



FROM RESEARCH TO INDUSTRY



ENSEIRB
MATMECA
BORDEAUX

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

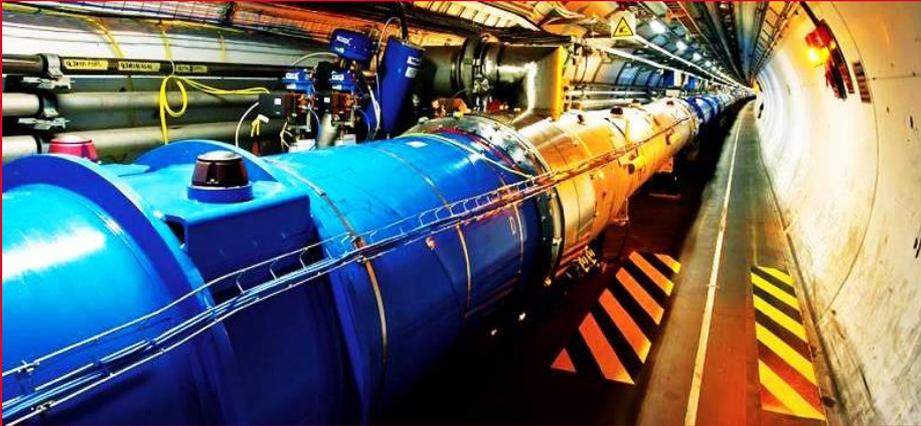
Tuteur entreprise : Bertrand BAUDOY

Tuteur école : Hugues BODIGUEL

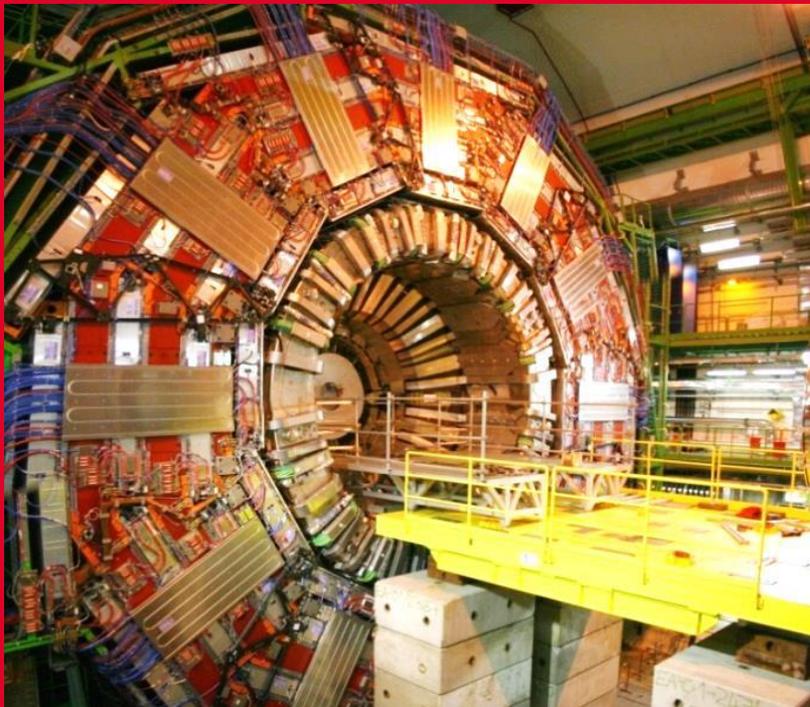
MARS 2014 – SEPTEMBRE 2014



INTRODUCTION



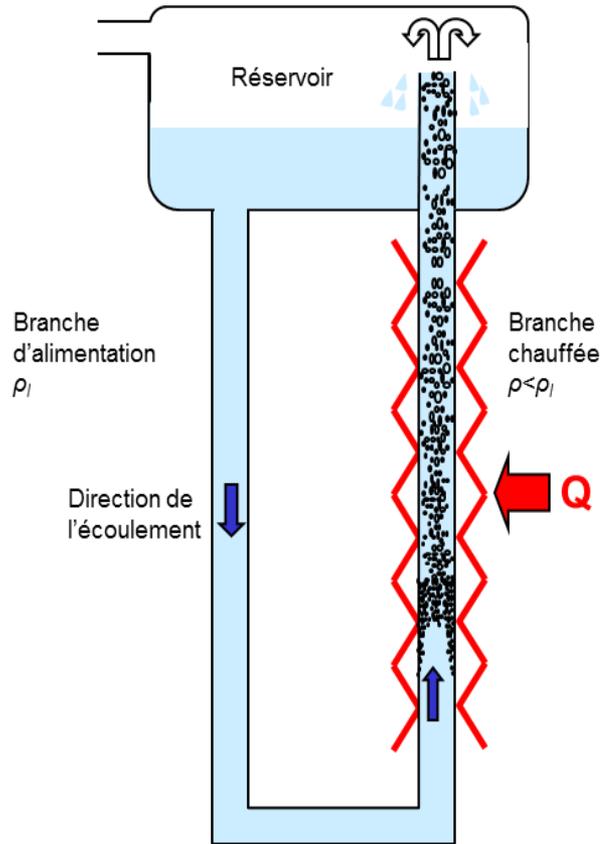
Le LHC dans son tunnel (CERN)



CMS lors de son assemblage (CERN)

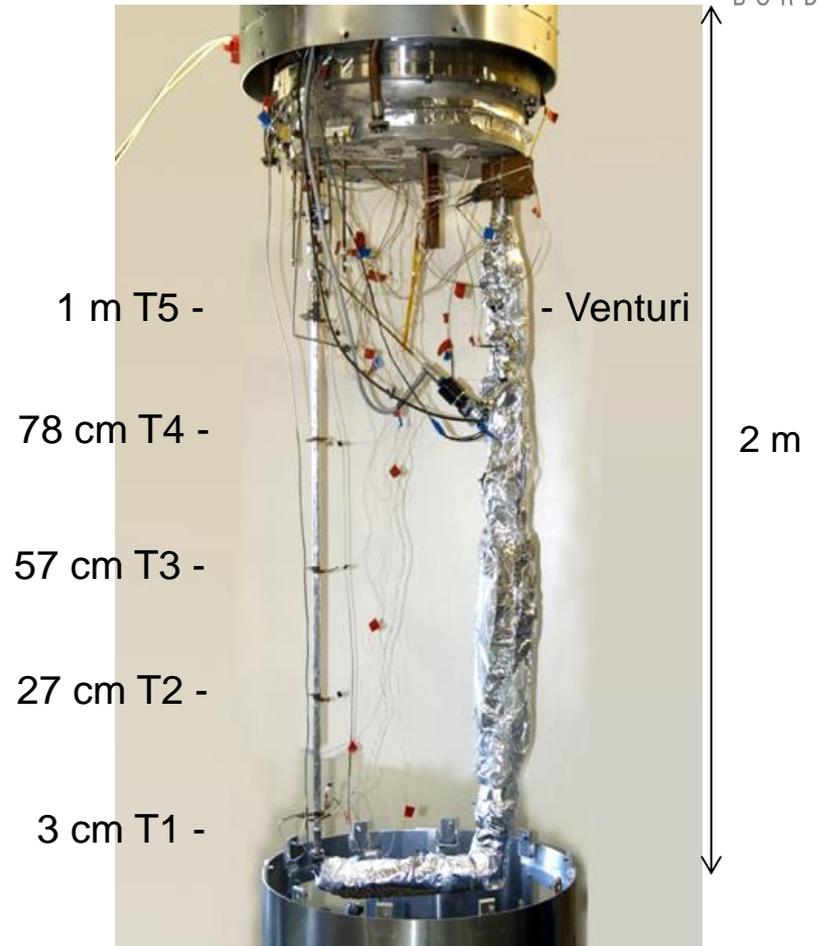


Système de refroidissement de CMS



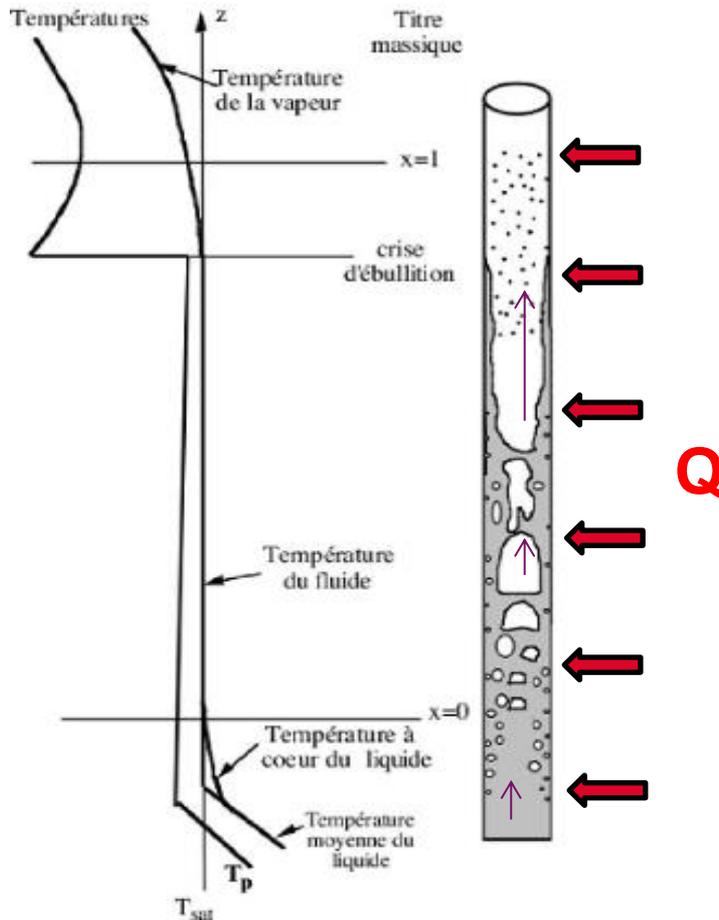
Cas d'une boucle de circulation diphasique

