujours incorrectement  $\sim (T_{paroi} - T_v)$

# *Approche Holley & Faghri (2005)*

- Introduction du couplage thermique fluide-paroi:  $P_e$  peut être imposée
- Code repris pas plusieurs groupes, développé en particulier à l'U. Pisa par Mameli et al.
- Mais: Description thermodynamique de la vapeur incorrecte (injection de la chaleur latente dans la vapeur), pas de film, échanges décrites incorrectement...

# Notre approche: *PHP monobranche*

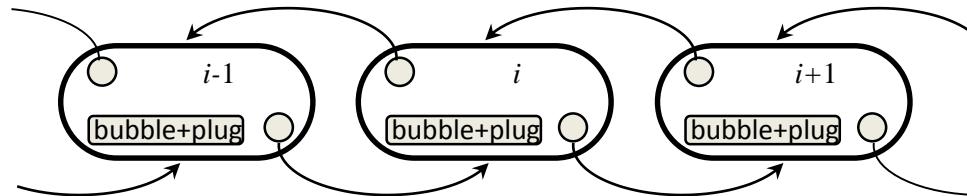
(Das et al., *IJHMT* 2010)

- CEA+CETHIL+IIT Kanpur
- Reprise du modèle de films de Dobson
- Description thermodynamique de la vapeur correcte de Shafii et al.
- Echange de masse et de la chaleur sur les ménisques  $\sim (T_{paroi} - T_{sat})/\delta$
- Méthode Runge-Kutta pour stabilité numérique
- Oscillations stables de grande amplitude
- Accord avec l'expérience

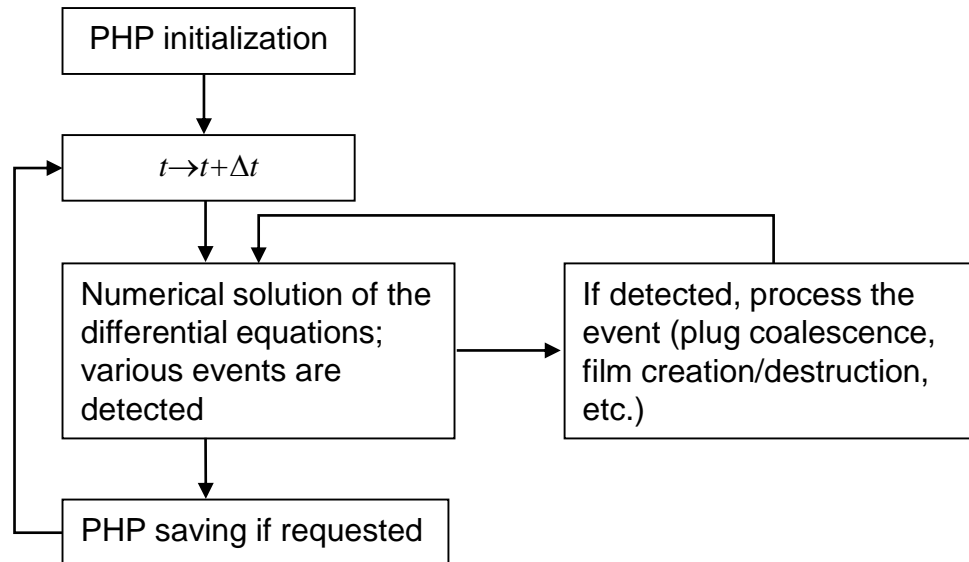
# Débuts de CASCO (PHP multibranche)

(Nikolayev, J. Heat Transfer, 2011)

- Modèle de Das et al. pour chaque bulle, conduction dans le liquide comme Shafii et al. (2001)
- Stockage dynamique des données (code C++ orienté objet) ,  $10^4$  bulles à gérer!
- 2 structures parallèles des variables (PHP=liste des bulles+bouchons pour élimination-crédation des bulles, transfert vers vecteurs pour calcul)



- Structure générale du code (« évènement »: changement du nombre des eqs):



- Défaut principal: absence de l'interaction fluide-paroi



# Importance de l'interaction fluide-paroi

- Etude du démarrage des oscillation sans et avec interaction (Nikolayev, IJHMT 2013 et 2016)
- Changement complet des conditions du démarrage en fonction de la prise en compte ou non de la variation lisse de  $T_{paroi}$
- Pas de démarrage pour PHP multi-branches sans génération des bulles en présence de la variation lisse de  $T_{paroi}$  !

