



FROM RESEARCH TO INDUSTRY



IPB  
ENSEIRB  
MATMECA  
BORDEAUX

[www.cea.fr](http://www.cea.fr)

# ÉTUDE D'UN ÉCOULEMENT EN CIRCULATION NATURELLE D'HÉLIUM DIPHASIQUE EN RÉGIME TRANSITOIRE SOU MIS À DES FLUX DE CHALEUR PARIÉTAUX

Vincent BALSSA

Filière mathématiques et mécanique

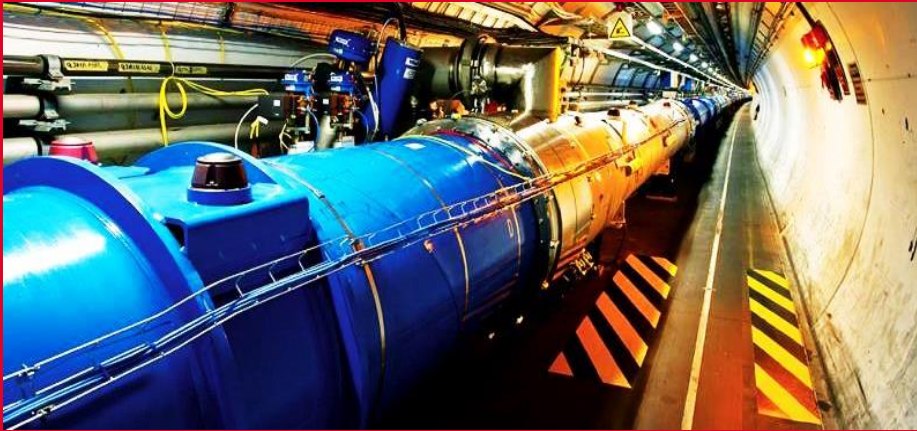
Tuteur entreprise : Bertrand BAUDOUY

Tuteur école : Hugues BODIGUEL

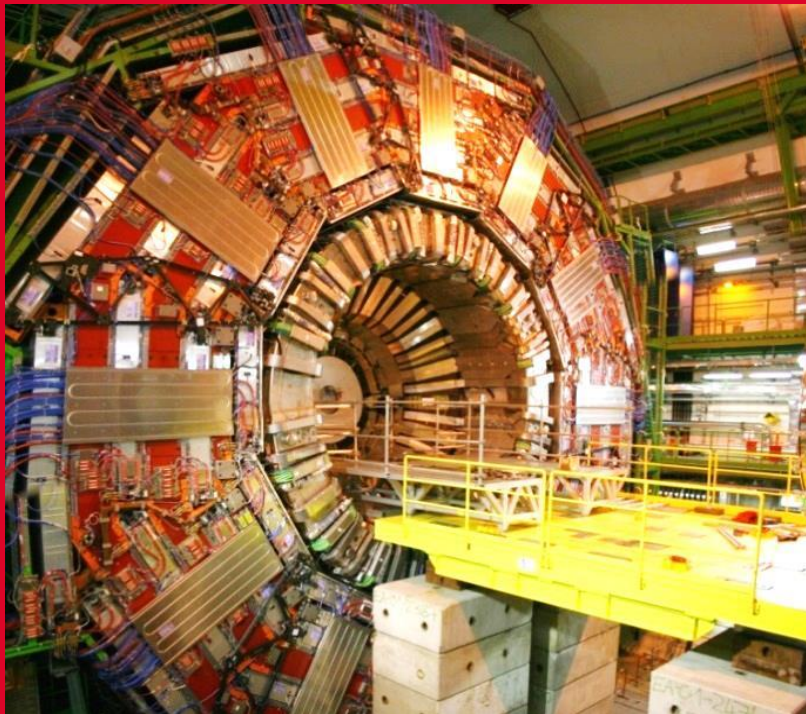
MARS 2014 – SEPTEMBRE 2014



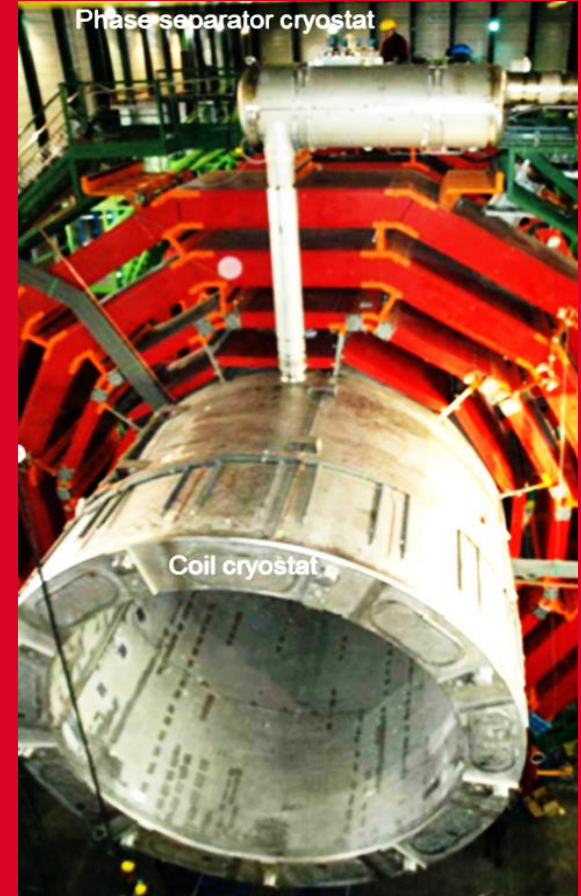
# INTRODUCTION



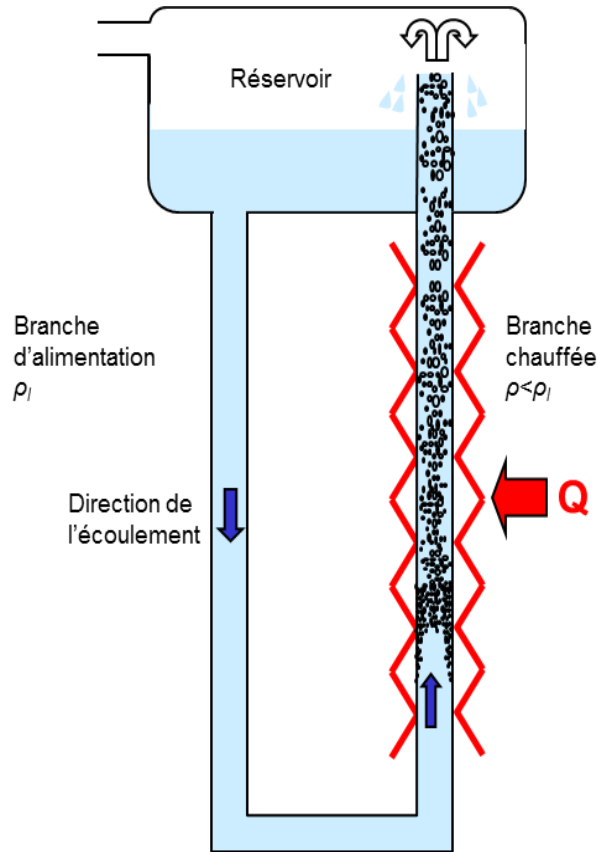
**Le LHC dans son tunnel (CERN)**



**CMS lors de son assemblage (CERN)**

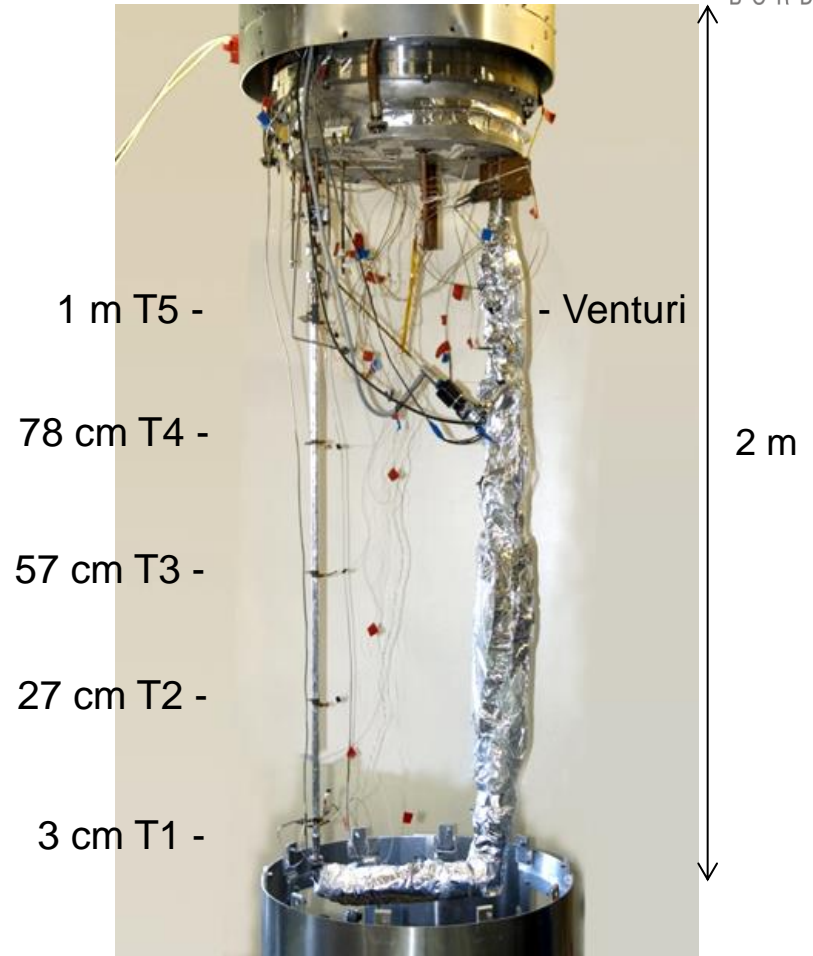


**Système de refroidissement de CMS**



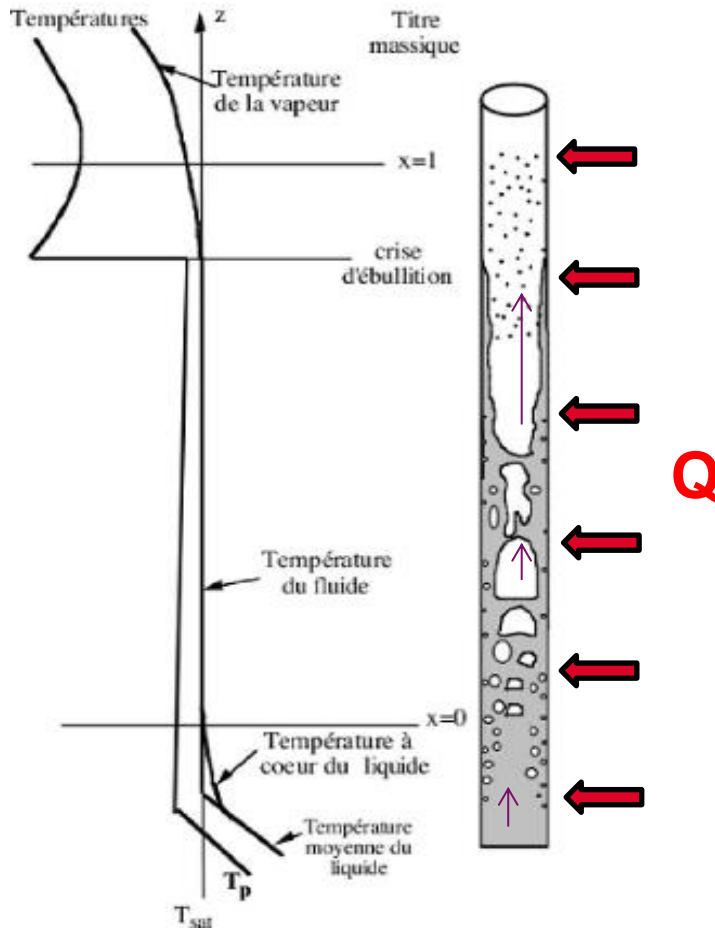
Cas d'une boucle de circulation diphasique