Schéma simplifié du système



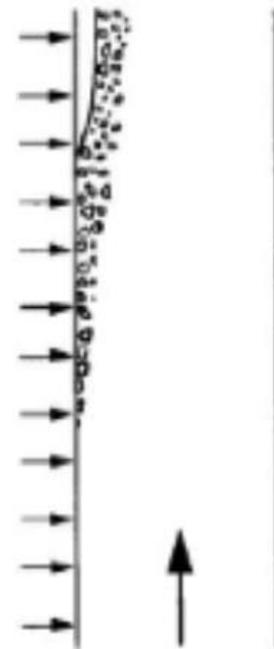
Boucle thermosiphon hors de son cryostat

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



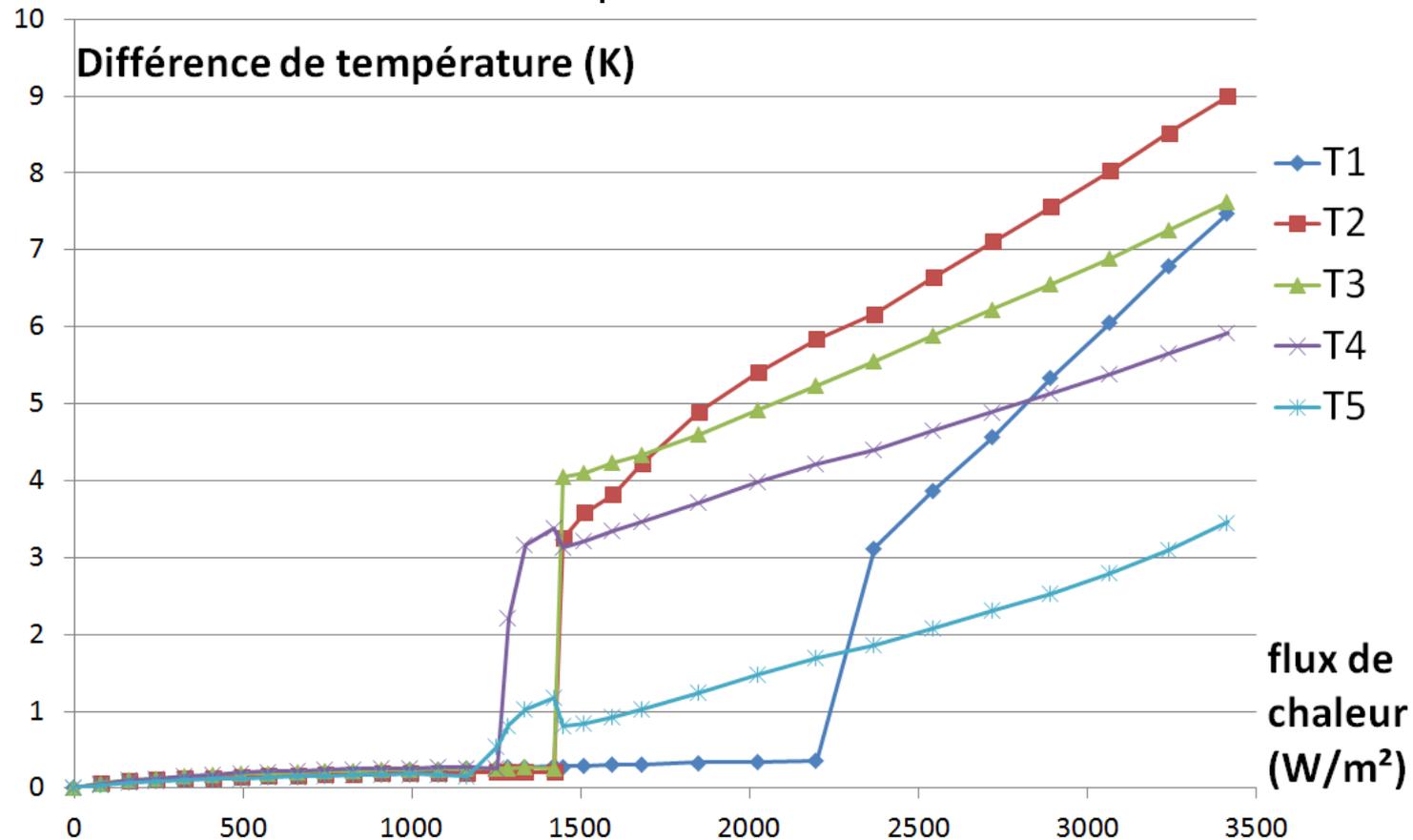
régimes d'écoulement classiques pour un chauffage pariétal dans un tube vertical