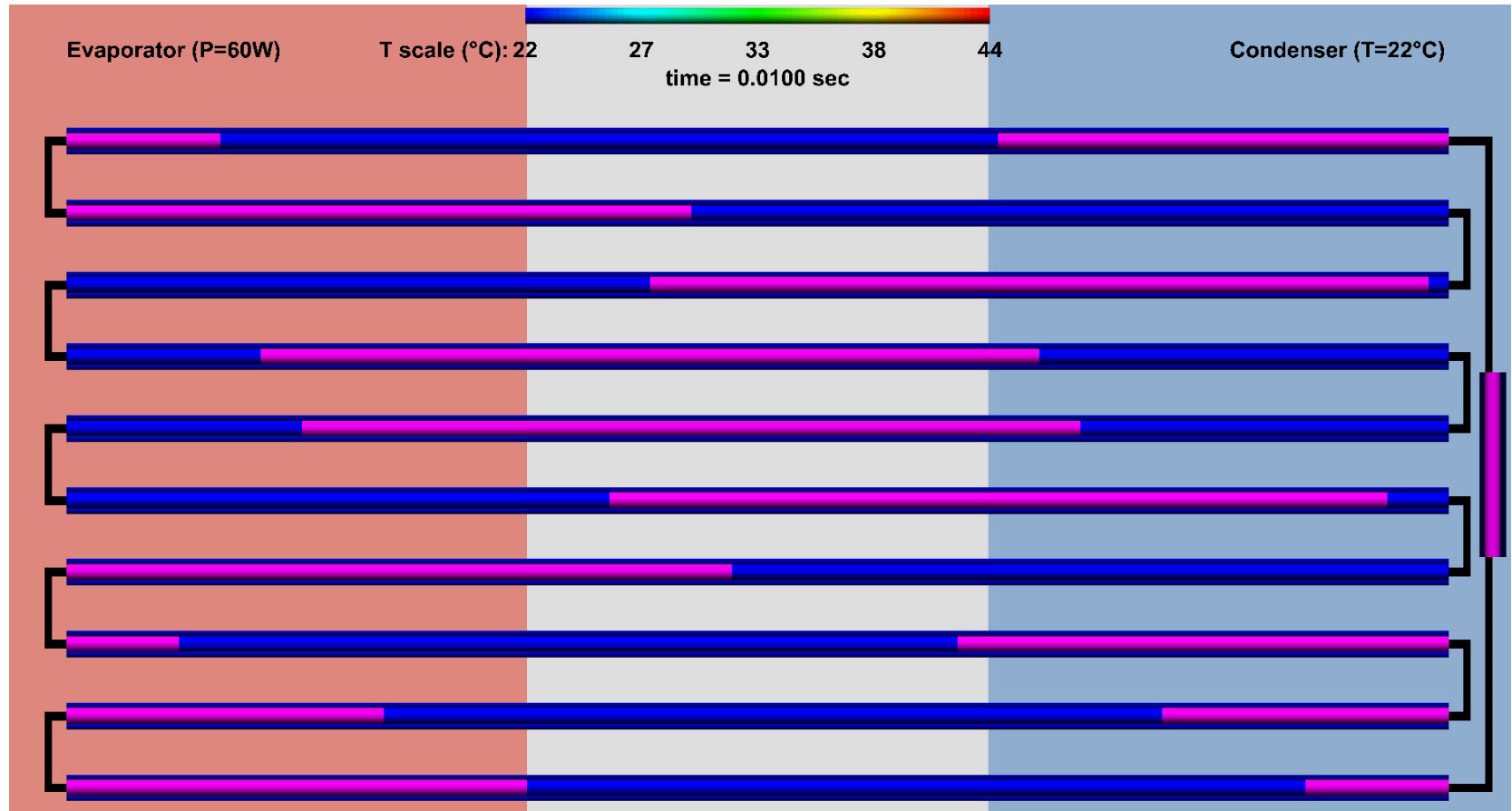
# Evolution de CASCO 2011-2016

- Prise en charge de la conduction non-stationnaire le long du tube,  
+ échange convectif liquide-paroi, vapeur-paroi, film-paroi
- Introduction de l'ébullition (génération des bulles). Critère: Bulle nucléée si  $T_{paroi}(x) - T_{sat}[P_{liq}(x)] > \text{barrière de nucléation} = 5^\circ$  .
- Prise en compte des pertes de charge visqueuses dans les coudes
- Prise en compte du circuit de retour (géométrie se change facilement)