Schéma simplifié du système



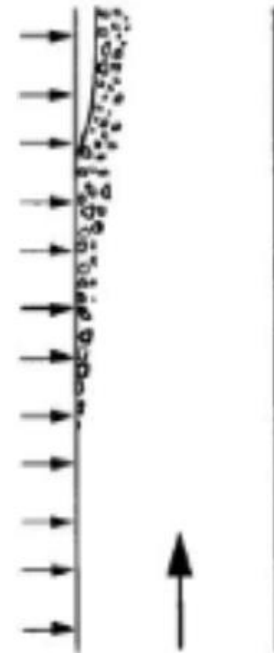
Boucle thermosiphon hors de son cryostat

Pour : -un flux de chaleur « faible »  
-une longueur chauffée « suffisante »



régimes d'écoulement classiques pour un chauffage pariétal dans un tube vertical

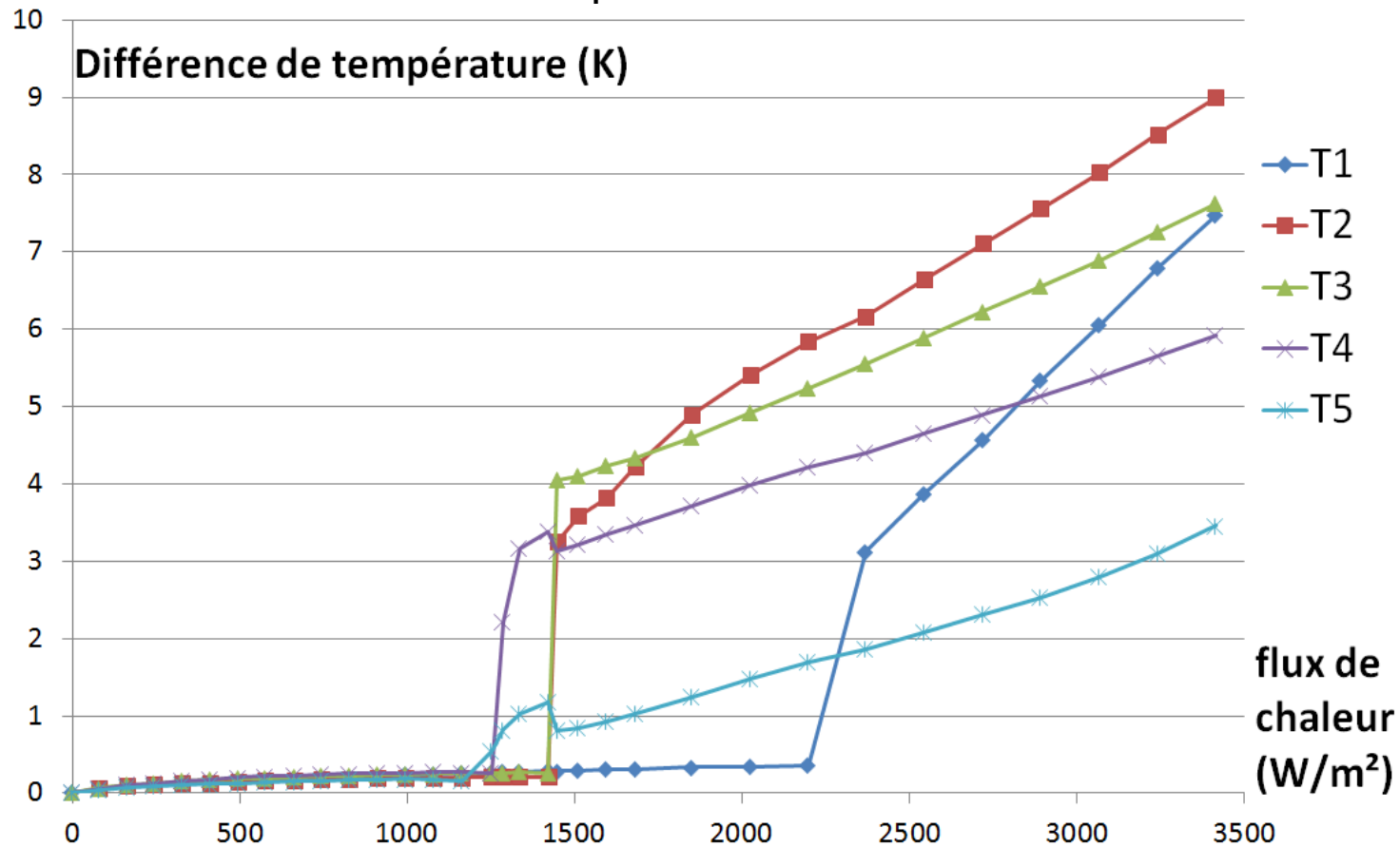
Pour un flux de chaleur assez puissant



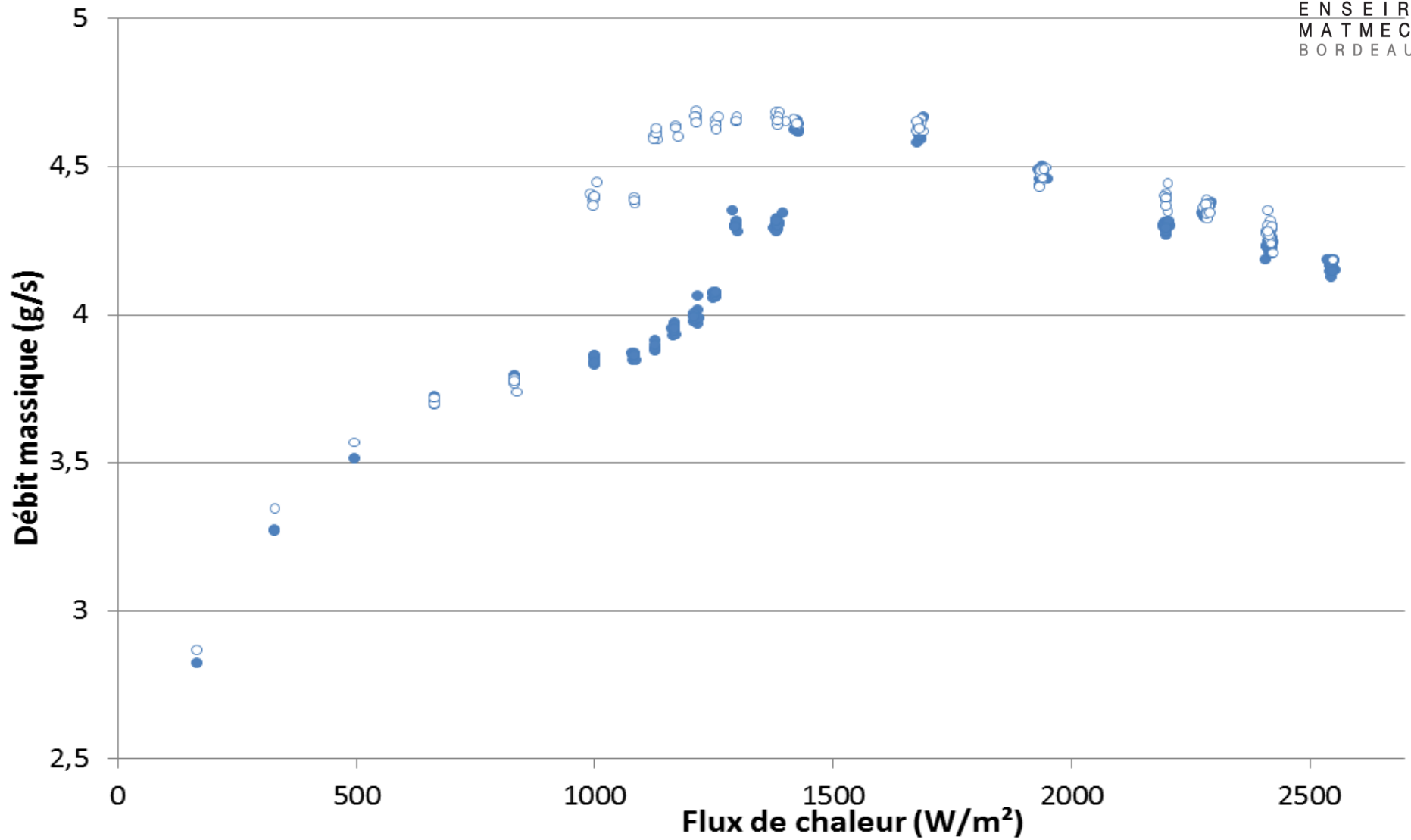