Pour un flux de chaleur assez puissant

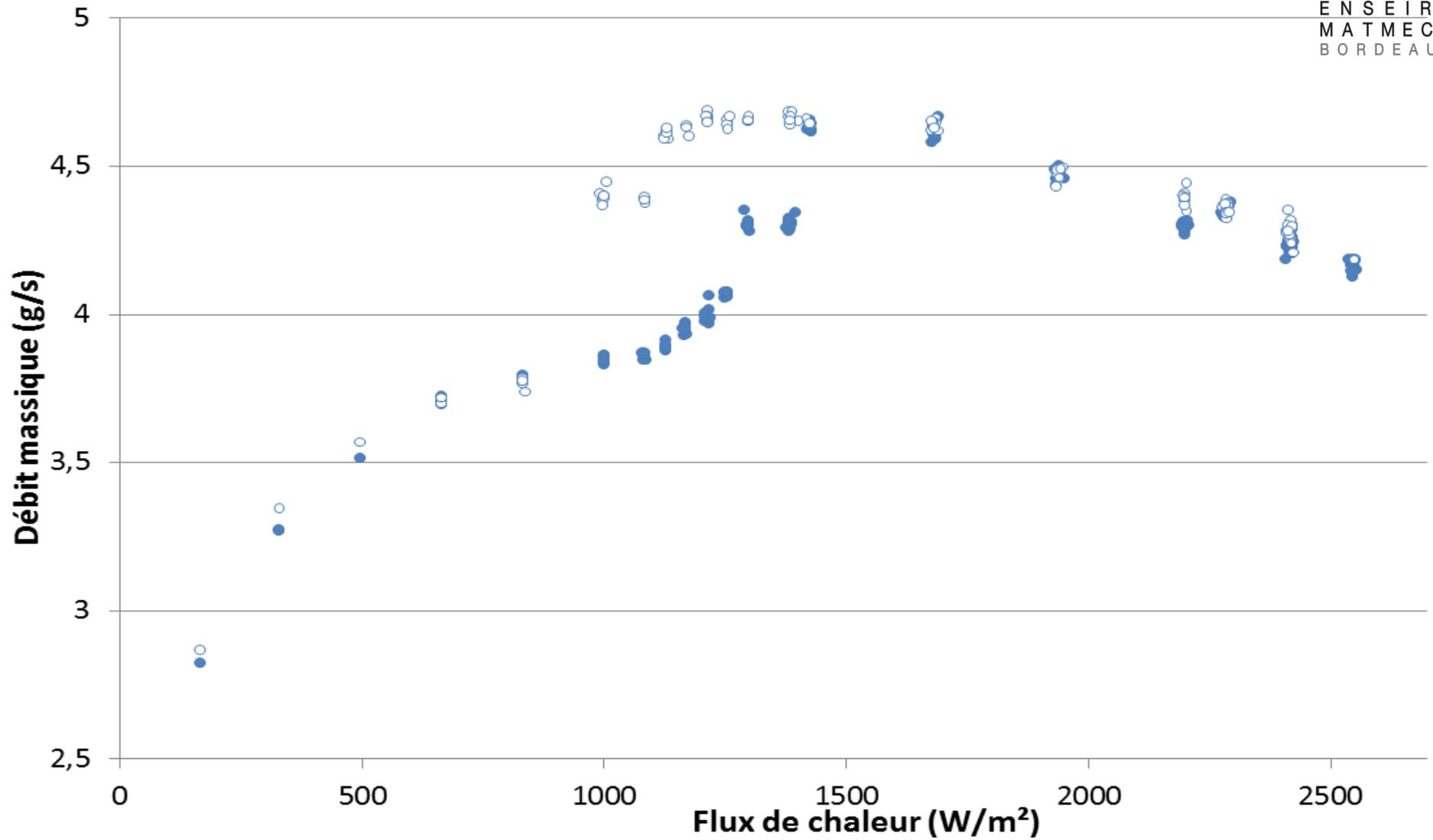


Profil d'écoulement en film de vapeur

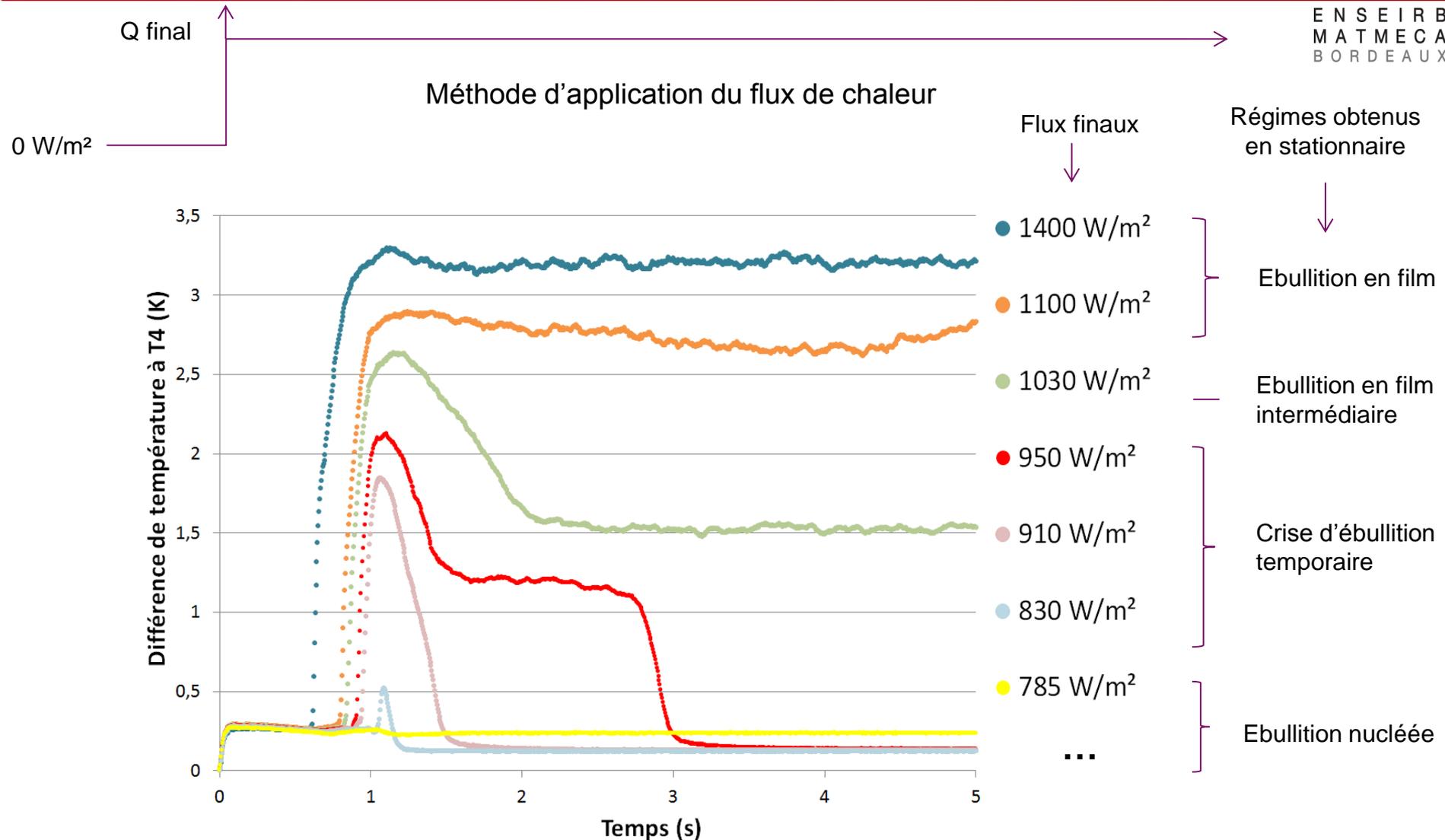
- Variation « douce » du flux de chaleur
- Détermination des flux de chaleur critiques
- Influence de la position



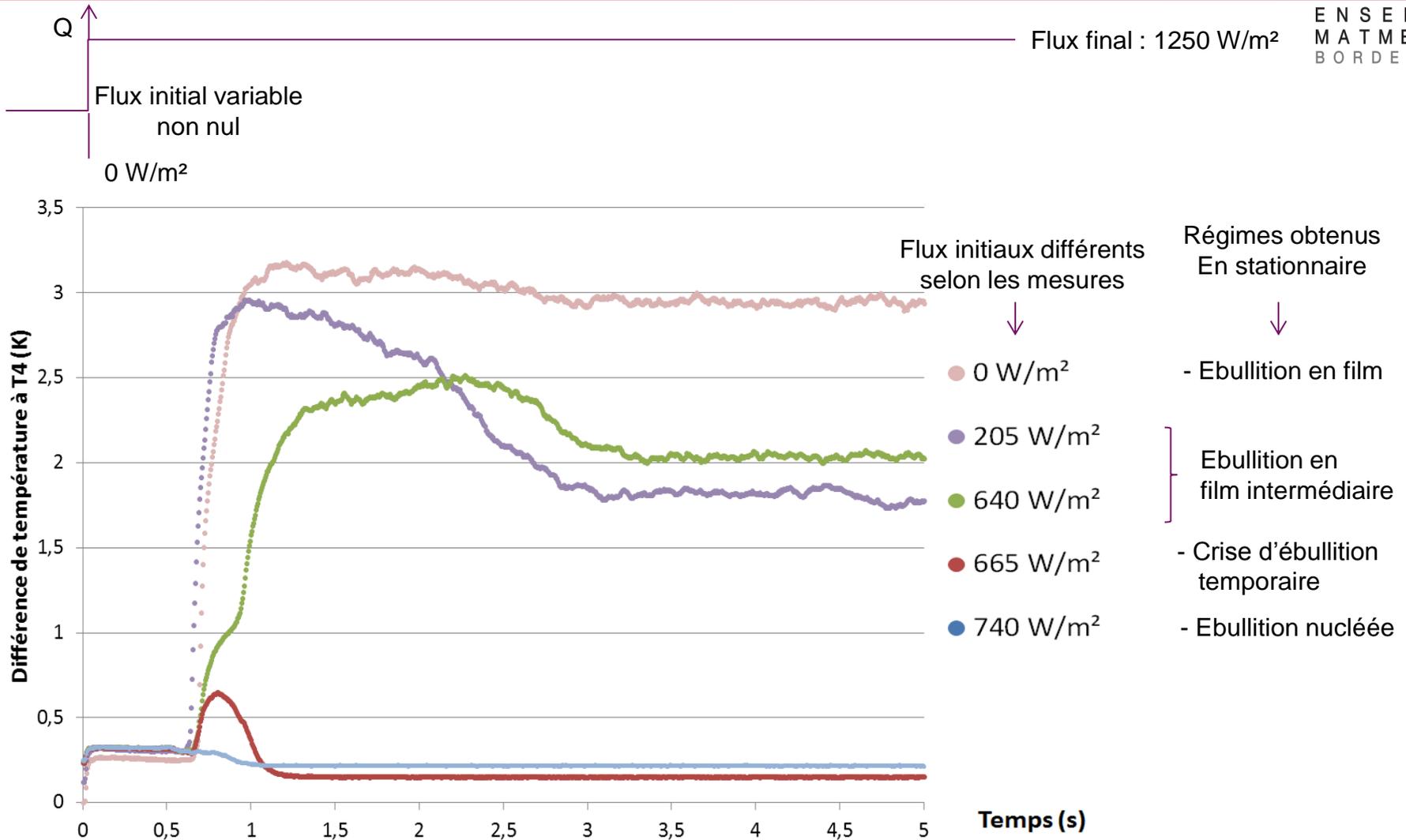
Evolution des différences de températures lors d'une montée



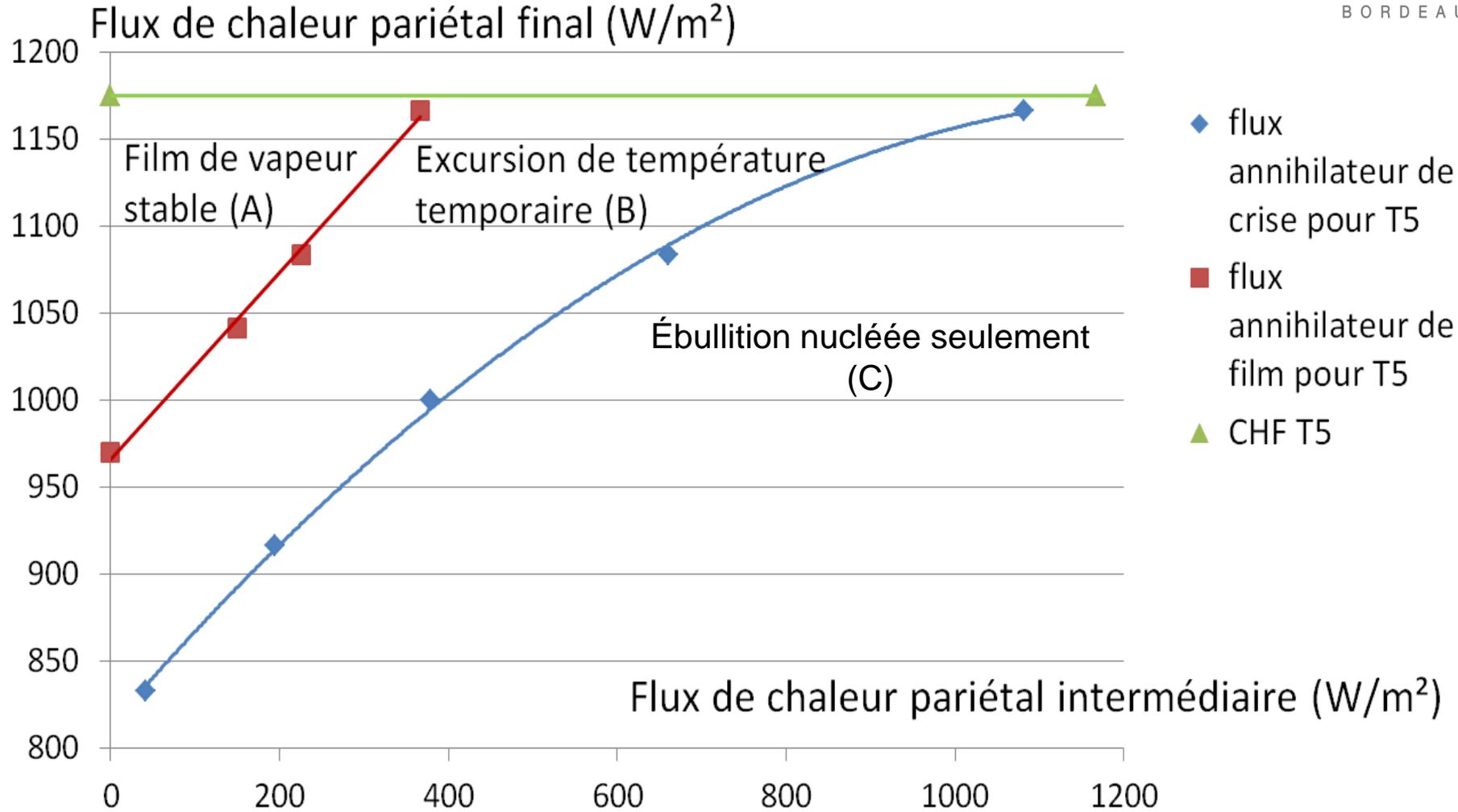
Evolution du débit massique lors d'une montée et redescente



