CAVITATION ET TURBULENCE

SÉMINAIRE MASTER TMA

23 NOVEMBRE 2022

HENDA DJERIDI



PHÉNOMÈNE DE CAVITATION

LES INTERACTIONS ÉCOULEMENT/CHANGEMENT DE PHASE

LES PROBLÉMATIQUES DE MODÉLISATION

EXEMPLES D’ÉTUDES

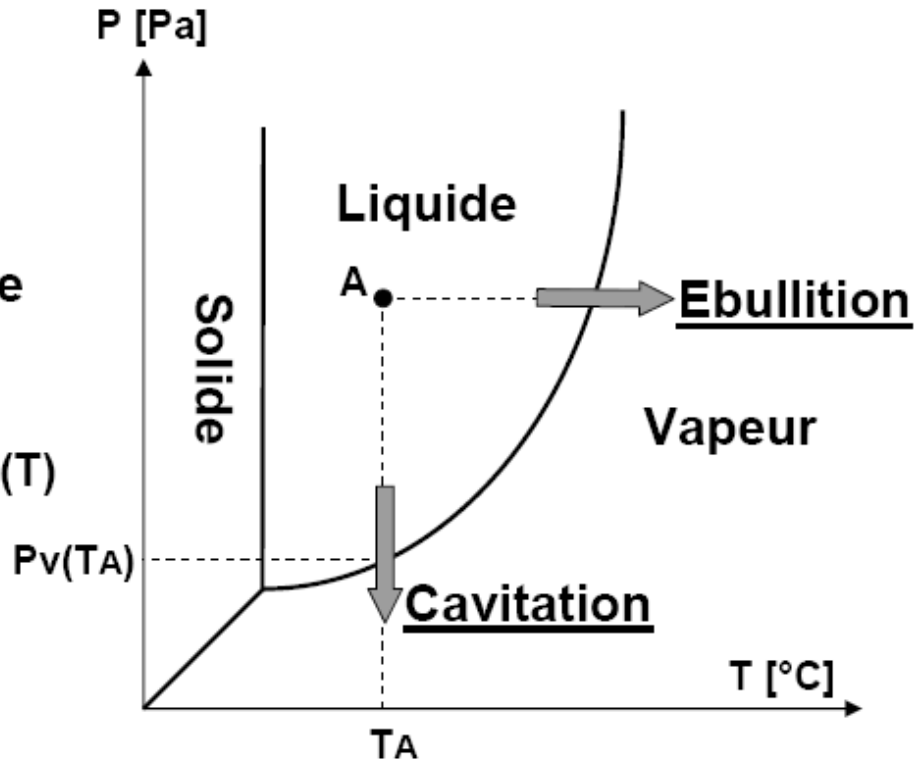
- ÉCOULEMENT DE MARCHE DESCENDANTE
- ÉCOULEMENT AUTOUR D’OBSTACLE

DÉVELOPPEMENT D’INSTRUMENTATION INHÉRENTE

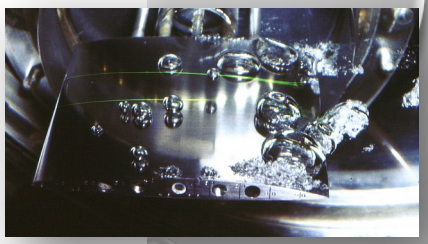
La pression de vapeur saturante

- Diagramme des états d'un corps
- Courbes de changement de phase

- Seuil de référence:
  - Pression de vapeur saturante Pv(T)
  - T=20 °C, Pv ~ 2337 Pa