Paramètres de simulation:

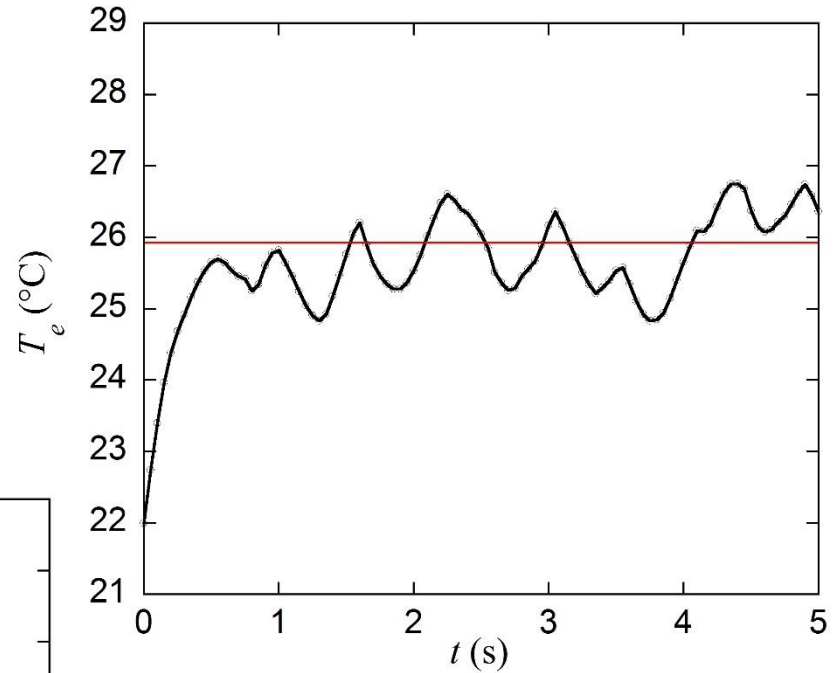
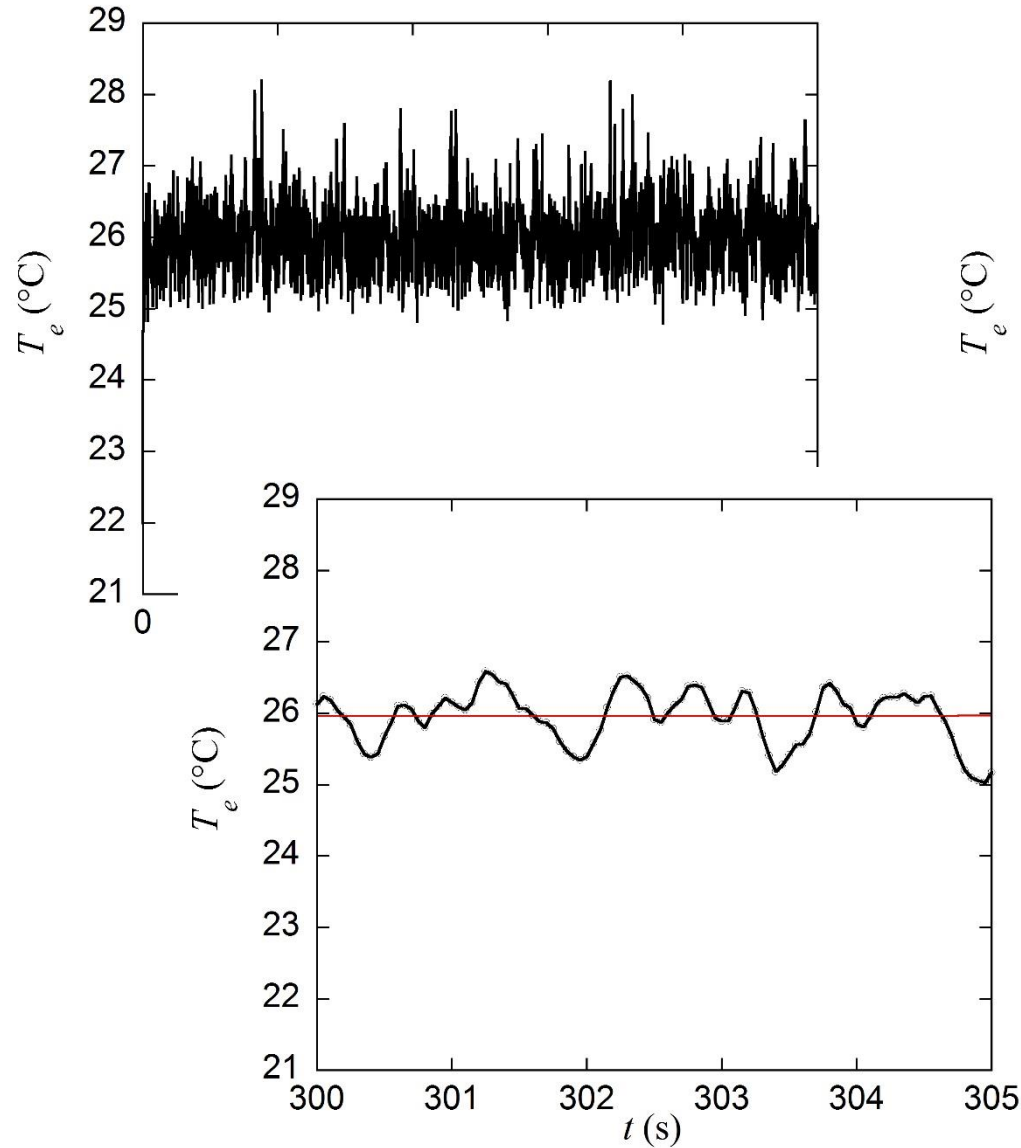
- Eau,  $\varnothing_{int}$  3mm,  $\varnothing_{ext}$  5mm, L PHP=15 cm (5+5+5), N coudes=5, L retour =2cm
- Remplissage 50%