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



Evolution de la différence de température sur le capteur 4 pour un flux final constant à 1250 W/m² avec des flux initiaux différents



Carte de comportement au niveau du capteur T5

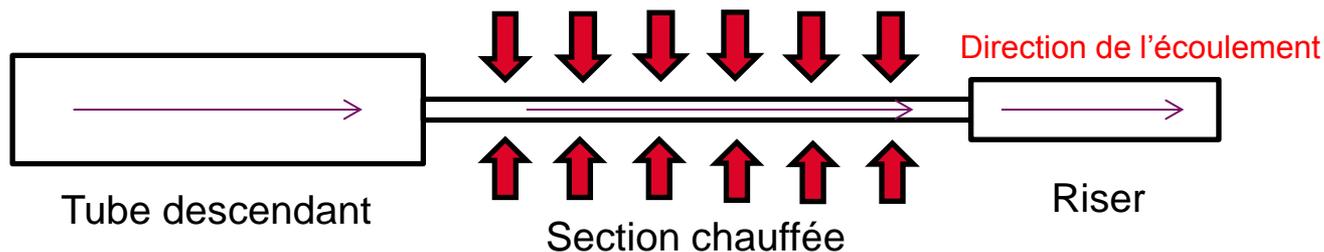
Hypothèses du modèle homogène :

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

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

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

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



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

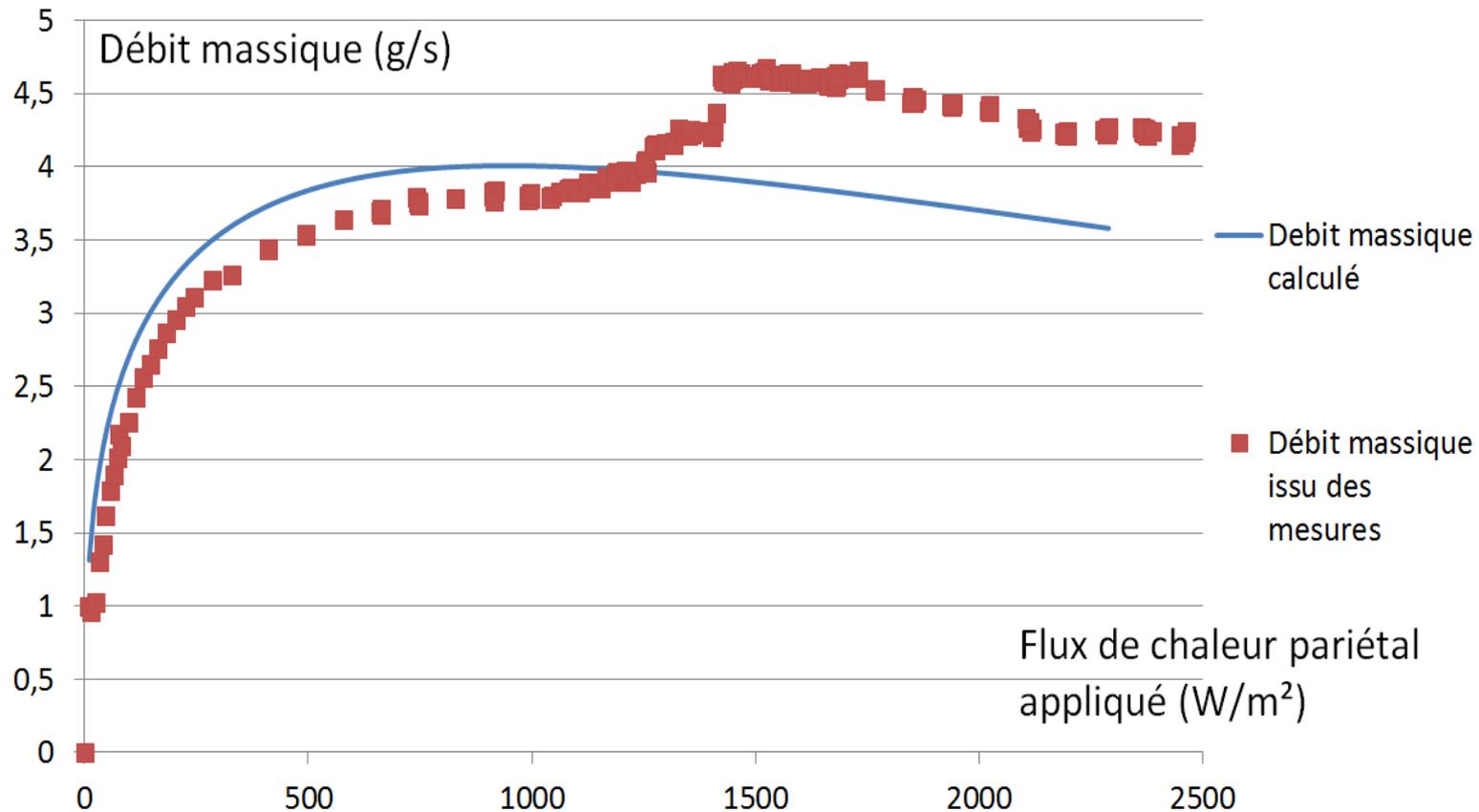
$$\frac{dG}{dt} = -(\rho u^2)_{out} + (\rho u^2)_{in} + P_{in} - P_{out} - \Delta P_{fr} + \int_{-L_D}^{L_{ch}} \rho g dx + M_R + \sum \left[\Delta \left(\frac{\rho u^2}{2} \right) - K_{sing} \frac{\rho u_s^2}{2} \right] \quad (5)$$

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

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

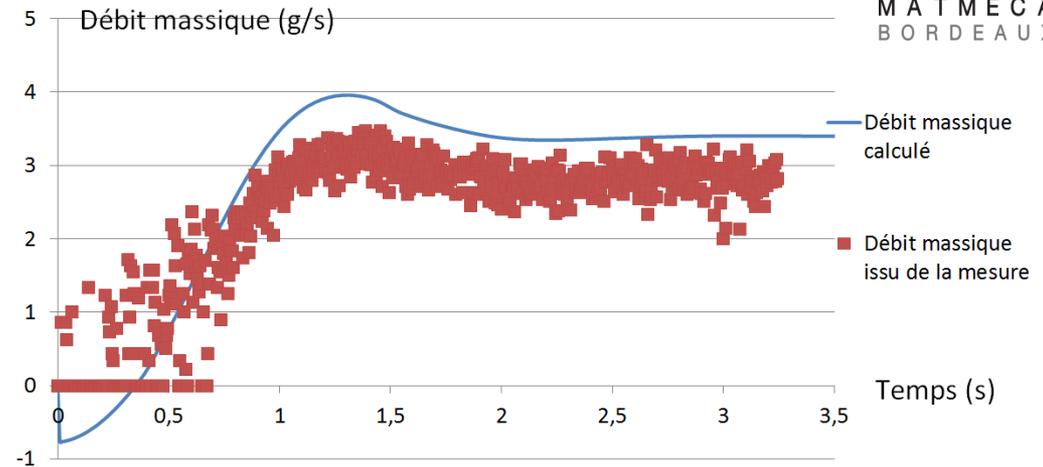
$$\rho(h) = \left\{ \begin{array}{l|l} \rho_l & si \ h \leq h_{lsat} \\ \left(\frac{h - h_l}{h_{lg}\rho_g} + \frac{h_g - h}{h_{lg}\rho_l} \right)^{-1} & si \ h > h_{lsat} \end{array} \right\} \quad (8)$$