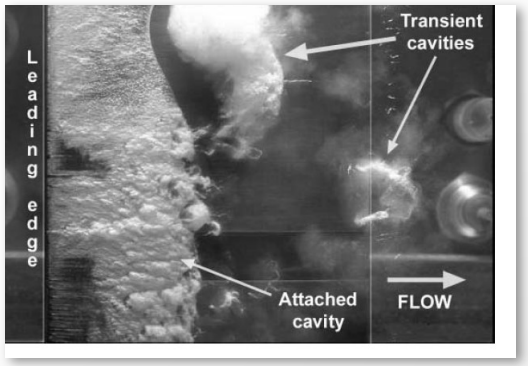


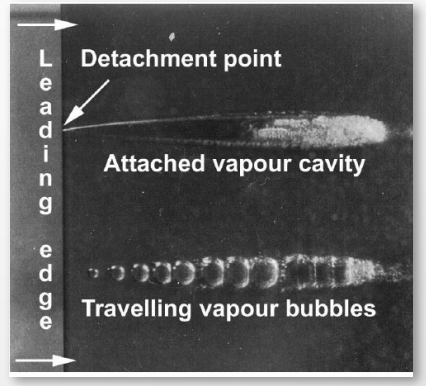
Pour 0°C<T<40°C: $Log_{10}(p_v) = 2.7862 + 0.0312\,T - 0.000104\,T^2$