# Démarrage des oscillations stables



- Ralentie 10x (60W)
- Bleu: liquide; mauve: film sur les parois internes; gris! parois sèches
- Assèchement, remouillage et génération des bulles sont visibles

# Température de l'évaporateur

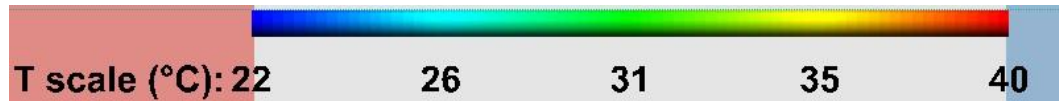


- 30W,  $\langle T_e \rangle = 25.8^\circ$   $R_{th} = 0.14$  K/W
- Démarrage très rapide <1s (inertie faible de l'évaporateur)

# Génération des bulles

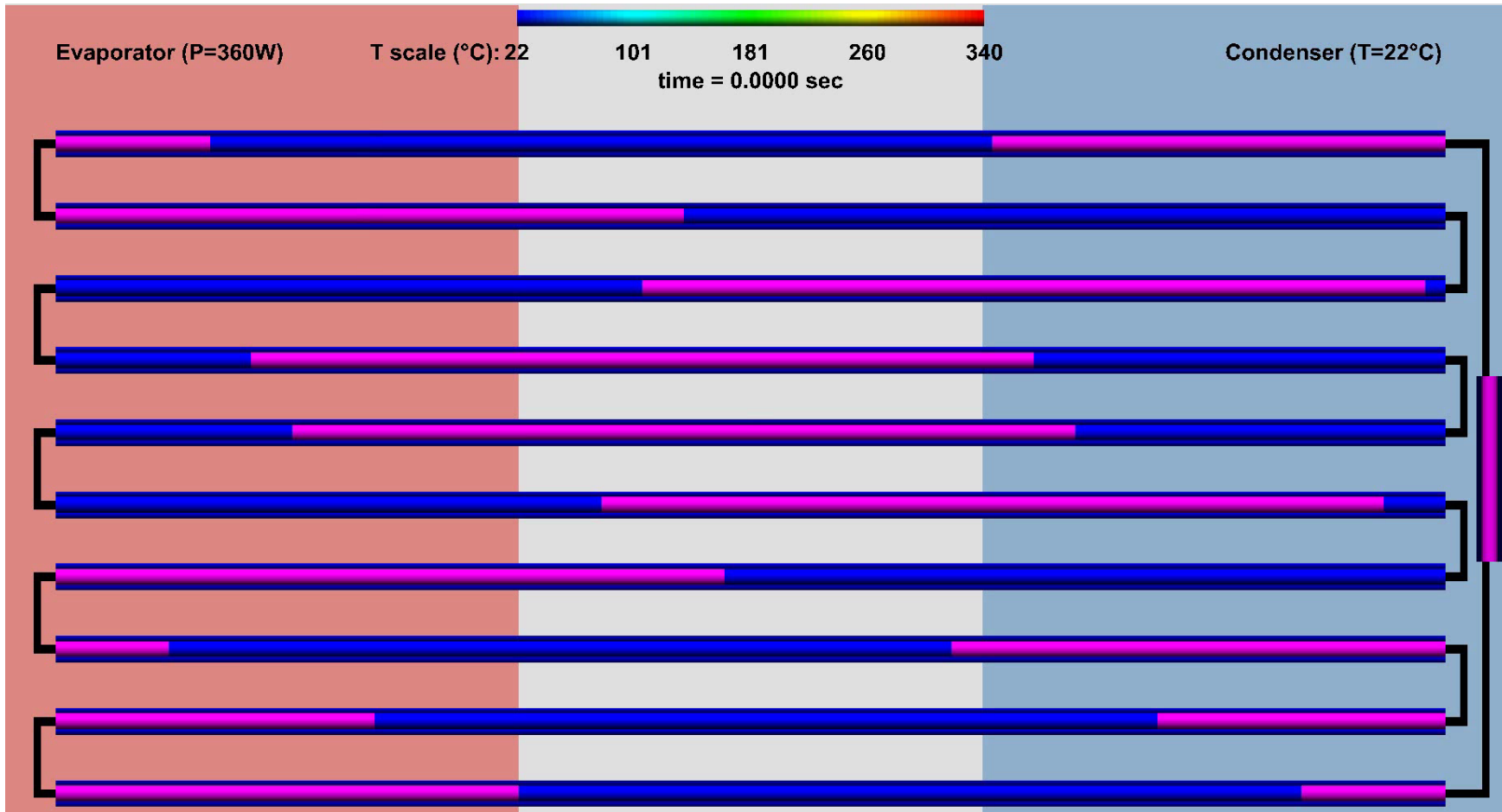


time = 4.6200 sec



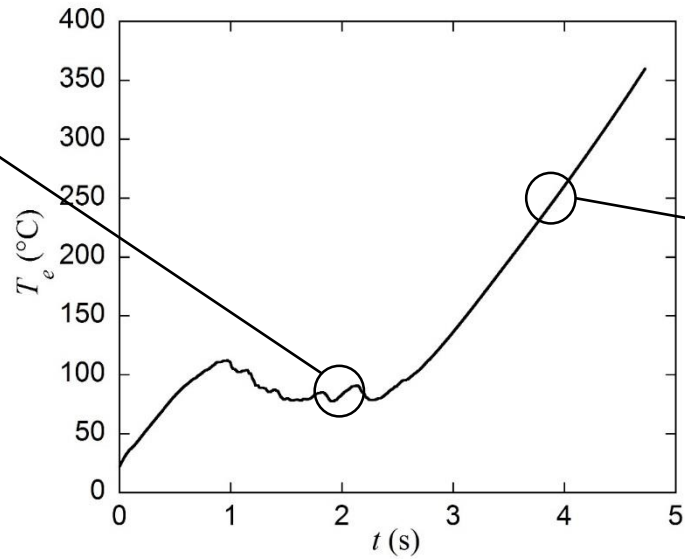
- Ralenti 10x
- Bleu: liquide; mauve: film sur les parois internes; gris! parois sèches
- Assèchement, remouillage et génération des bulles sont visibles