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

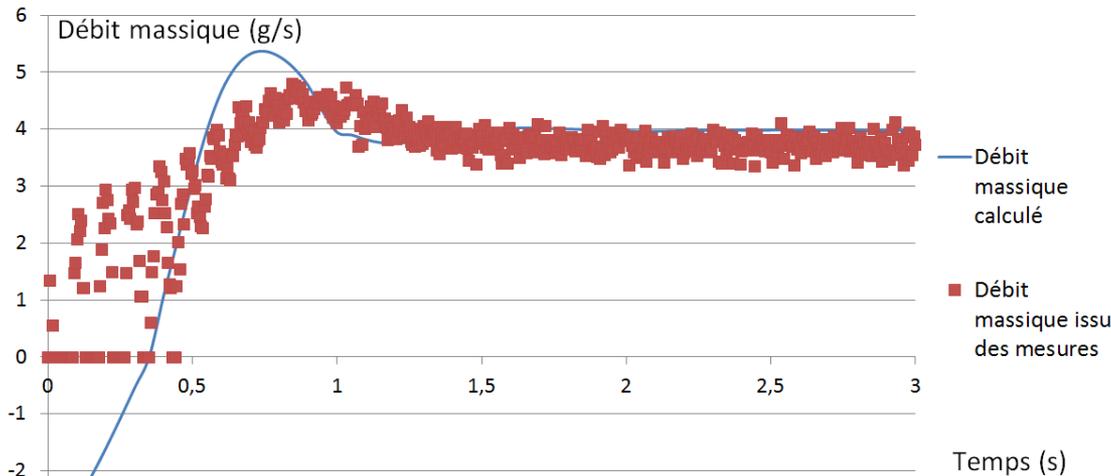


Débits massiques mesurés et calculés à l'aide de la macro en stationnaire

-Transitoire très bien représenté,
surtout à faible flux

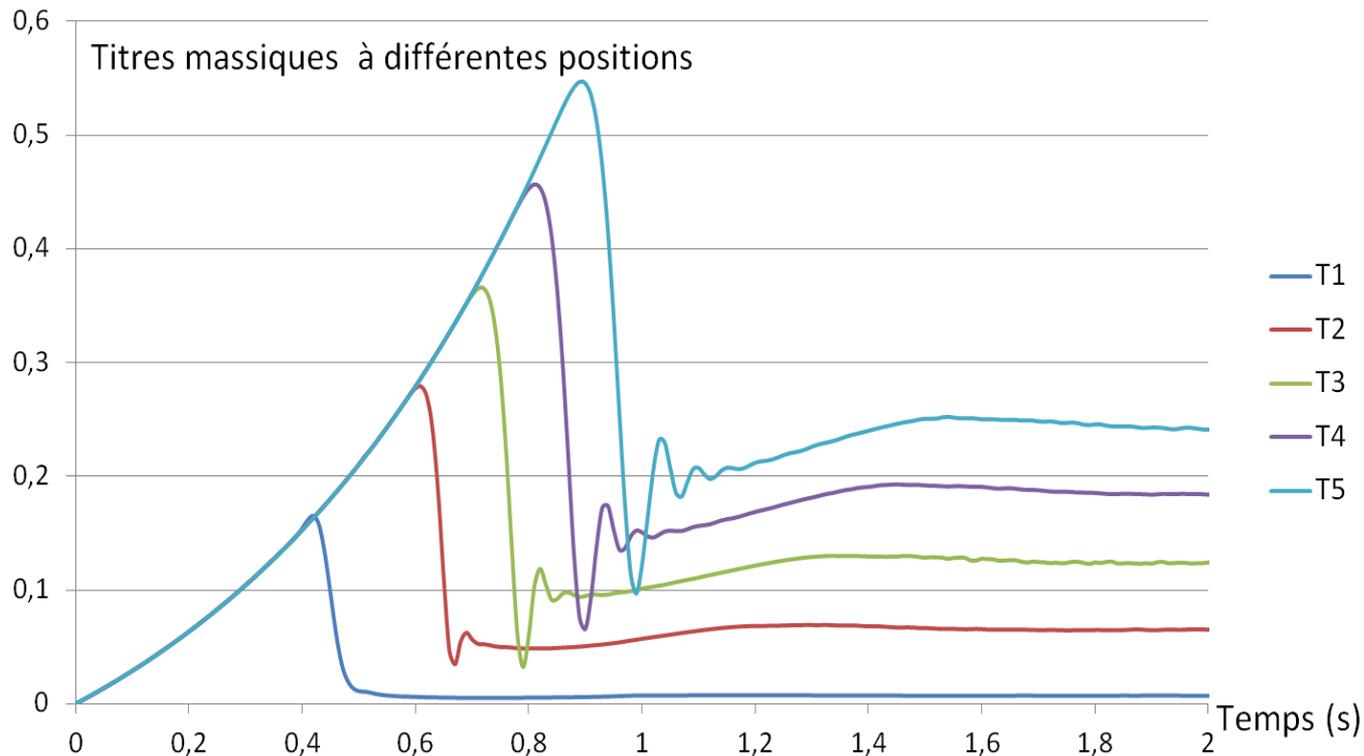


Evolution des Débits massique mesurés et simulés à l'aide du logiciel COMSOL en transitoire (240 W/m²)

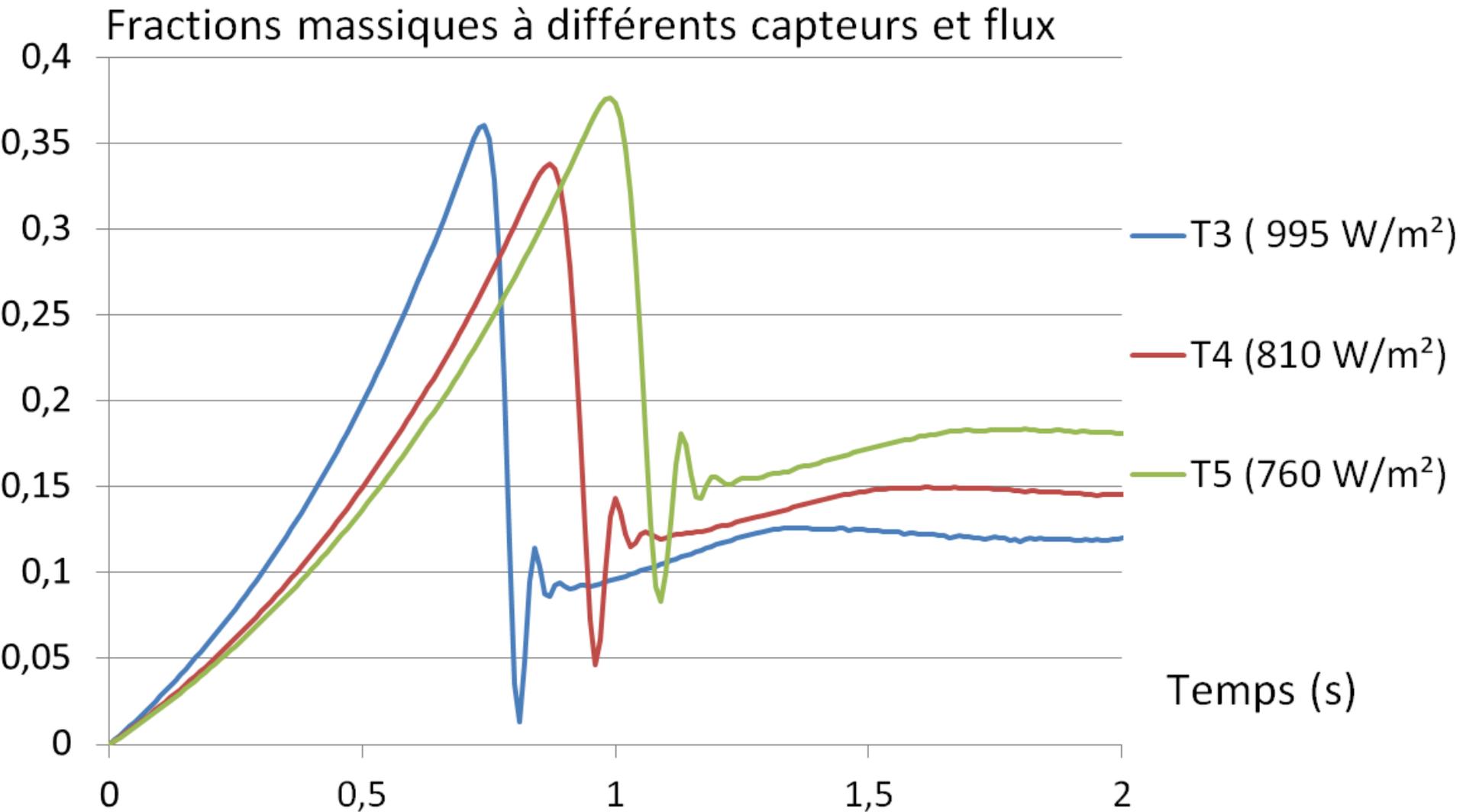


Evolution des Débits massique mesurés et simulés à l'aide du logiciel COMSOL en transitoire (985 W/m²)

- 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



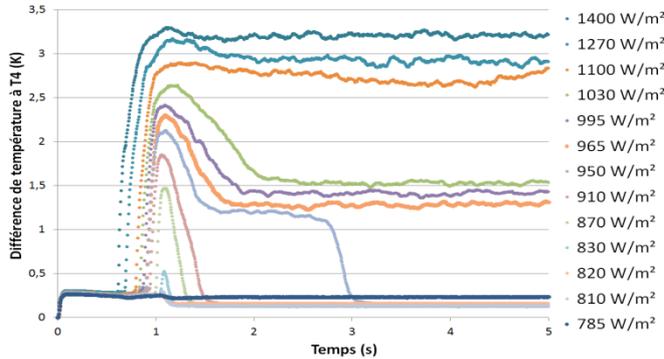
Evolution temporelle des fractions massiques sur tous les capteurs et un flux de chaleur brusque de 1030 W/m²



Evolution des titres massiques pour différents capteurs à différents flux

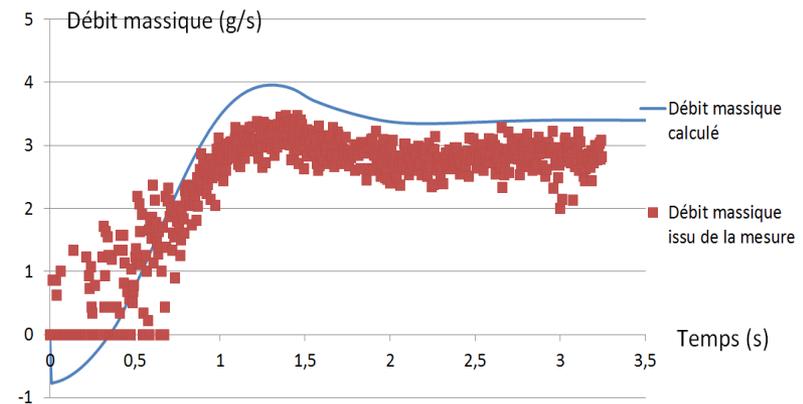
Partie expérimentale :