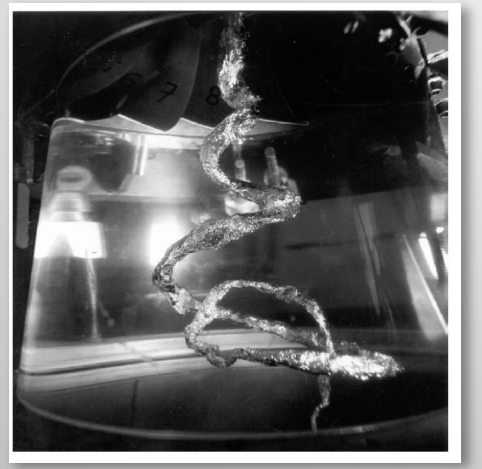
LES FORMES ET LES CONSEQUENCES

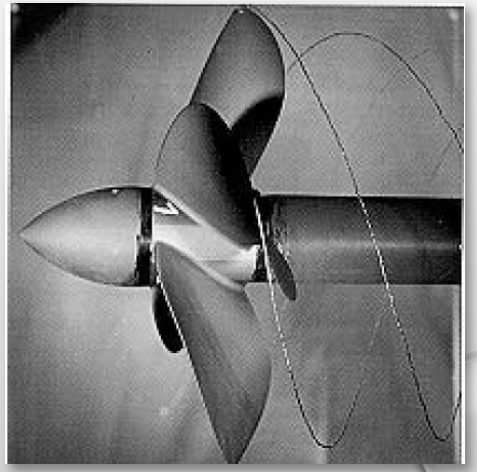


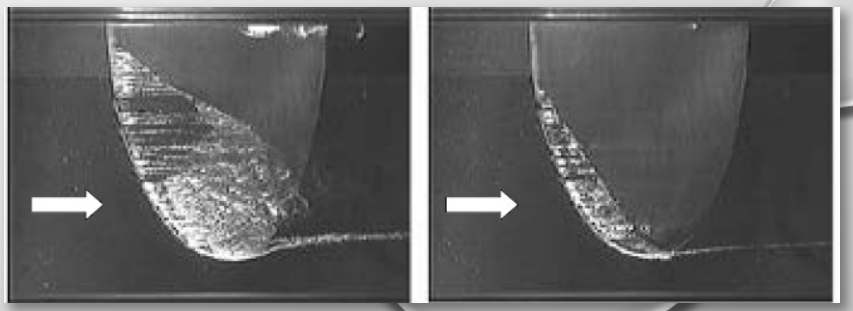










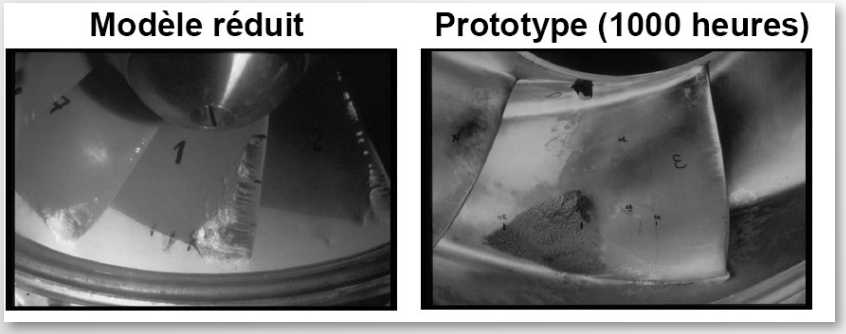


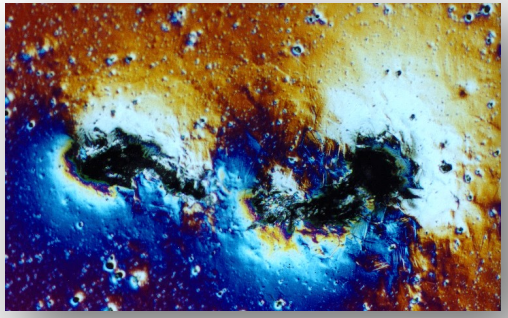
LES FORMES ET LES CONSÉQUENCES



BAISSES DE PERFORMANCES DES MACHINES

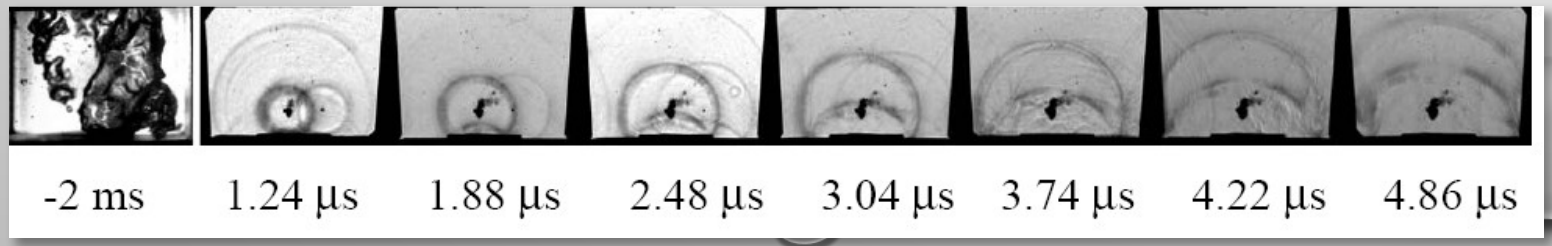
RÉDUCTION DE LA DURÉE DE VIE (ÉROSION, PITTING)





INDISCRÉTION ACOUSTIQUE

VIBRATION (PROPAGATION D'ONDES DE CHOC)



onditions hydrodynamiques et les instabilités d’écoulements ge

s zones cisaillées de type couche de mélange
s zones de vorticité
s zones d ’écoulement décollé instationnaire
s zones de recirculation

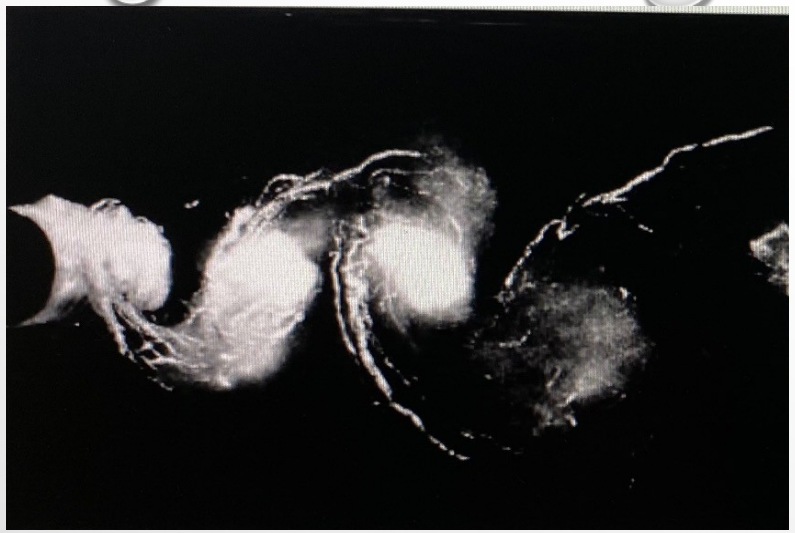
des zones de diminution de pression générant le changement d