Profil d'écoulement en film de vapeur



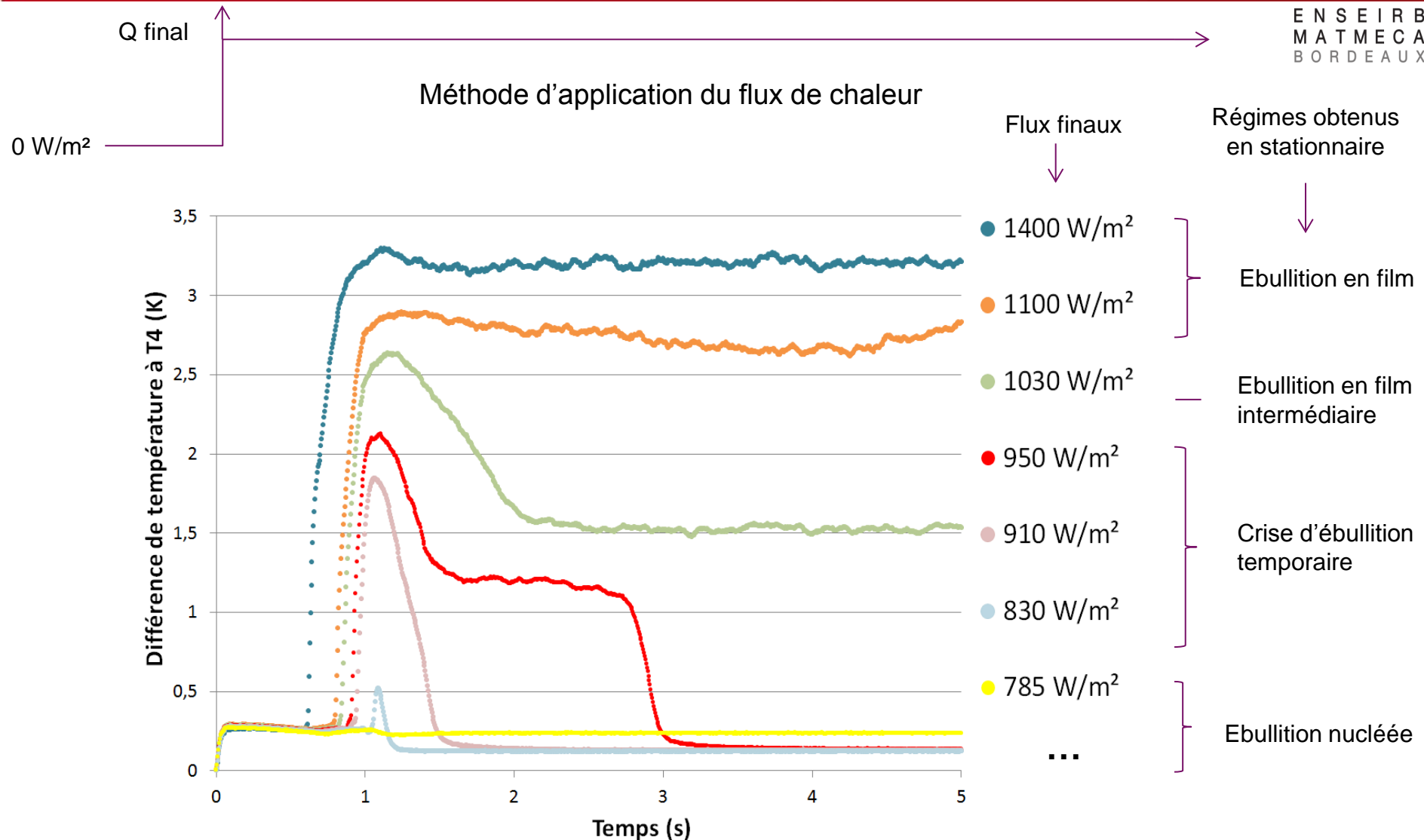
- Variation « douce » du flux de chaleur
- Détermination des flux de chaleur critiques
- Influence de la position



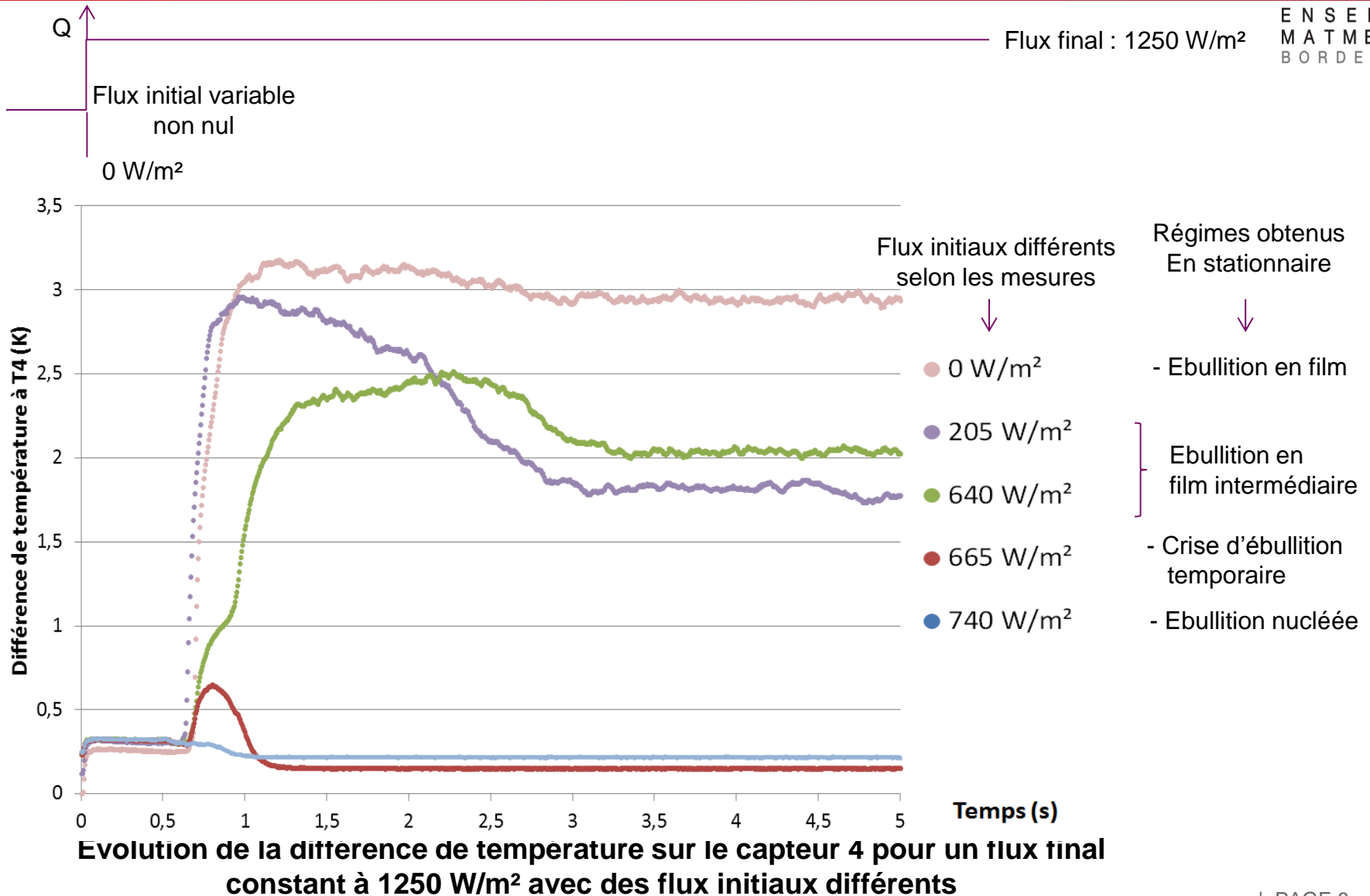
Evolution des différences de températures lors d'une montée



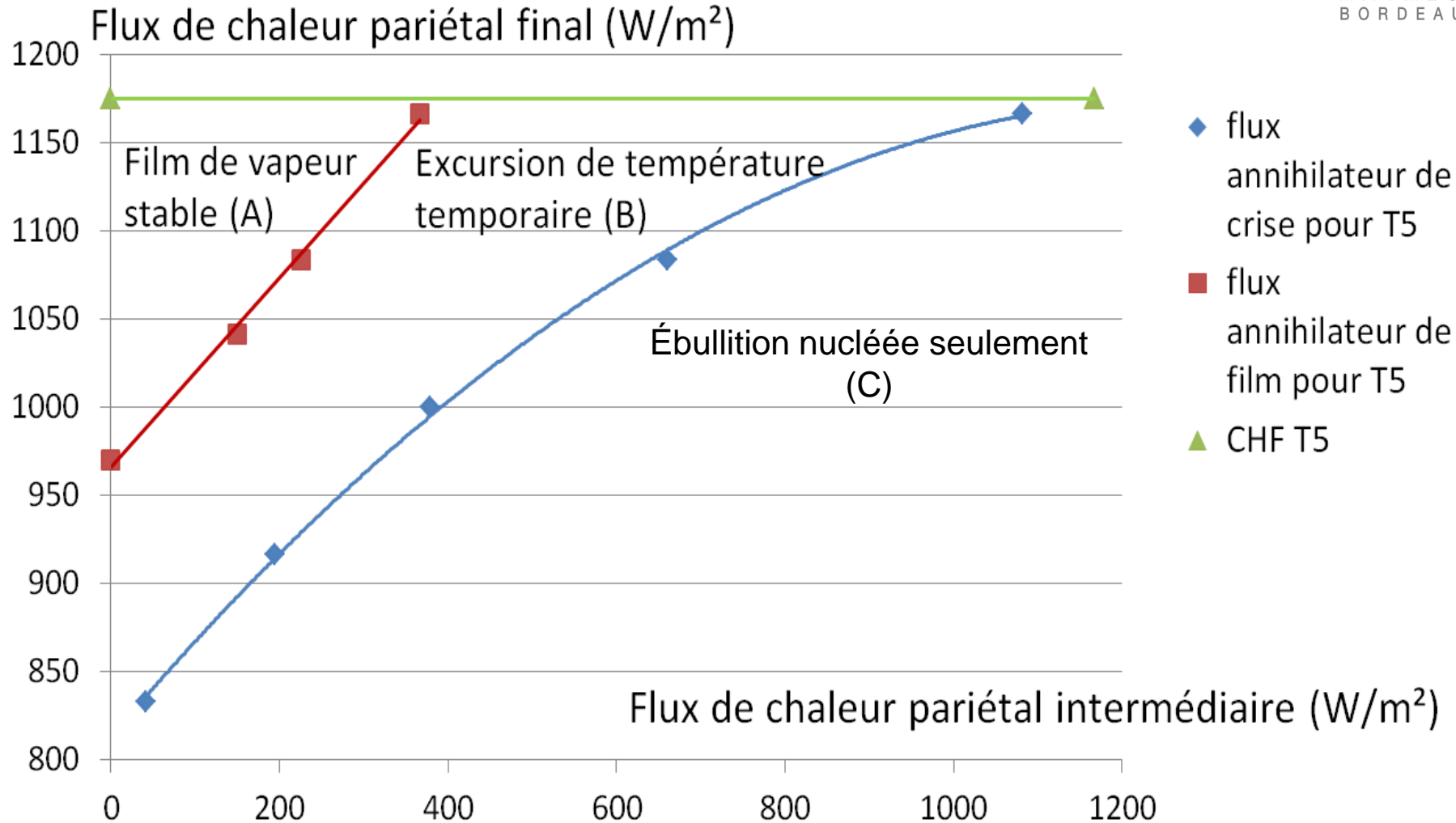
Evolution du débit massique lors d'une montée et redescente