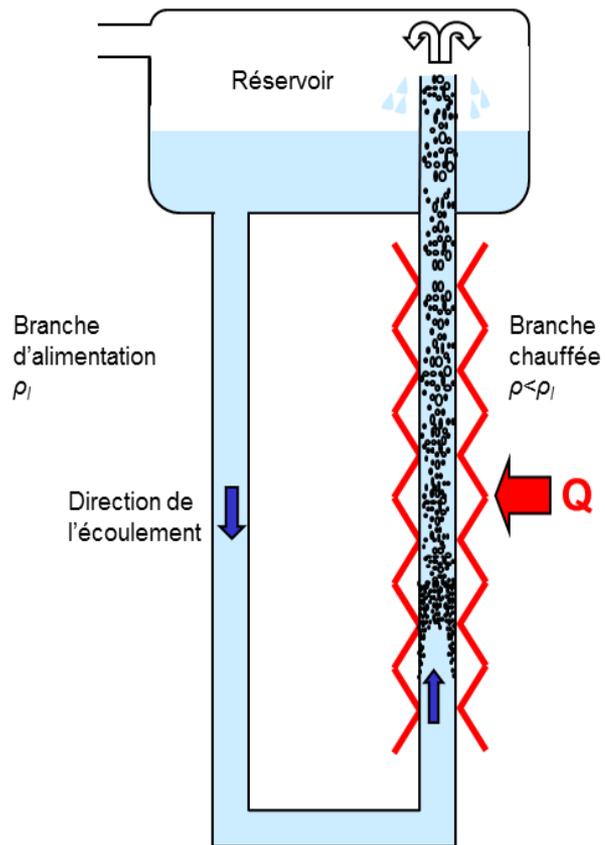
- Observation d'un phénomène inédit
- meilleure compréhension de l'apparition du film
- création de cartes de comportements



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



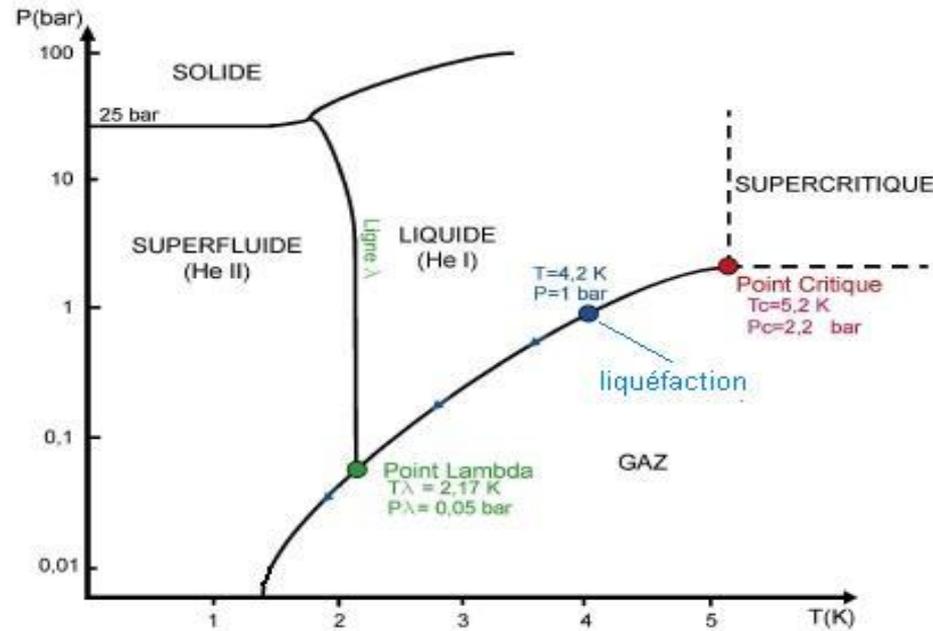


Cas d'une boucle de circulation diphasique

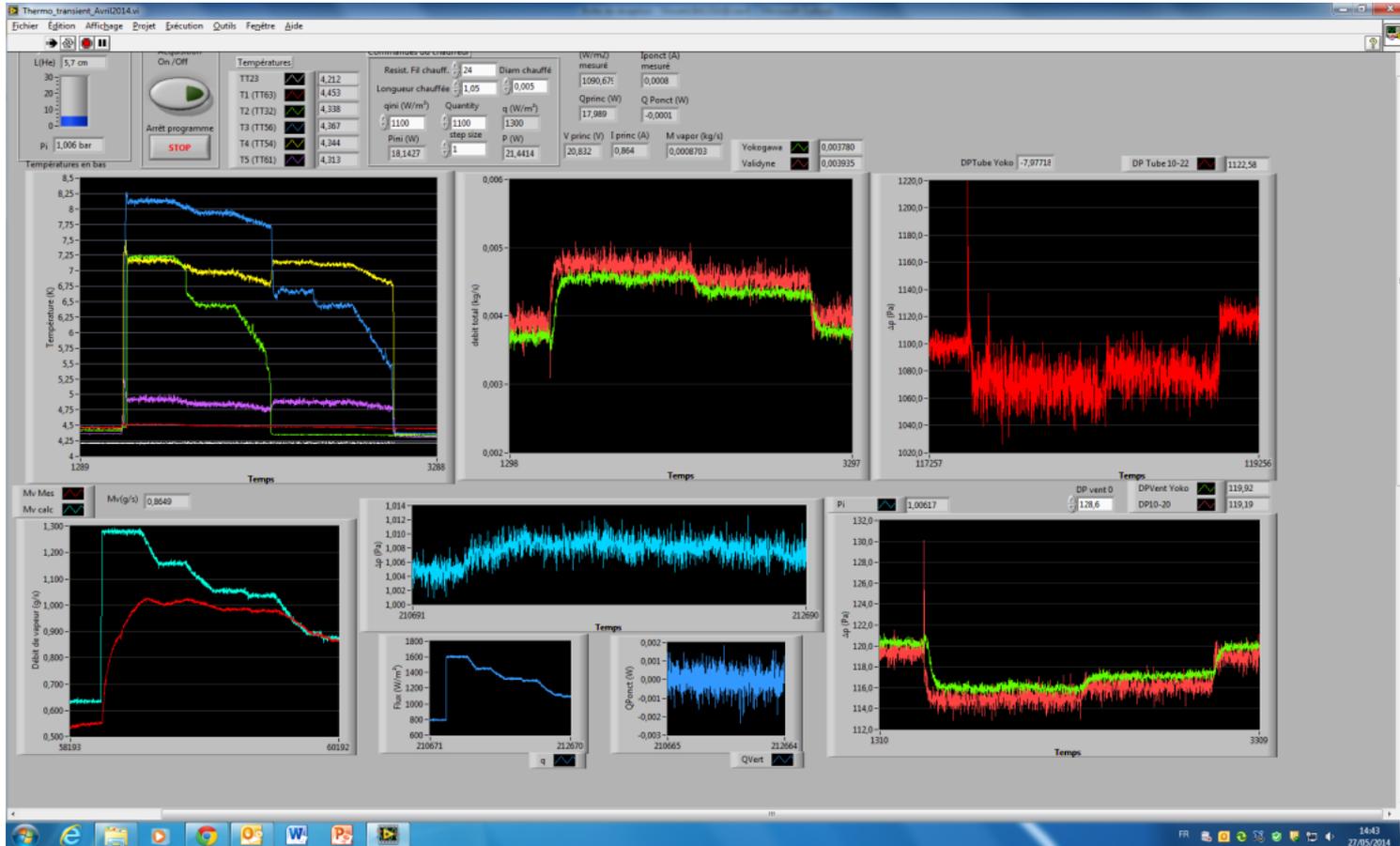
**MERCI DE VOTRE
ATTENTION**



Système de refroidissement de CMS

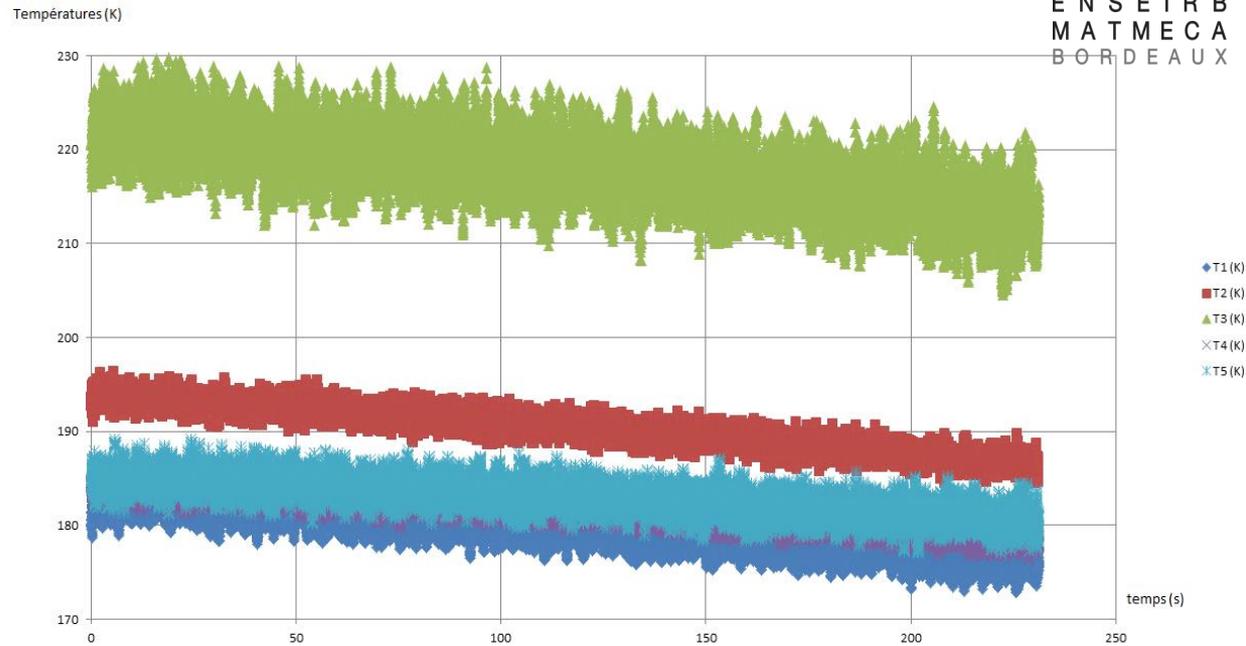


Fluide	Masse volumique du liquide (kg/m ³)	Masse volumique du gaz (kg/m ³)	Viscosité dynamique du liquide (Pa.s)
Eau	1000	0,6	10 ⁻³
Azote	810	4,5	160×10 ⁻⁶
Hélium	125	17	3,6×10 ⁻⁶
Fluide	Chaleur latente de vaporisation (J/kg) ×10 ³	Chaleur spécifique du liquide (J/kg.K) ×10 ³	Tension superficielle (N/m)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