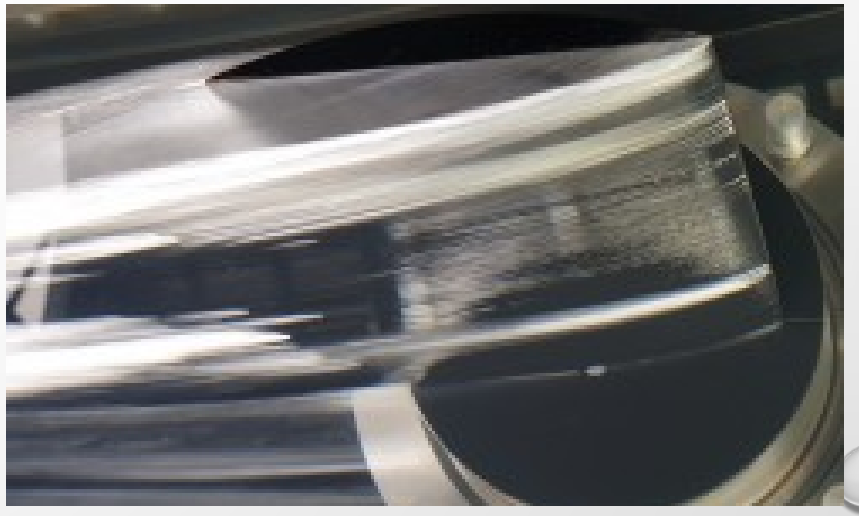
- **L’apparition de cavitation sous toutes ses formes engendre:**

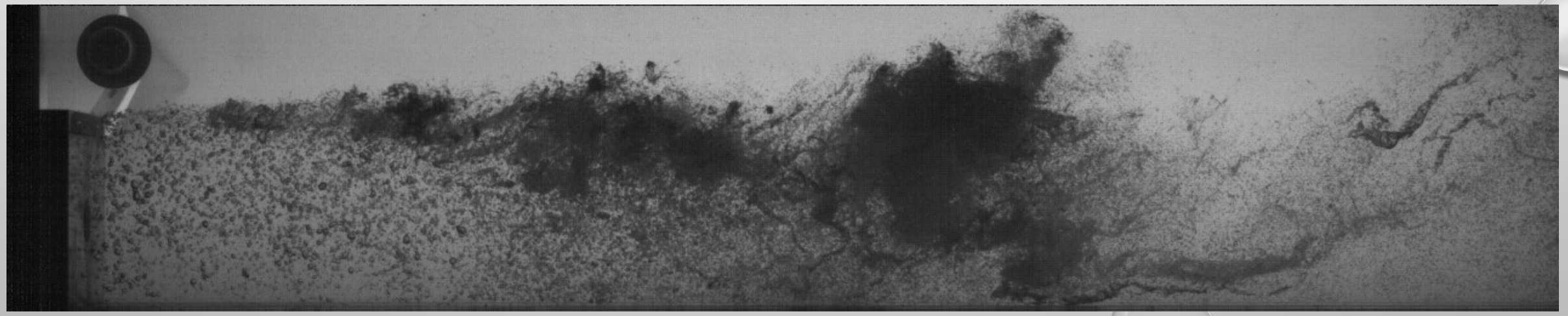
- Des modifications des états de couche limite (sur obstacle)
- La vapeur est au cœur des zones de vorticité
- Des modifications de taille des vortex, de leur intensité et de leur mécanisme de diffusion
- De l’agitation turbulente induite

Donc un comportement hydrodynamique différent

LES INTERACTIONS ÉCOULEMENTS / CHANGEMENT DE PHASE







LES PROBLÉMATIQUES DE MODÉLISATION

Modèles à 2 fluides :

- Équations de conservation pour chacune des phases
- Prise en compte des échanges interfaciaux (pression, vitesse température)
- 7 équations de transport

Modèles réduits à 5 équations :