# APPLICATION D'UN FLUX DE CHALEUR INITIAL AVANT D'APPLIQUER LE FLUX FINAL







Carte de comportement au niveau du capteur T5

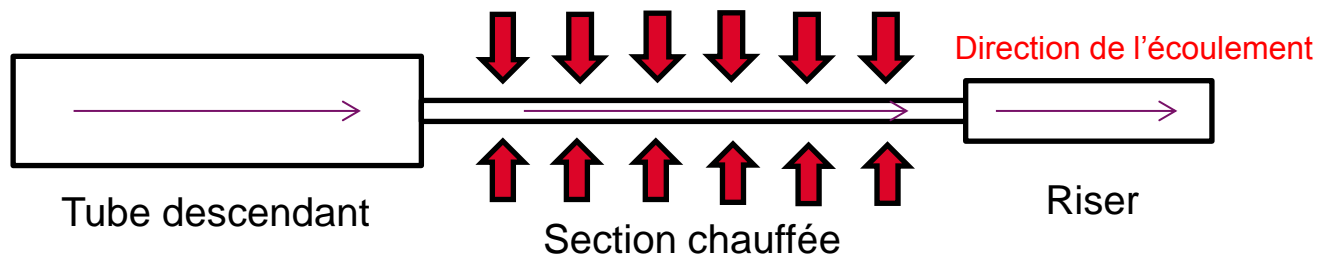
Hypothèses du modèle homogène :

- pas de vitesse de glissement entre les phases
- Un seul fluide avec des propriétés physiques moyennes

$$\rho(h) = \left( \frac{h - h_l}{h_{lg}\rho_g} + \frac{h_g - h}{h_{lg}\rho_l} \right)^{-1} \quad (1)$$

$$\frac{1}{\mu_m} = \frac{x}{\mu_v} + \frac{1-x}{\mu_l} \quad (2)$$

$$h = e + \frac{p}{\rho} \quad (3)$$



$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{q}{\rho} + gu \quad (4)$$

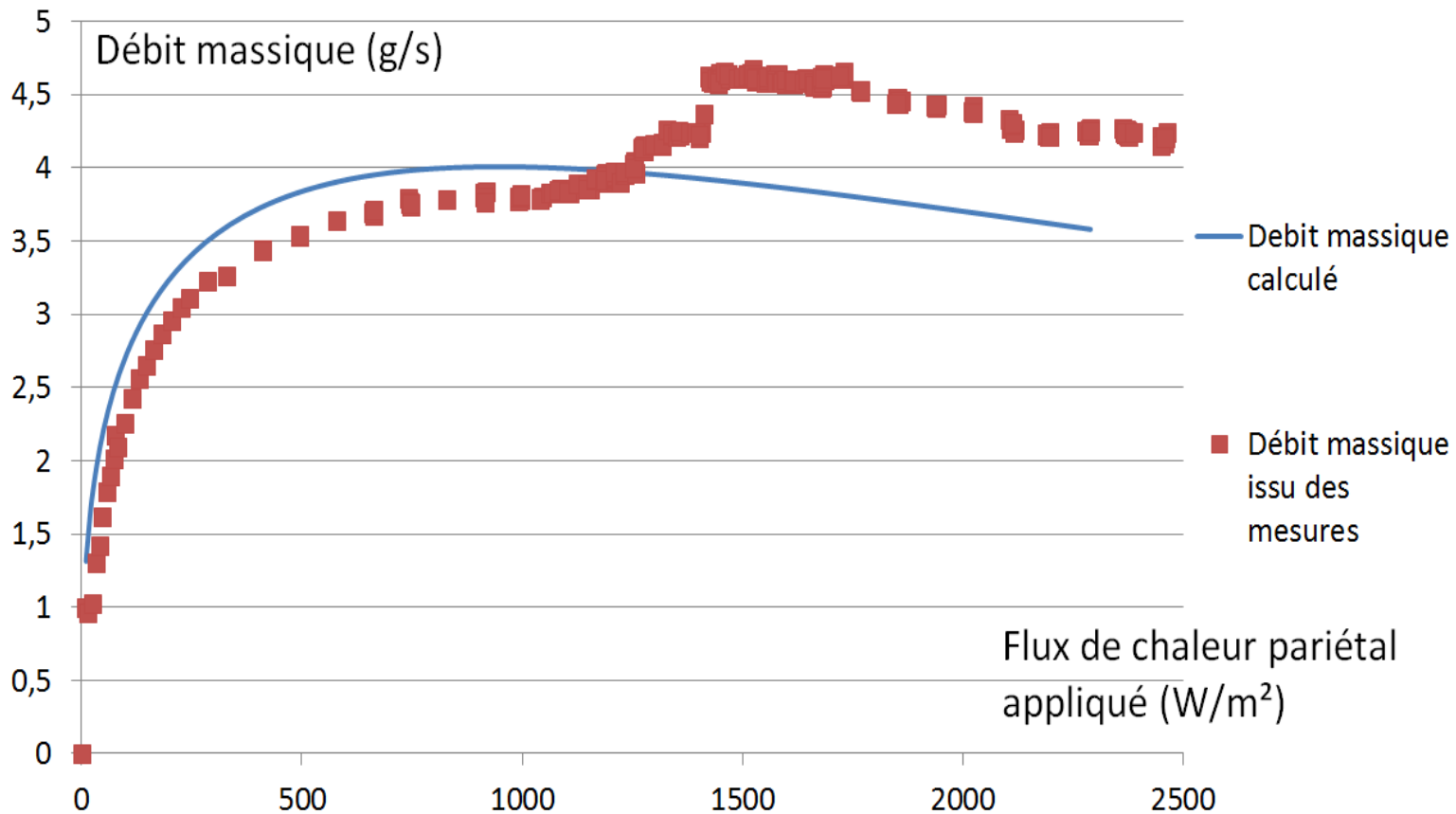
$$\frac{dG}{dt} = -(\rho u^2)_{out} + (\rho u^2)_{in} + P_{in} - P_{out} - \Delta P_{fr} + \int_{-L_D}^{L_{ch}} \rho g dx + M_R + \sum \left[ \Delta \left( \frac{\rho u^2}{2} \right) - K_{sing} \frac{\rho u_s^2}{2} \right] \quad (5)$$

$$u_i(t) = \frac{G(t) - \omega (I_{ch} + L_{ch} \frac{A_t}{A_R} M_R)}{\frac{A_t}{A_D} M_D + M_{ch} + \frac{A_t}{A_R} M_R} \quad (6)$$

$$u(x, t) = \left\{ \begin{array}{l|l} u_D(t) & si \ x < 0 \\ u_i(t) + \omega(t)x & si \ 0 < x < L_{ch} \\ u_R(t) & L_{ch} < x < L \end{array} \right\} \quad (7)$$

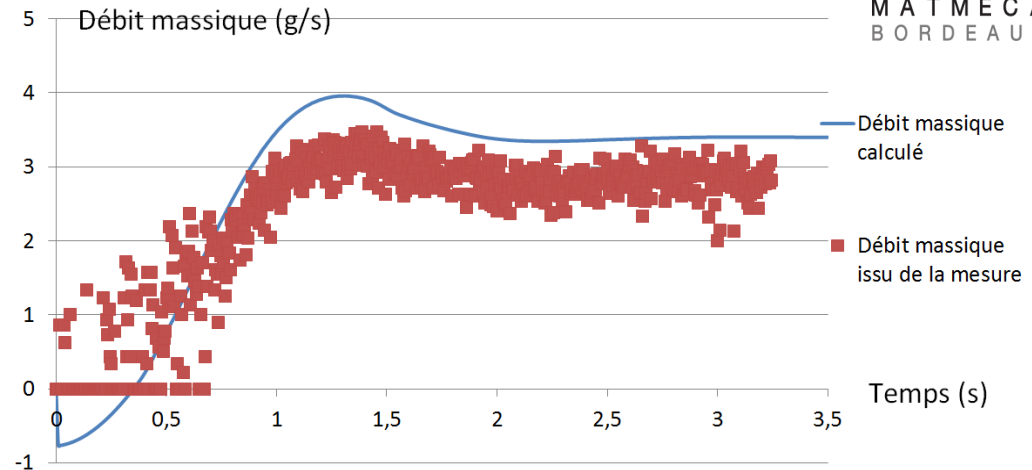
$$\rho(h) = \left\{ \begin{array}{l|l} \rho_l & si \ h \leq h_{lsat} \\ \left( \frac{h - h_l}{h_{lg}\rho_g} + \frac{h_g - h}{h_{lg}\rho_l} \right)^{-1} & si \ h > h_{lsat} \end{array} \right\} \quad (8)$$

- Surestimation surtout à faible flux
- Non considération de l'apparition du film
- Très bonne approximation (entre 5% et 15% d'erreur selon le flux)