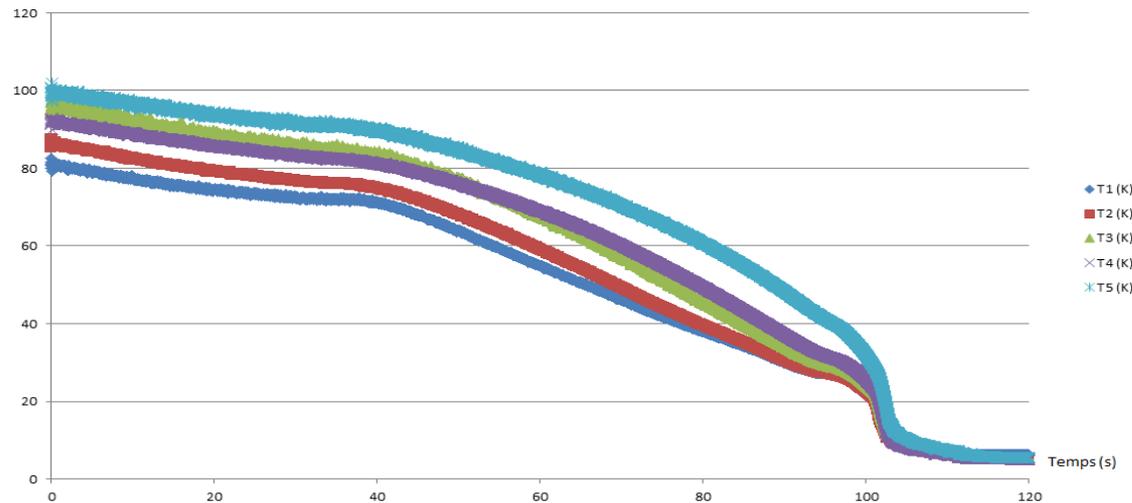


Interface utilisateur dans Labview

Mise en froid (vapeur)



Mise en froid (transition)



Mise en froid (transition)

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

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

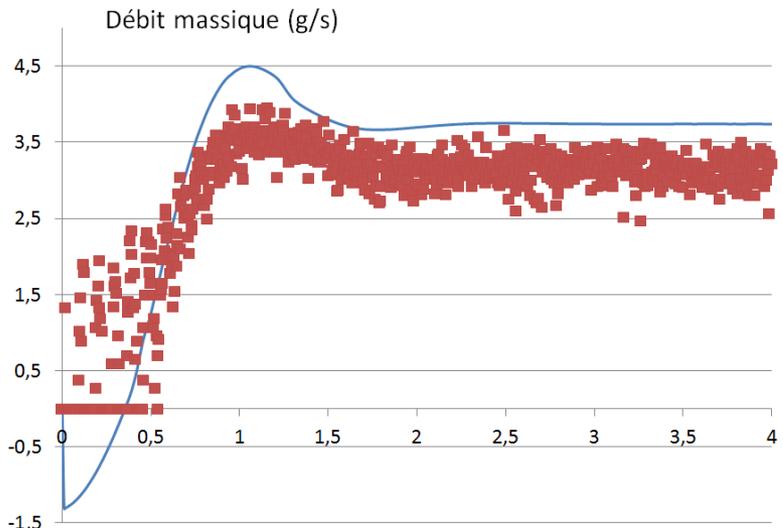
$$f(Re) = 0.079 \left[\frac{\rho u D}{\mu_m} \right]^{-0.25} \quad (11)$$

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

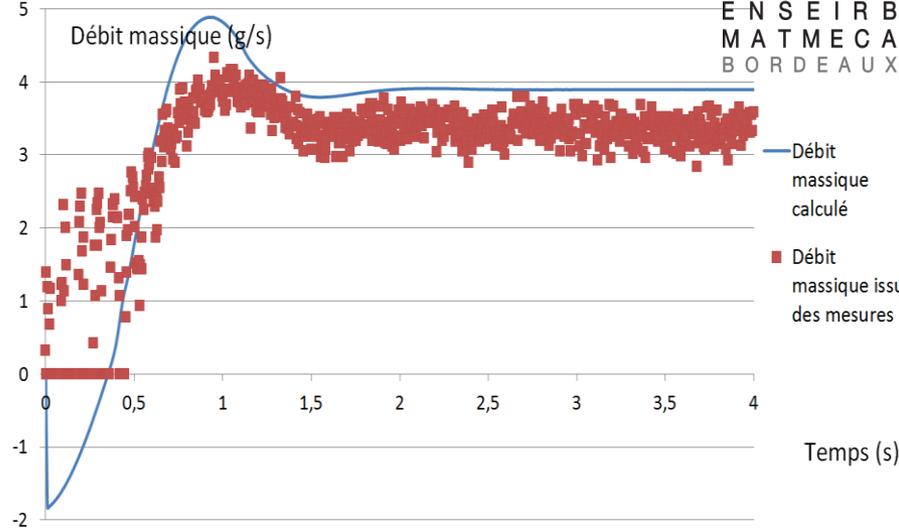
$$K_{reduc} = 0.5 \left(1 - \frac{A_t}{A_D} \right) = 0.492$$

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

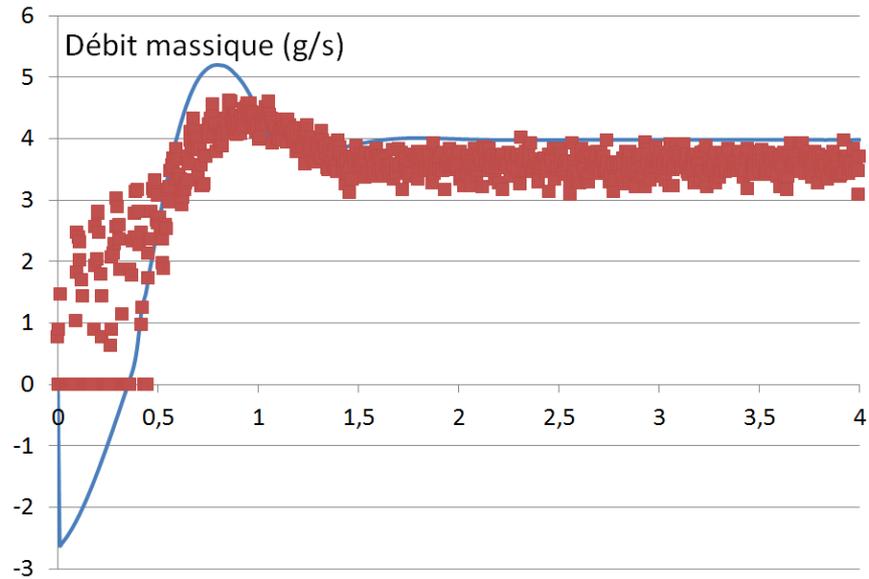
$$K_{elarg} = \left(1 - \frac{A_t}{A_R} \right)^2 = 0.969$$