- 2 températures (restitution des effets de déséquilibre thermique

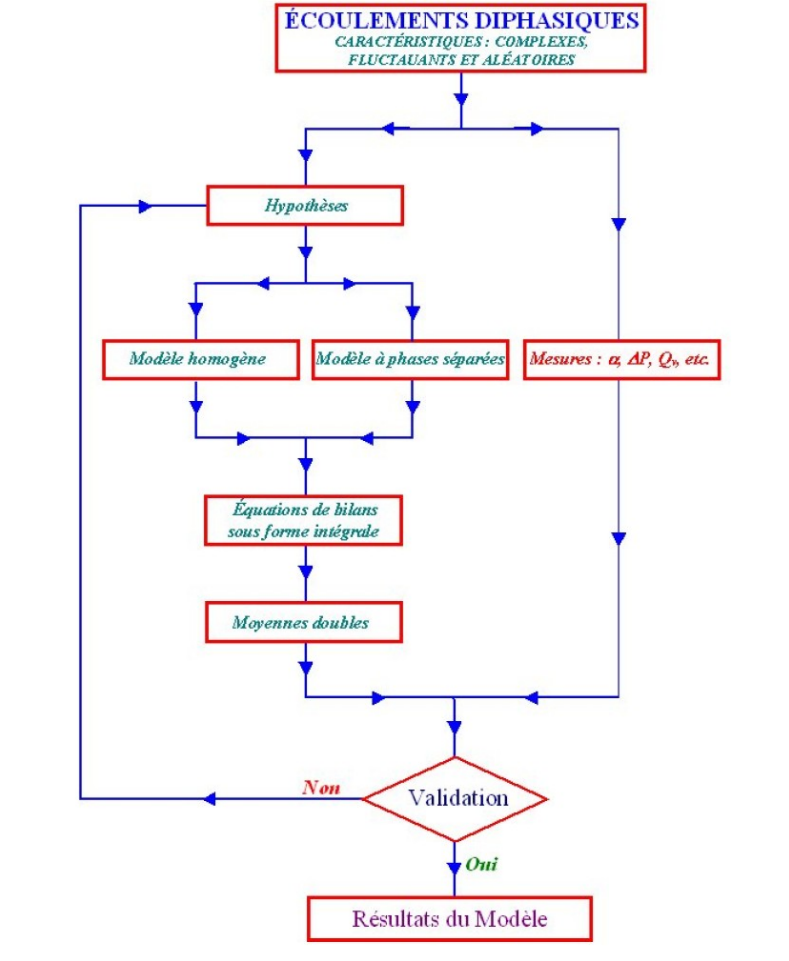
Modèles de mélange homogène (1 fluide):

- 3 équations de transport (hyp de non glissement entre les phases)
- Équilibre thermique (HEM)
- Équations d'état pour le mélange (égalité des enthalpies libres entre les phase

Modèles relaxés à 4 équations:

- HRM (3 équations pour le mélange) + TTV (et/ou terme de source de relaxation)
- TTV (terme source de condensation/évaporation) à constantes ajustables

LES PROBLÉMATIQUES DE MODÉLISATION



modèles	7 équations	5 équations	4 équations	3 équations
équations	2 masses 2 QdM 2 énergies $+\alpha$	2 masses 1 QdM 1 énergie $+\alpha$	1 masse 1 QdM 1 énergie $+\alpha$	1 masse 1 QdM 1 énergie
caractéristique	2 pressions 2 vitesses 2 températures	1 pression 1 vitesse 2 températures	1 pression 1 vitesse 1 température	1 pression 1 vitesse 1 température
dénomination	2-fluide	réduit	1-fluide relaxé HRM ou TTV	1-fluide HEM ou HNEM
applications	1D Euler	2D Euler	2D, 3D N-S	2D, 3D N-S

EQUATIONS POUR LES MODELES 2-FLUIDES

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \vec{\nabla} \bullet \left(\alpha \cdot \overrightarrow{U_v} \right) = \frac{A}{V \rho_v}$$

$$\frac{\partial (1-\alpha)}{\partial t} + \vec{\nabla} \bullet \left((1-\alpha) \cdot \overrightarrow{U_l} \right) = -\frac{A}{V \rho_l}$$

Bilans de masse dans les deux phases

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha \overrightarrow{U_v} \right) + \vec{\nabla} \bullet \left(\alpha \overrightarrow{U_v}^2 \right) = \frac{\alpha}{\rho_v} \vec{\nabla} \bullet \overline{\overline{\tau}}_v + \frac{\vec{B}}{V \rho_v}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left((1-\alpha) \overrightarrow{U_l} \right) + \vec{\nabla} \bullet \left((1-\alpha) \alpha \overrightarrow{U_l}^2 \right) = \frac{1-\alpha}{\rho_l} \vec{\nabla} \bullet \overline{\overline{\tau}}_l - \frac{\vec{B}}{V \rho_l}$$