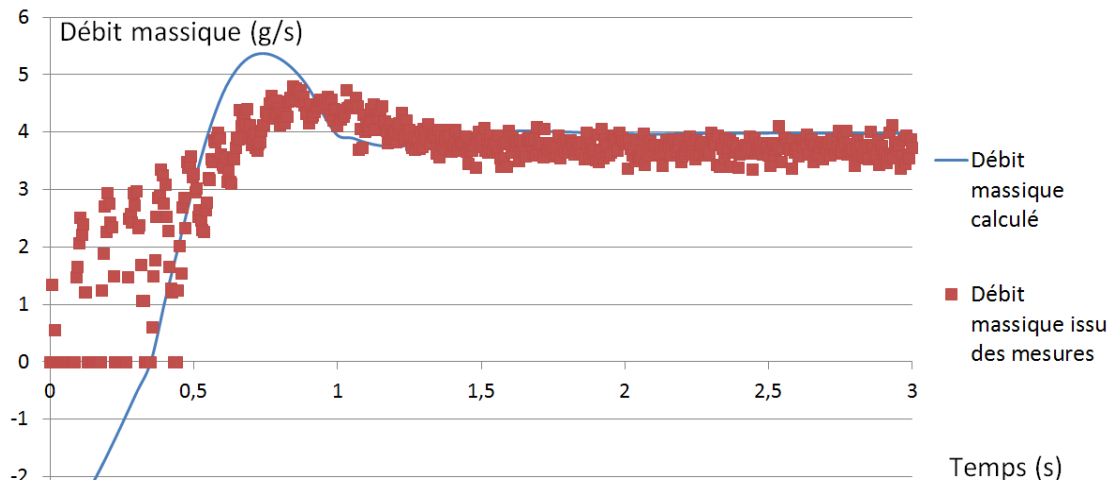


Débites massiques mesurés et calculés à l'aide de la macro en stationnaire

-Transitoire très bien représenté,  
surtout à faible flux

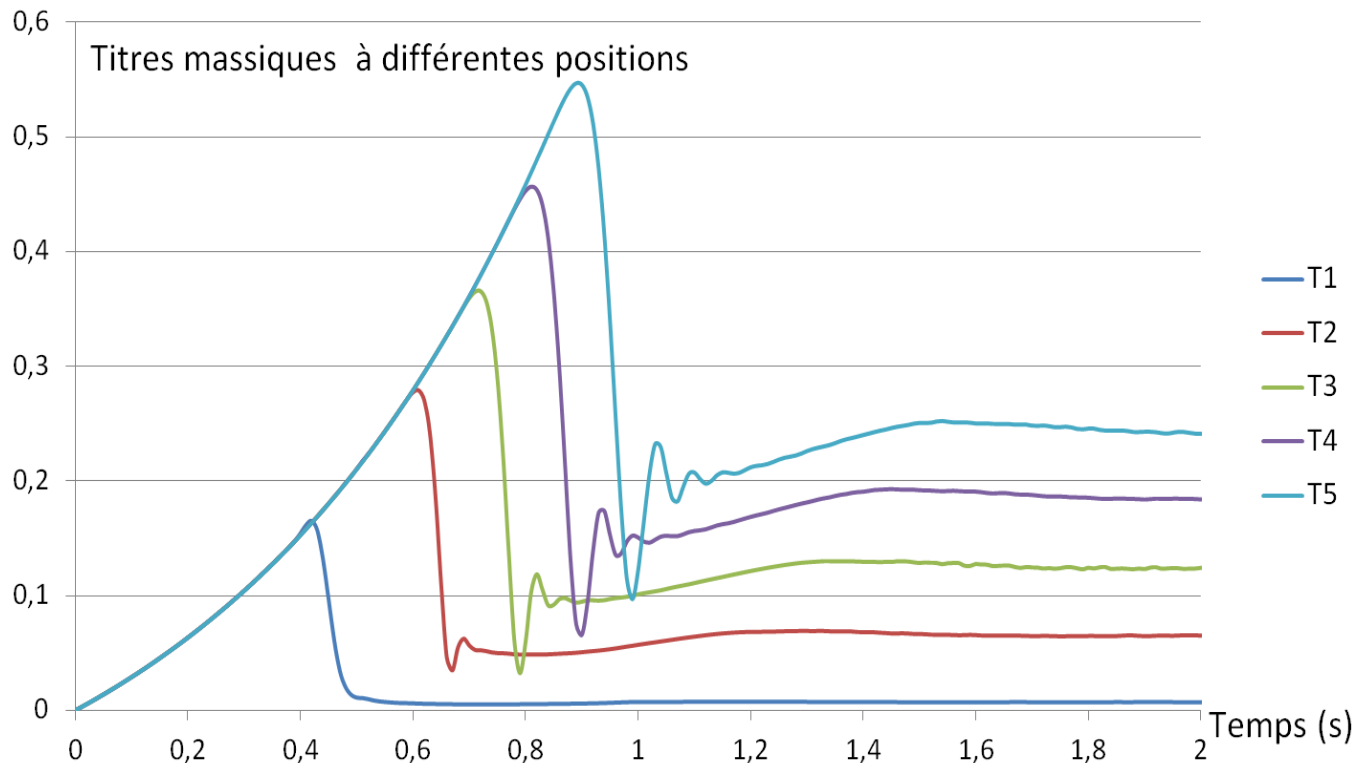


**Evolution des Débits massique mesurés et simulés à l'aide du logiciel COMSOL en transitoire (240 W/m<sup>2</sup>)**



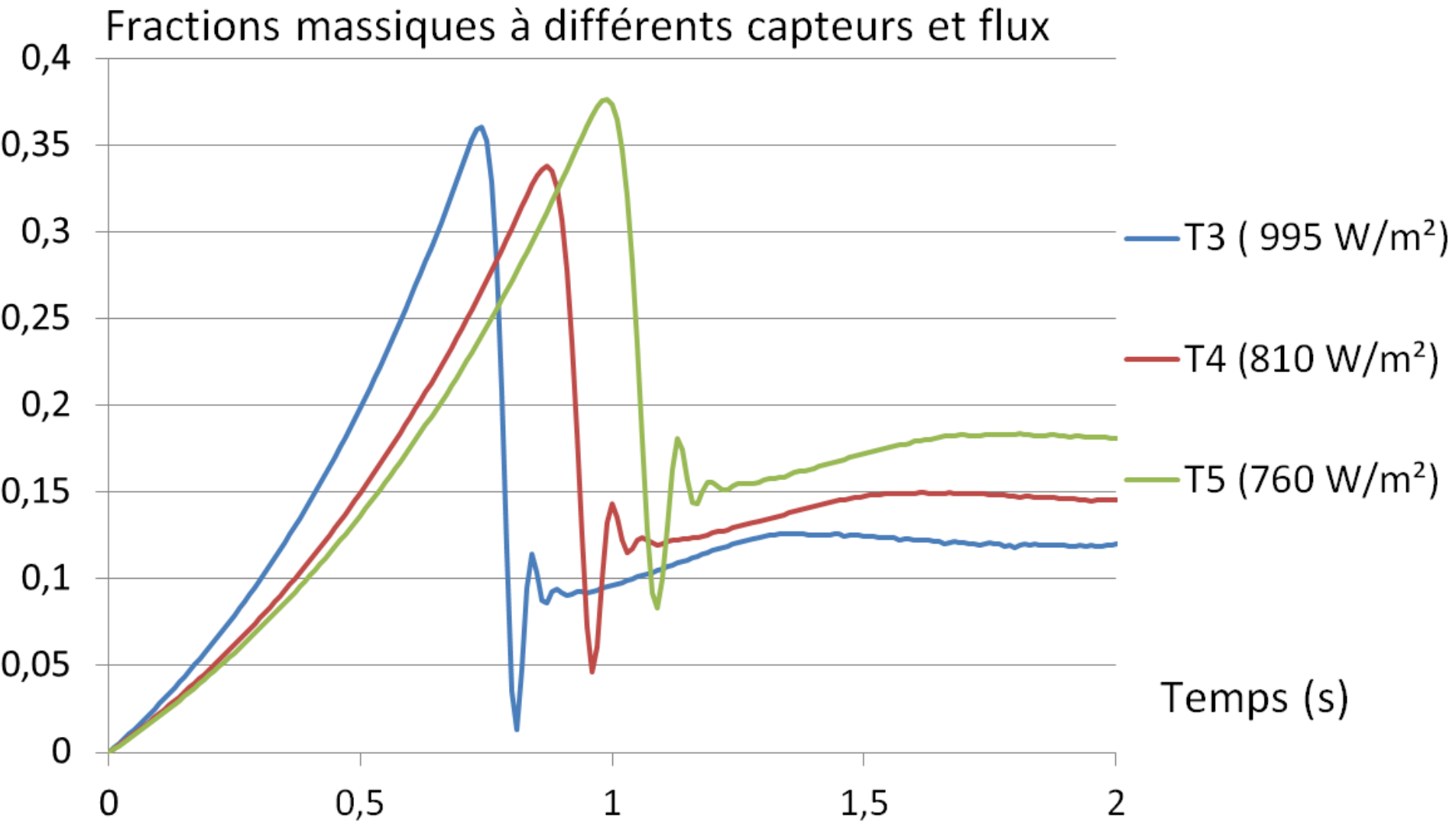
**Evolution des Débits massique mesurés et simulés à l'aide du logiciel COMSOL en transitoire (985 W/m<sup>2</sup>)**

- Montée homogène au début
- Explication de l'apparition précoce du film en haut
- Valeurs maximales atteintes pendant le transitoire bien supérieures à celles du stationnaire



**Evolution temporelle des fractions massiques sur tous les capteurs et un flux de chaleur brusque de 1030 W/m<sup>2</sup>**

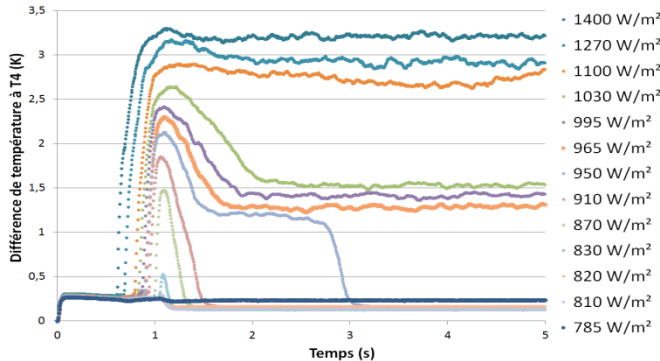




Evolution des titres massiques pour différents capteurs à différents flux

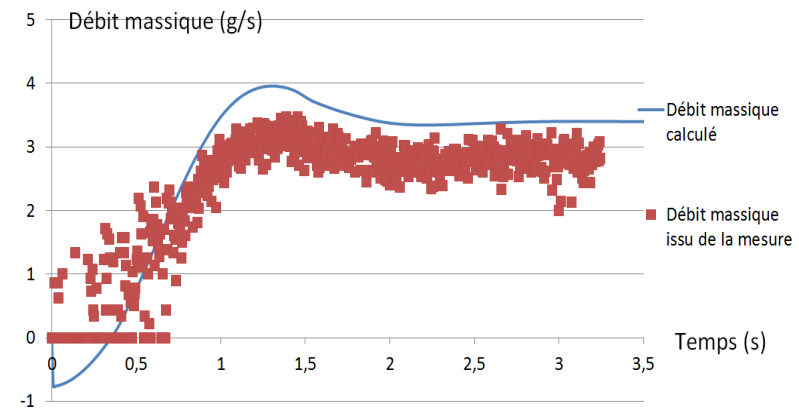
## Partie expérimentale :

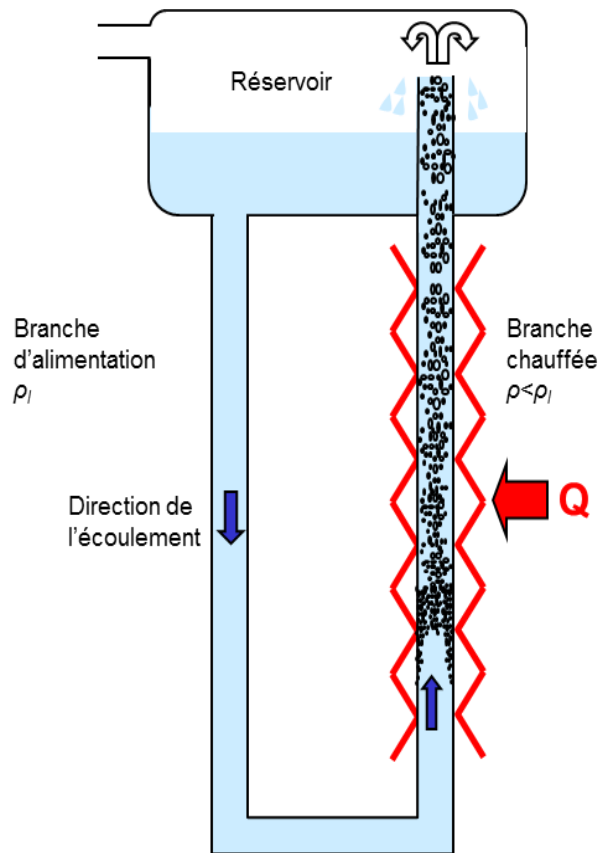
- Observation d'un phénomène inédit
- meilleure compréhension de l'apparition du film
- création de cartes de comportements



## Partie numérique :

- Etablissement d'un modèle bien représentatif jusqu'à un certain flux
- Indication sur des valeurs non mesurables
- Importance d'un paramètre sur l'apparition de la crise d'ébullition
- multiples possibilités d'améliorations