# Assèchement de PHP



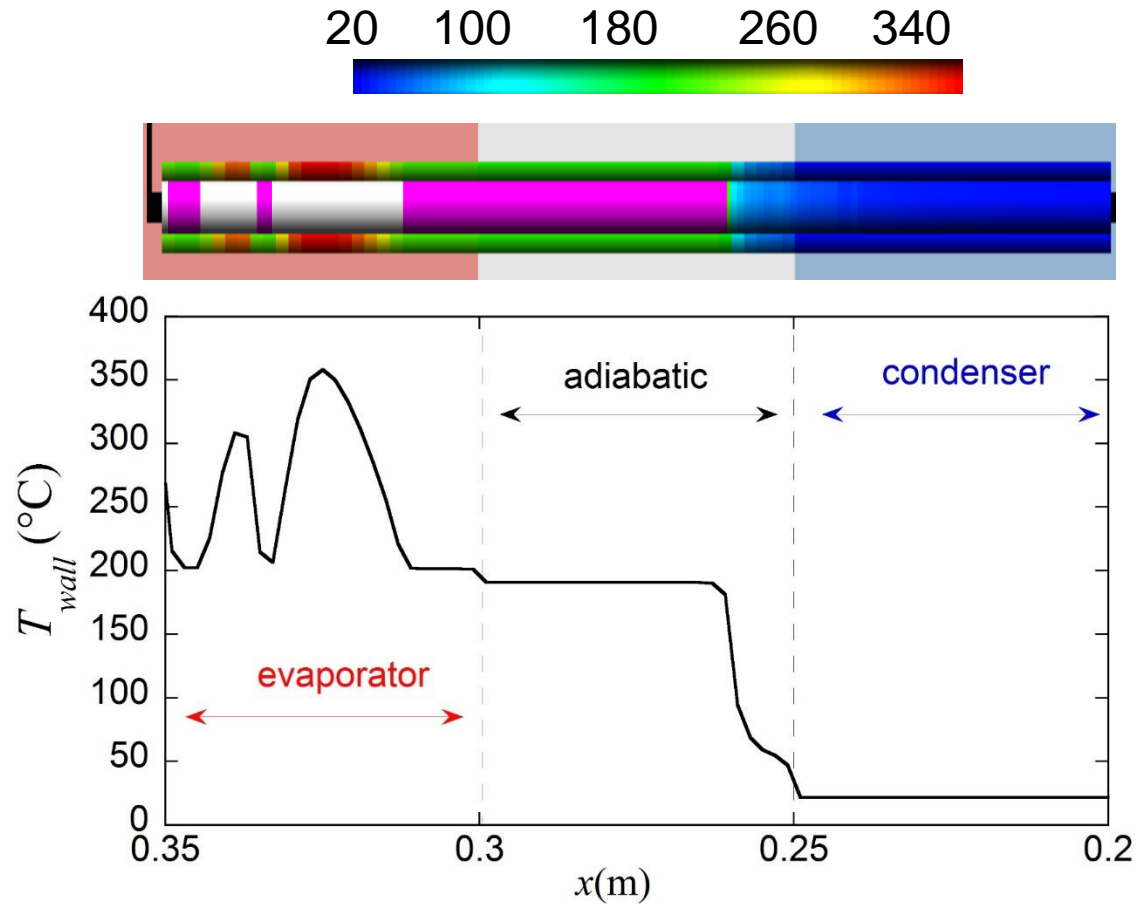
- Grande puissance (360W)
- Ralentie 25x
- Pratiquement pas d'oscillations
- Possible uniquement si les films dynamiques sont pris en compte

# Température de l'évaporateur



# Distribution de $T$ le long du tube

- Début d'assechement

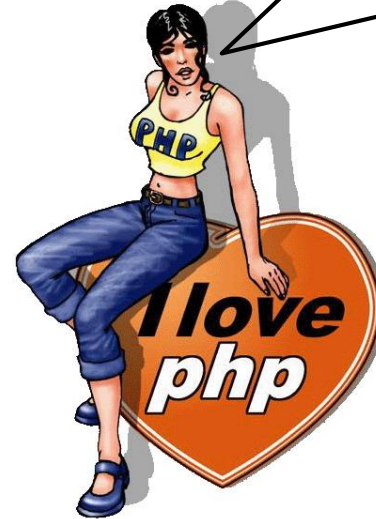




# Conclusions

- CASCO tient compte des phénomènes physiques principales
- CASCO décrit bien le comportement du PHP au niveau qualitatif
- Nous maîtrisons le comportement du système au temps court ( $<1$  min) et commençons à le maîtriser au temps long ( $>10$  min)

Merci de  
votre  
attention !



## Remerciements :

### Collaborateurs au CEA :

- Philippe Gully
- Eric Ercolani
- Laura Fourgeaud (thésarde, 2012-2016)
- Aneet Narendranath (postdoc, 5/2014-3/2015)
- David Garcia
- Alain Gauthier
- Florian Bancel

### Financement :