Bilans de Qdm dans les deux phases

Approche macroscopique (équations moyennées spatialement)

Vitesses $\overrightarrow{U_v}$ et $\overrightarrow{U_l}$ différentes

(Prise en compte des phénomènes de « glissement » entre phases)

Termes A et B très difficiles à évaluer à l'échelle macroscopique

Quasiment pas utilisé en cavitation

EQUATIONS POUR LES MODELES 1-FLUIDE

Variables caractérisant
le mélange liquide / vapeur

$$\rho = \alpha\rho_v + (1-\alpha)\rho_l$$
$$\rho\vec{U} = \alpha\rho_v\vec{U_v} + (1-\alpha)\rho_l\vec{U_l}$$
$$\vec{\Delta U} = \vec{U_v} - \vec{U_l}$$
$$\Delta\rho = \alpha\rho_v - (1-\alpha)\rho_l$$

Bilan de masse
dans le mélange

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \vec{\nabla}\bullet\left(\rho\vec{U}\right) = 0$$

Équation de
transport de α

$$(\rho_v + \rho_l)\frac{\partial\alpha}{\partial t} + (\rho_v - \rho_l)\vec{\nabla}\bullet\left(\alpha\vec{U}\right) + \rho_l\vec{\nabla}\bullet\vec{U} + 2\rho_v\rho_l\vec{\nabla}\bullet\left[\alpha(1-\alpha)\frac{\vec{\Delta U}}{\rho}\right] = 2A'$$

Bilan de Qdm
dans le mélange

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho\vec{U}\right) + \vec{\nabla}\bullet\left(\rho\vec{U}^2\right) + \vec{\nabla}\bullet\left(\frac{\rho_v\rho_l}{\rho}\alpha(1-\alpha)\cdot\vec{\Delta U}^2\right) = \alpha\vec{\nabla}\bullet\bar{\bar{\tau}}_v + (1-\alpha)\vec{\nabla}\bullet\bar{\bar{\tau}}_l$$

Équation de
transport de αU

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[2\rho_v\rho_l\cdot\alpha(1-\alpha)\frac{\vec{\Delta U}}{\rho} + \Delta\rho\cdot\vec{U}\right] + \vec{\nabla}\bullet\left[\Delta\rho\cdot\vec{U}^2 + \frac{\Delta\rho}{\rho^2}\rho_v\rho_l\cdot\alpha(1-\alpha)\cdot\vec{\Delta U}^2 + 4\frac{\rho_v\rho_l}{\rho}\alpha(1-\alpha)\cdot\vec{U}\vec{\Delta U}\right]$$
$$= \alpha\vec{\nabla}\bullet\bar{\bar{\tau}}_v - (1-\alpha)\vec{\nabla}\bullet\bar{\bar{\tau}}_l + 2B'$$

LES PROBLÉMATIQUES DE MODÉLISATION

Simplifications : pressions identiques dans les deux phases

pas de vitesse de glissement

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \bullet \left(\rho \vec{U} \right) = 0$$

Bilan de masse dans le mélange

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \vec{\nabla} \bullet \left(\alpha \vec{U} \right) = \frac{A'}{\rho_v}$$

Équation de transport de α

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho \vec{U} \right) + \vec{\nabla} \bullet \left(\rho \vec{U}^2 \right) = \vec{\nabla} \bullet \bar{\bar{\tau}}$$

Bilan de Qdm dans le mélange

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha \vec{U} \right) + \vec{\nabla} \bullet \left(\alpha \vec{U}^2 \right) = \frac{\alpha}{\rho_v} \vec{\nabla} \bullet \bar{\bar{\tau}} + \frac{B'}{\rho_v}$$

Équation de transport de αU

Equations généralement traitées pour un écoulement cavitant

LES PROBLÉMATIQUES DE MODÉLISATION

$$B' = A'\vec{U} + \left(\rho_l - \rho_v\right) \cdot \alpha\left(1-\alpha\right) \frac{\vec{\nabla} \bullet \bar{\bar{\tau}}}{\rho}$$

Lié au transfert de masse lors des changements de phase

Lié aux effets inertiels (résistance d'une phase sur l'autre lorsque cette dernière accélère ou ralentit