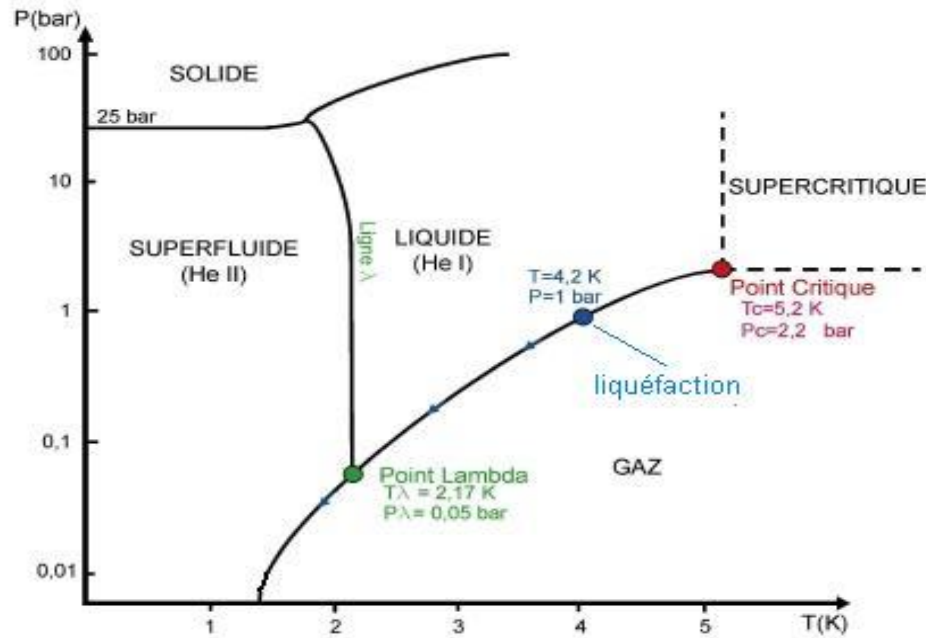


Cas d'une boucle de circulation diphasique

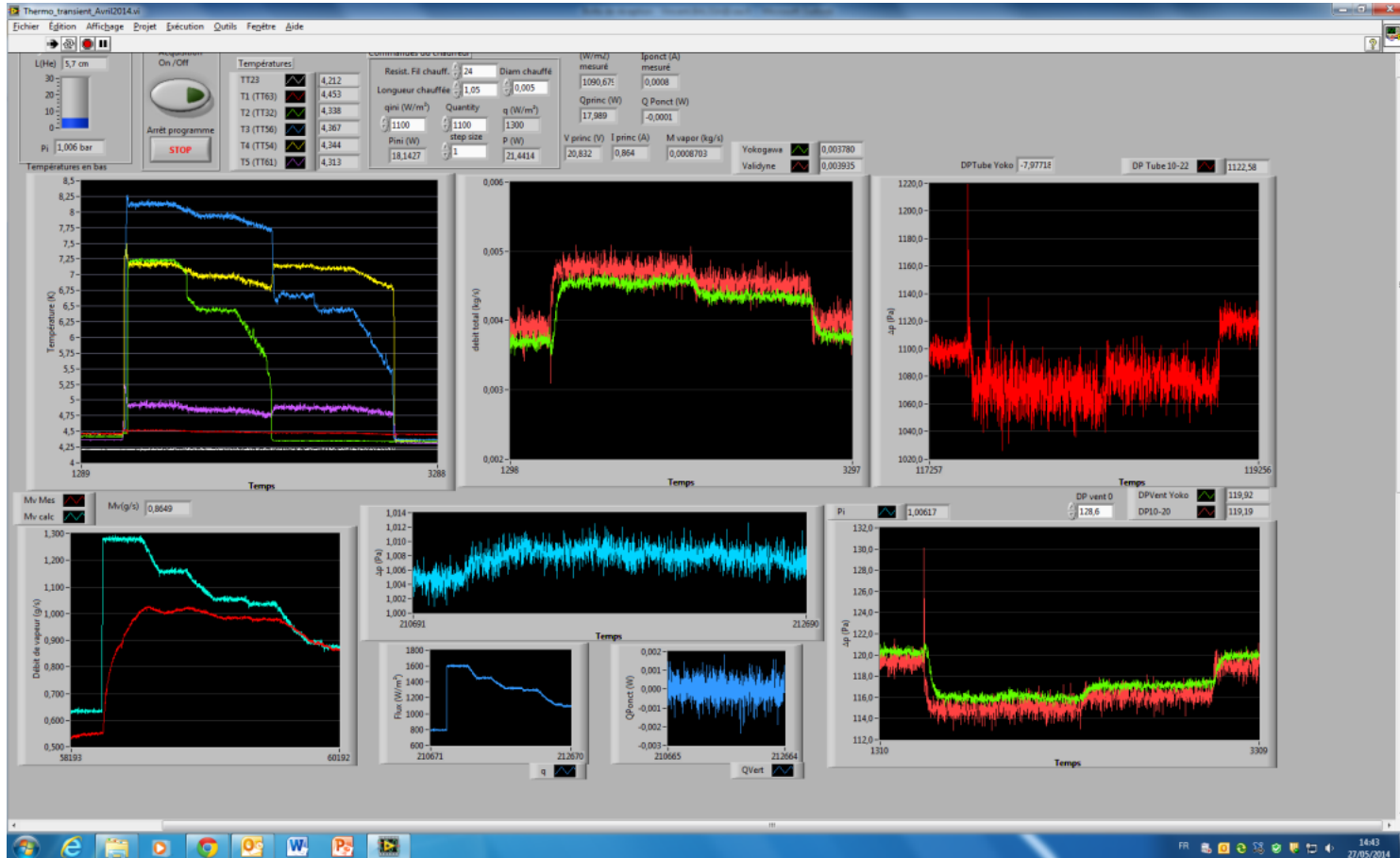
**MERCI DE VOTRE  
ATTENTION**



**Système de refroidissement de CMS**

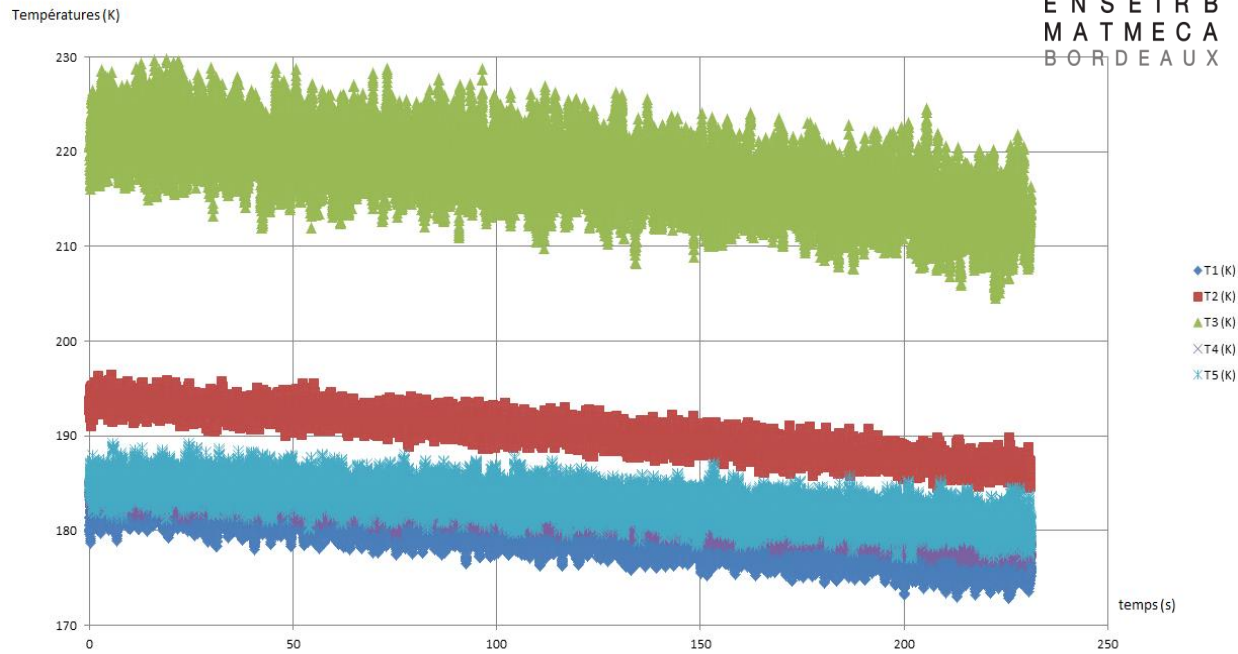


Fluide	Masse volumique du liquide (kg/m <sup>3</sup> )	Masse volumique du gaz (kg/m <sup>3</sup> )	Viscosité dynamique du liquide (Pa.s)
Eau	1000	0,6	10 <sup>-3</sup>
Azote	810	4,5	160×10 <sup>-6</sup>
Hélium	125	17	3,6×10 <sup>-6</sup>
Fluide	Chaleur latente de vaporisation (J/kg) ×10 <sup>3</sup>	Chaleur spécifique du liquide (J/kg.K) ×10 <sup>3</sup>	Tension superficielle (N/m)
Eau	2250	4,212	7,305×10 <sup>-1</sup>
Azote	200	2,03	8,85×10 <sup>-3</sup>
Hélium	20	4,48	8,877×10 <sup>-5</sup>

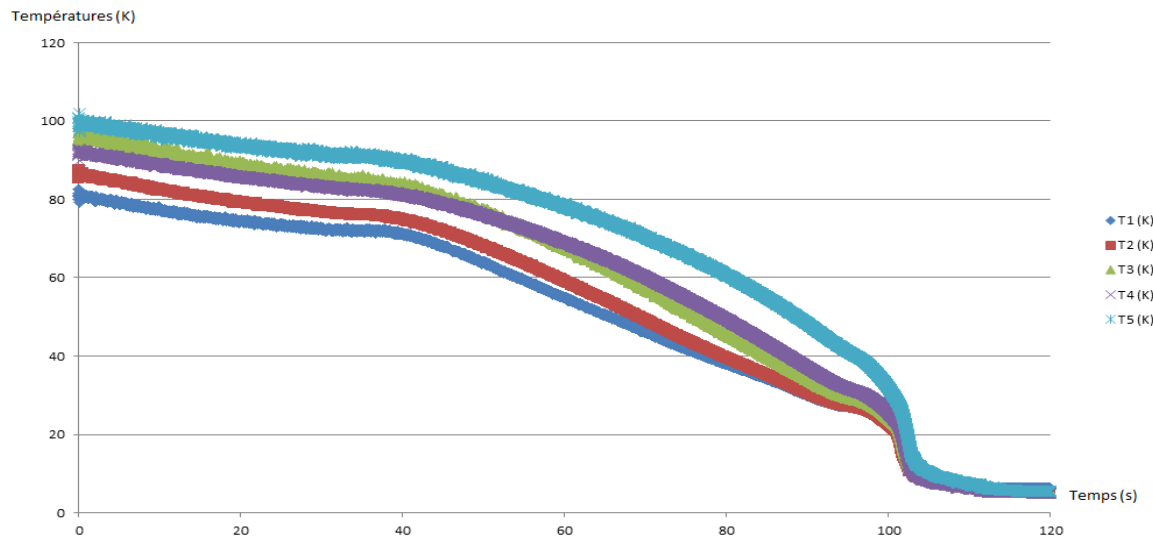


Interface utilisateur dans Labview

## Mise en froid (vapeur)



## Mise en froid (transition)





$$\dot{m}_t = C_C \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{D_2^4}{D_1^4}}} A_2 \sqrt{2\rho_1(\Delta p + \rho_1 g \Delta z)} \quad (9)$$