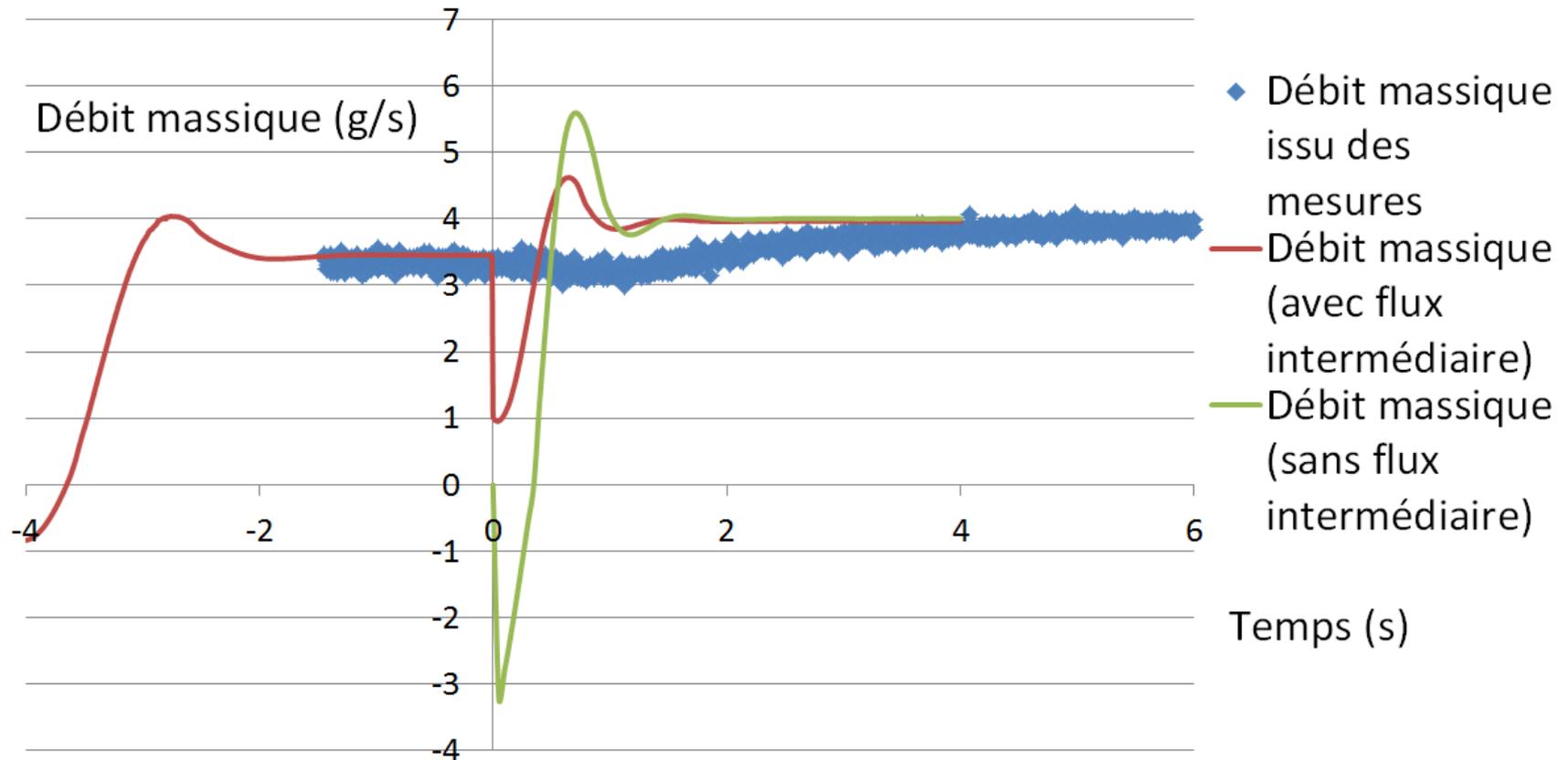
410 W/m²



575 W/m²



825 W/m²



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

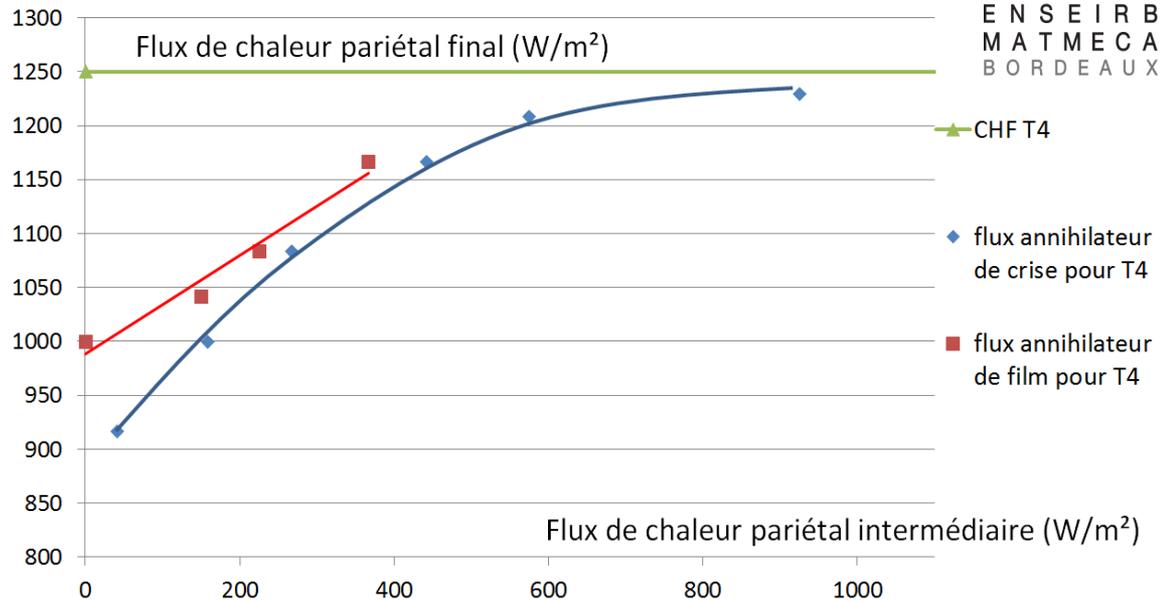
$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{-L_D}^L \rho u \, dx + \int_{-L_D}^L \frac{\partial \rho u^2}{\partial x} \, dx = \int_{-L_D}^L -\frac{dp}{dx} \, dx$$

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

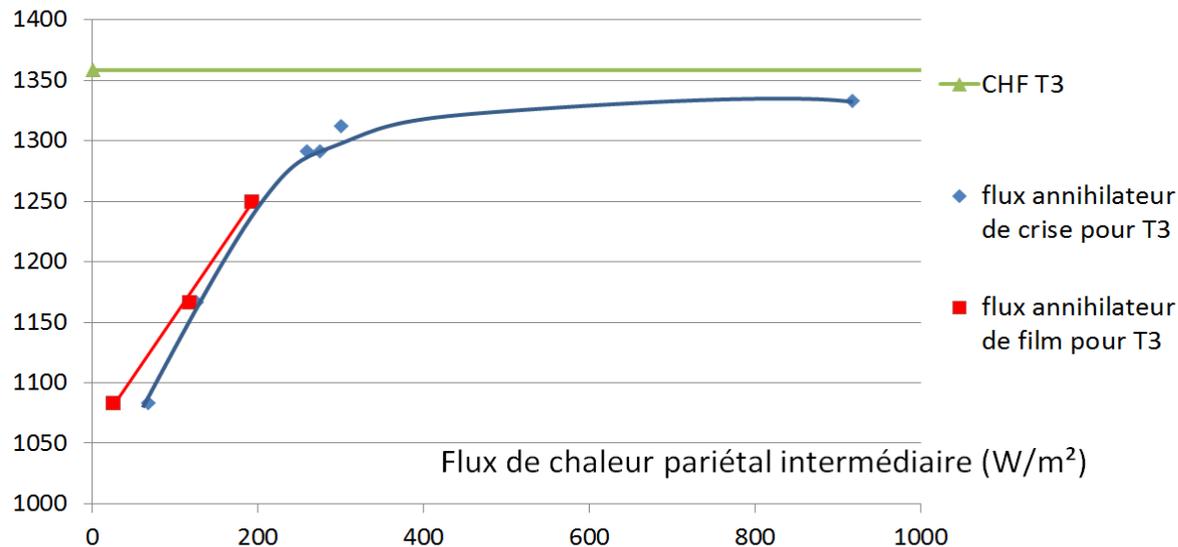
$$\frac{dG}{dt} = -(\rho u^2)_{out} + (\rho u^2)_{in} + P_{in} - P_{out}$$

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

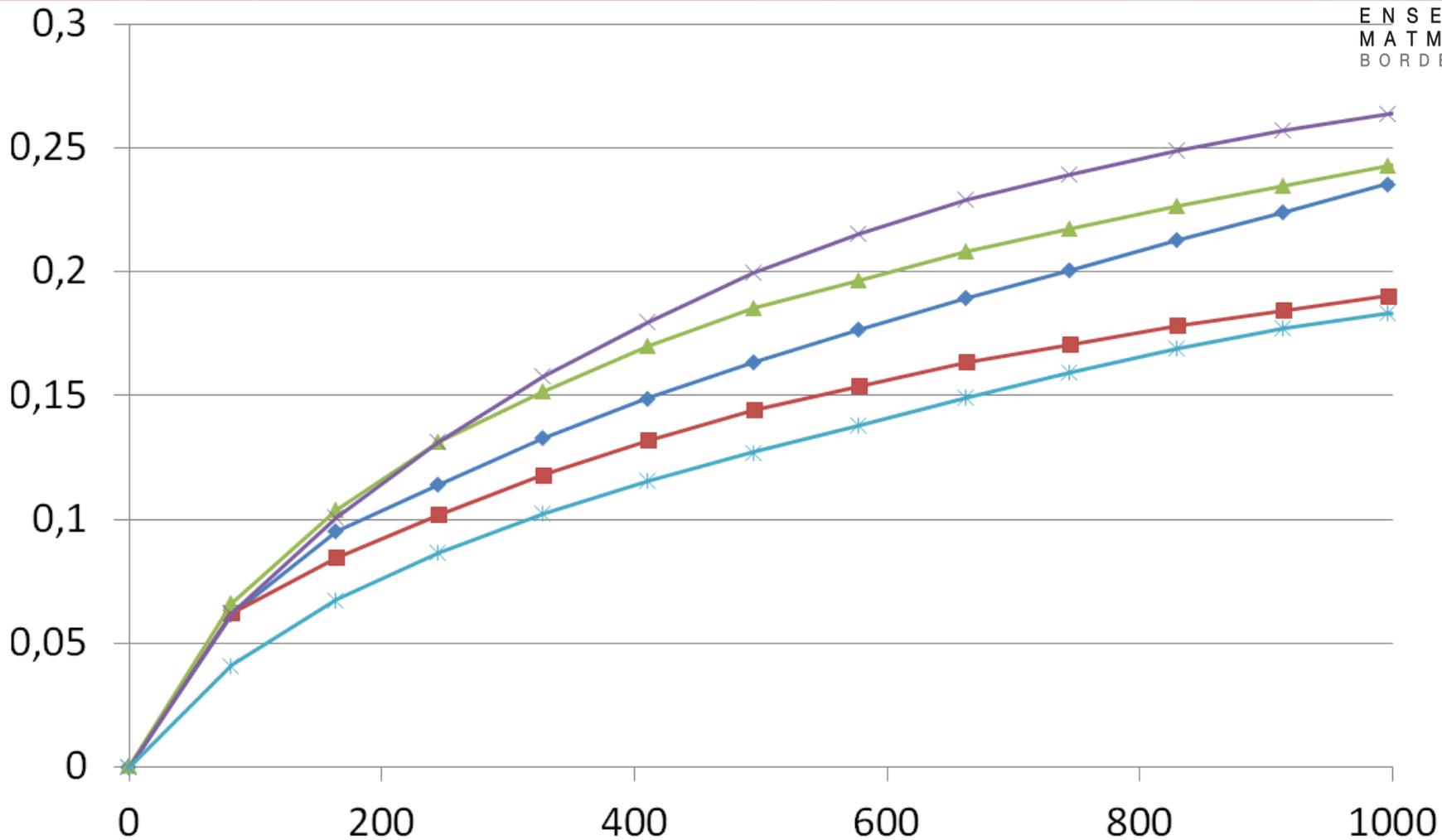
Carte de comportement pour T4



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