LES PROBLÉMATIQUES DE MODÉLISATION

Avec équation de production / transport de taux de vide

Difficulté = Formulation du terme A'
(transfert de masse lors des changements de phase)

A' basé sur le déséquilibre local de pression P - P_{vap}

Chen et Heister, 1994

$$A' = C\left(P - P_v\right)$$

Reboud et Stutz, 1995

$$A' = \min\left(\alpha_{min}, \alpha, 1-\alpha\right)\left(-\sigma_{cav} - Cp\right)\frac{1}{\theta}\frac{\rho_v^2}{\rho_l}V$$

Kunz et al., 1999

$$A' = m^- + m^+$$

$$m^- = \frac{C_{dest}\rho_v\alpha_l \min\left(0, P - P_v\right)}{\left(\frac{1}{2}\rho_l U_\infty^2\right)t_\infty}V$$

$$m^+ = \frac{C_{prod}\rho_v\left(\alpha_l\right)^2\left(1-\alpha_l\right)}{t_\infty}V$$

A' basé sur l'équation de Rayleigh-Plesset

$$R\frac{d^2R}{dt^2} + \frac{3}{2}\left|\frac{dR}{dt}\right|^2 = \frac{P(R) - P\infty}{\rho_l} - \frac{2\sigma}{\rho_l R} - 4\frac{\mu}{\rho_l R}\frac{dR}{dt}$$

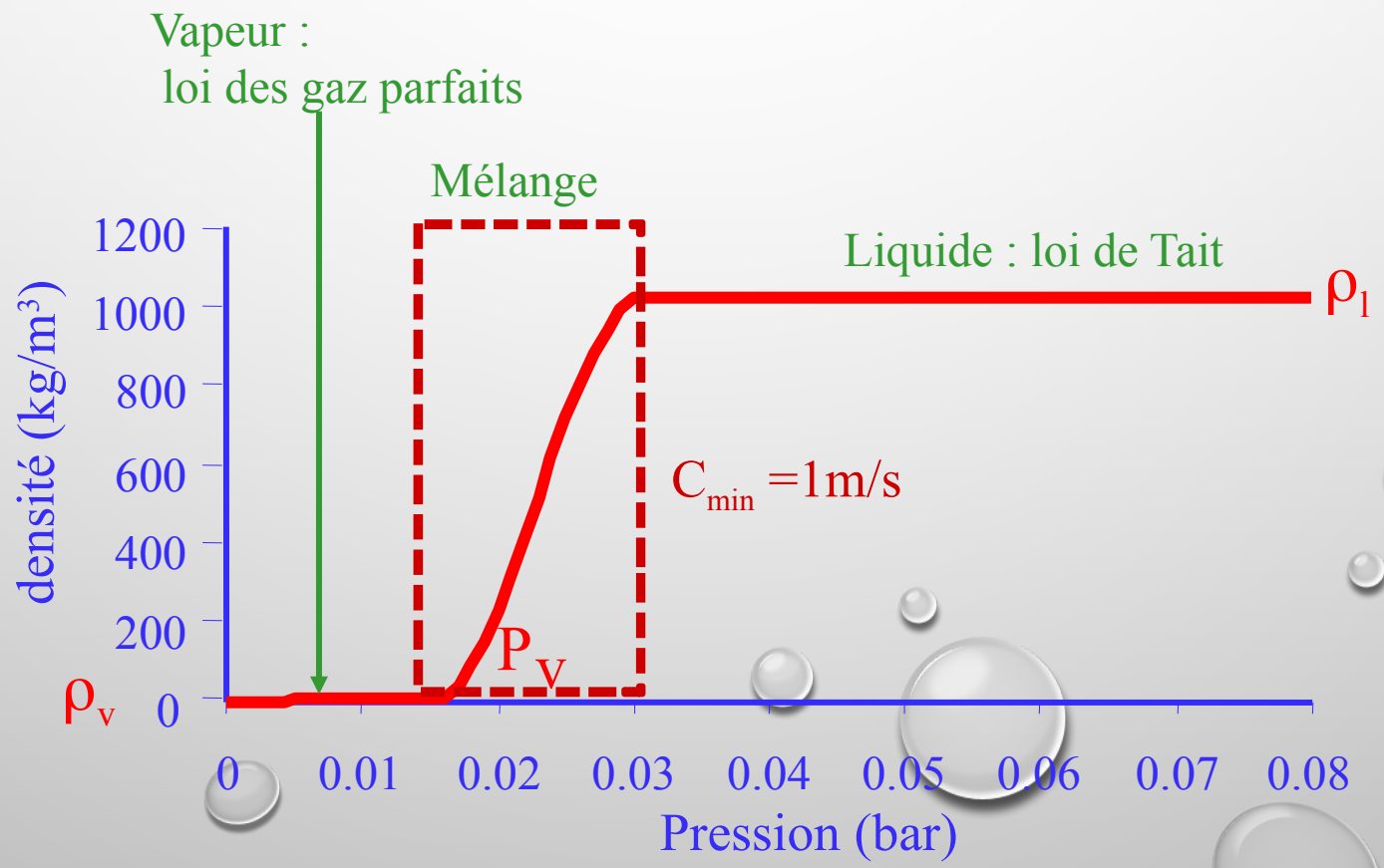
$$A' = \rho_v\left[\frac{n_0}{1 + n_0\frac{4}{3}\Pi R^3}\right]\left|\frac{d}{dt}\left(\frac{4}{3}\Pi R^3\right)\right|$$