$$dpf = \frac{f(Re) \rho u^2}{D} \frac{1}{2} \quad (10)$$

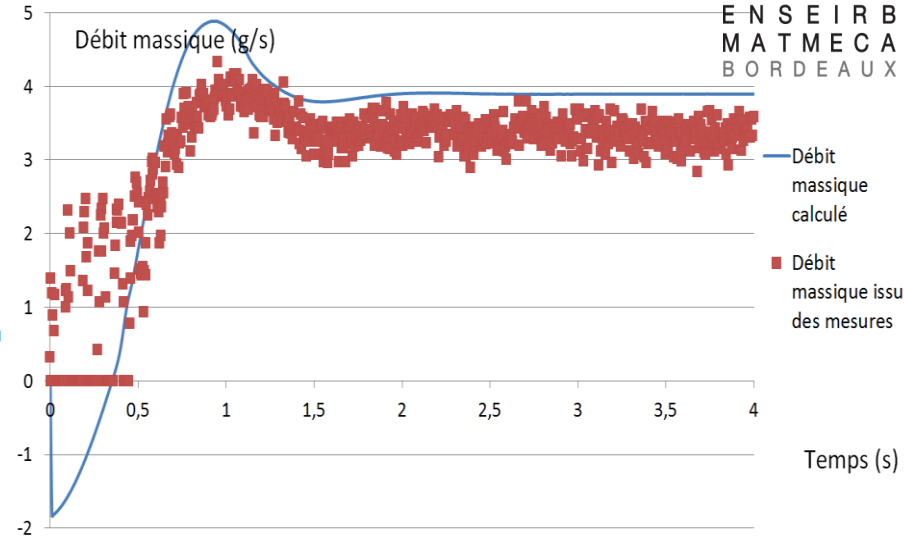
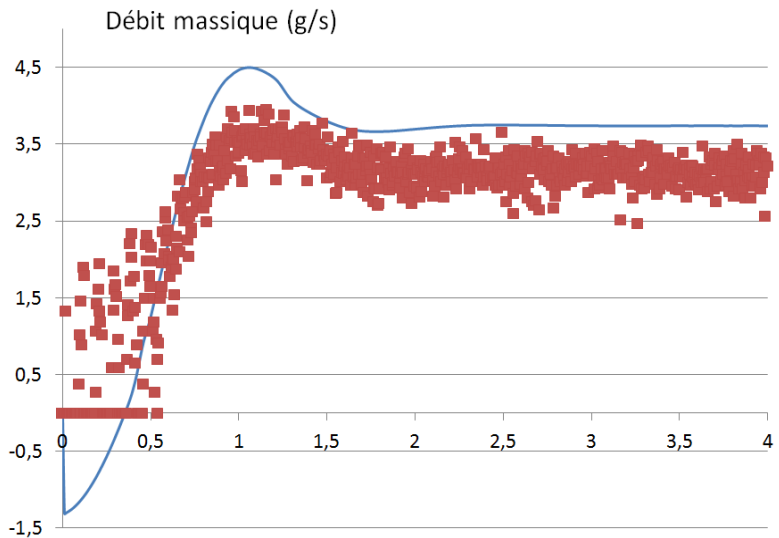
$$f(Re) = 0.079 \left[ \frac{\rho u D}{\mu_m} \right]^{-0.25} \quad (11)$$

$$\frac{1}{\mu_m} = \frac{x}{\mu_v} - \frac{1-x}{\mu_l} \quad (12)$$

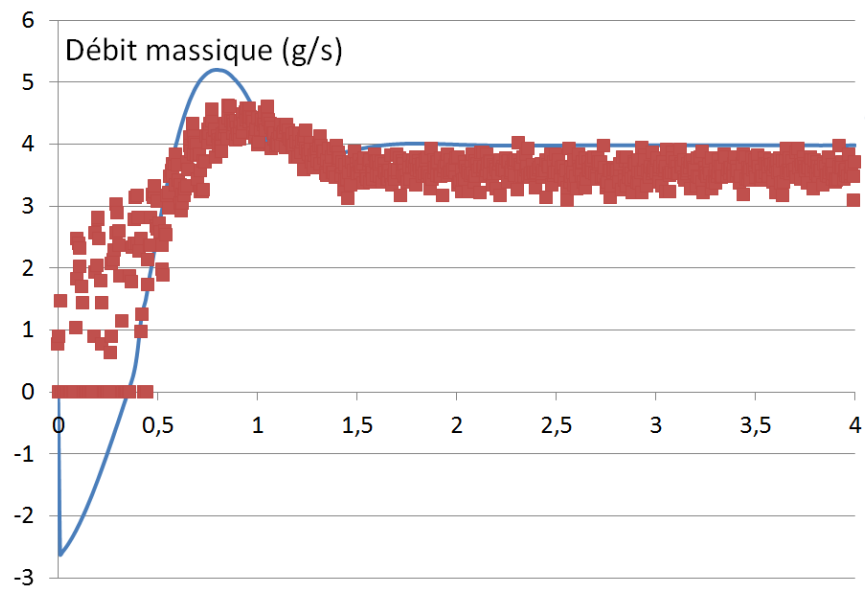
$$K_{reduc} = 0.5 \left( 1 - \frac{A_t}{A_D} \right) = 0.492$$

$$K_{coude} = \frac{\alpha}{\pi} \left( 0.131 + 1847 \left( \frac{D}{R} \right)^{\frac{7}{2}} \right) = 0.103$$

$$K_{elarg} = \left( 1 - \frac{A_t}{A_R} \right)^2 = 0.969$$

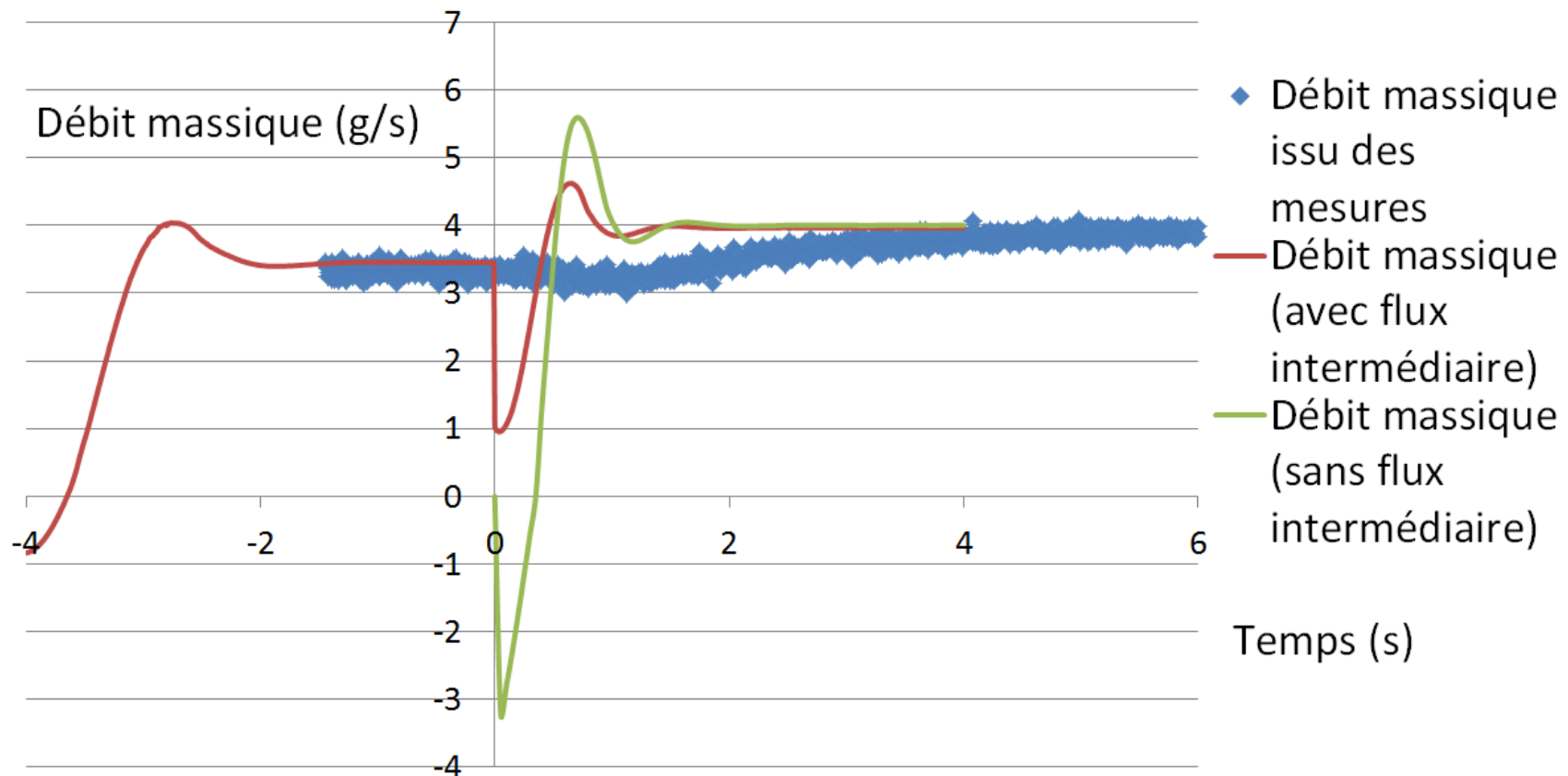


**410 W/m<sup>2</sup>**



**575 W/m<sup>2</sup>**

**825 W/m<sup>2</sup>**



Evolution du débit massique pour les mesures et simulation effectuées avec ou sans flux de chaleur intermédiaire

$$\rho = \left( \frac{h - h_l}{h_{lg}\rho_g} + \frac{h_g - h}{h_{lg}\rho_l} \right)^{-1} \quad (13)$$

$$\frac{\delta\rho}{\delta h} = -\rho^2 \frac{v_{fg}}{h_{fg}} \quad (14)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{q}{\rho} \quad (15)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{v_{fg}}{h_{fg}} q = \omega \quad (16)$$

$$u(x, t) = u_i(t) + \omega(t)x \quad (17)$$

$$\frac{\partial(\rho u A)}{\partial x} = \rho \frac{\partial(u A)}{\partial x} \longrightarrow \frac{\partial(u A)}{\partial x} = 0 \quad (18)$$

$$u_D(t) = \frac{A_t}{A_D} u_i(t) \quad (19)$$

$$u_R(t) = \frac{A_t}{A_R} (u_i(t) + \omega L_{ch}) \quad (20)$$



$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial \rho u^2}{\partial x} = -\frac{dp}{dx} - \frac{\partial p_{fr}}{\partial x}(u, \rho) - \rho g - \frac{\partial A}{\partial x} \frac{\rho u^2}{A} \quad (21)$$

$$\Delta P_{sect} = \int_{x_a}^{x_b} \frac{\partial A}{\partial x} \frac{\rho u^2}{A} dx = \int_{A_a}^{A_b} \frac{\rho u^2}{A} dA = \int_{A_a}^{A_b} \frac{\rho u^2 A^2}{A^3} dA$$

$$\Delta P_{sect} = \rho u^2 A^2 \int_{A_a}^{A_b} \frac{1}{A^3} dA = \frac{\rho u_a^2}{2} - \frac{\rho u_b^2}{2} \quad (22)$$

$$\Delta P_{sing} = K \frac{\rho u_s^2}{2} \quad (23)$$

$$G(t) = \int_{-L_D}^L \rho u dx = \int_{-L_D}^0 \rho u_D(t) dx + \int_0^{L_{ch}} \rho (u_i(t) + \omega x) dx$$

$$+ \int_{L_{ch}}^L \rho (u_i(t) + \omega L_{ch}) \frac{A_t}{A_R} dx \quad (24)$$

$$I_{ch} = \int_0^{L_{ch}} \rho x dx \quad M_D = \int_{-L_D}^0 \rho dx \quad M_R = \int_{L_{ch}}^L \rho dx \quad (25)$$

$$u_i(t) = \frac{G(t) - \omega (I_{ch} + L_{ch} \frac{A_t}{A_R} M_R)}{\frac{A_t}{A_D} M_D + M_{ch} + \frac{A_t}{A_R} M_R} \quad (26)$$

# FORME INTÉGRÉE DE L'ÉQUATION DE QUANTITÉ DE MOUVEMENT

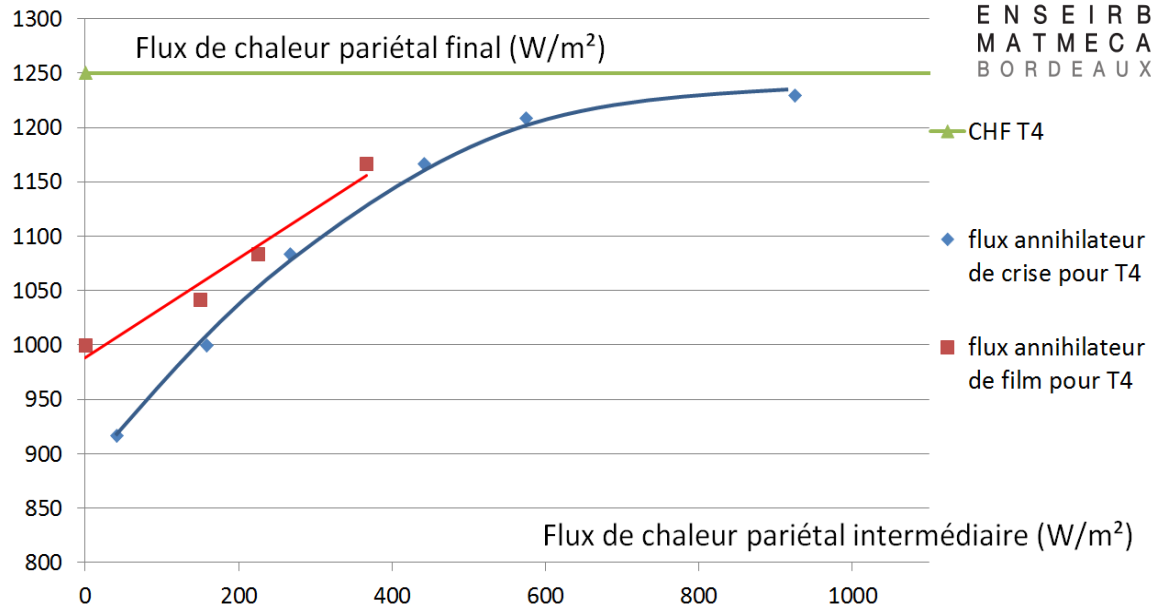
$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{-L_D}^L \rho u \, dx + \int_{-L_D}^L \frac{\partial \rho u^2}{\partial x} \, dx = \int_{-L_D}^L -\frac{dp}{dx} \, dx$$

$$- \int_{-L_D}^L \frac{\partial p_{fr}}{\partial x} (u, \rho) \, dx - \int_{-L_D}^L \rho g \, dx - \int_{-L_D}^L \frac{\partial A}{\partial x} \frac{\rho u^2}{A} \, dx \quad (27)$$

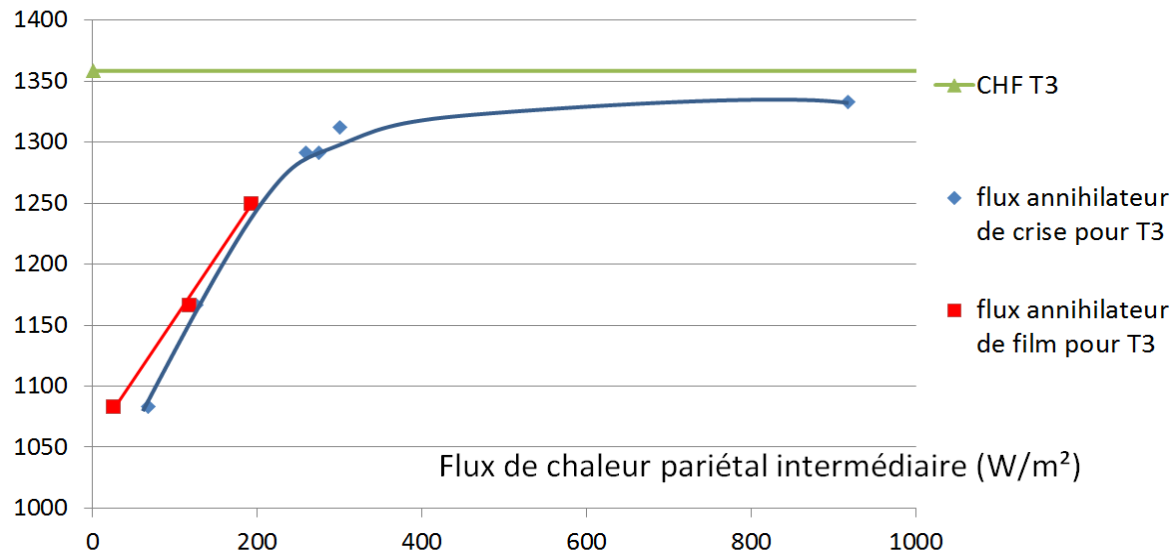
$$\frac{dG}{dt} = -(\rho u^2)_{out} + (\rho u^2)_{in} + P_{in} - P_{out}$$

$$-\Delta P_{fr} + \int_{-L_D}^{L_{ch}} \rho g \, dx + M_R + \sum \left[ \Delta \left( \frac{\rho u^2}{2} \right) - K_{sing} \frac{\rho u_s^2}{2} \right] \quad (28)$$

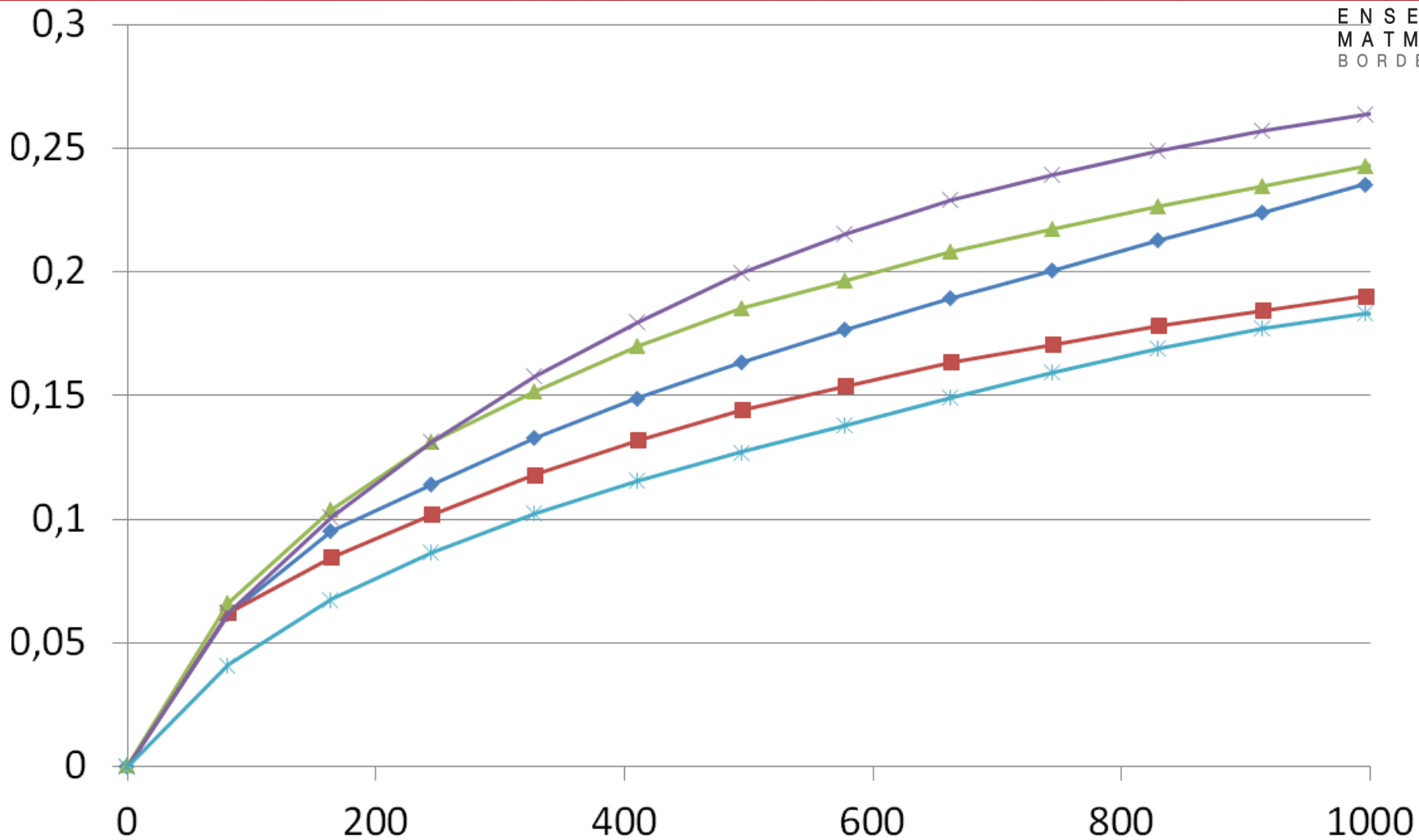
## Carte de comportement pour T4



## Flux de chaleur pariétal final (W/m²)



## Carte de comportement pour T3



Evolution de la différence de température en fonction du flux de chaleur pendant une montée