Problème de validité à fort taux de vide (valable pour bulle sphérique isolée)

LES PROBLÉMATIQUES DE MODÉLISATION

SANS équation de production / transport de taux de vide

Loi d'état barotrope caractérisant le mélange



LES METHODES DE RESOLUTION DIRECTE

Ces méthodes permettent de résoudre toutes les échelles spatiales et temporelles de l'écoulement diphasique.

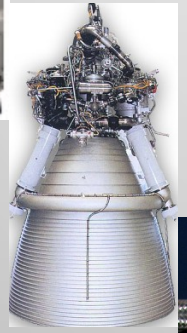
Tout en résolvant les équations de NS reconstruisent les interfaces et décrivent leur propagation

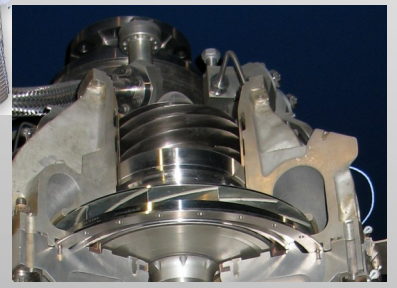
Différents moyens de représenter l'évolution spatio-temporelle d'une interface:

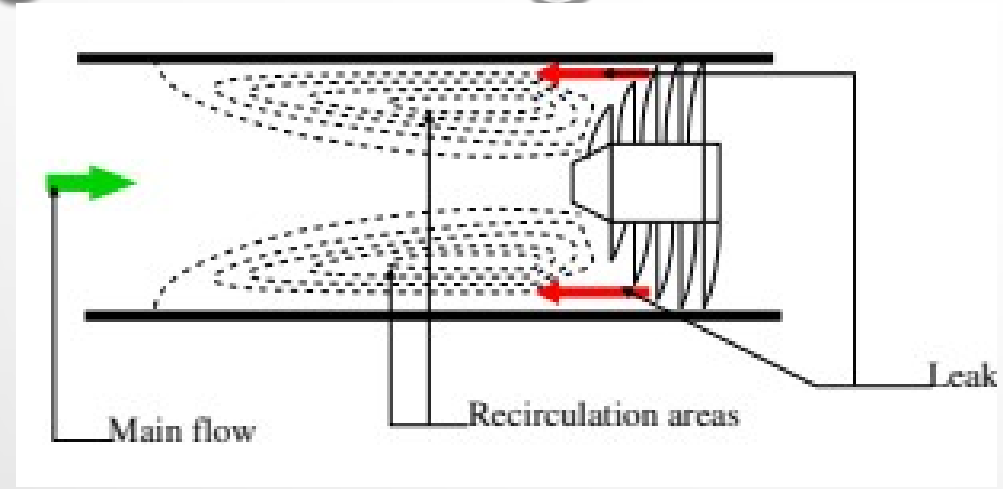
- Front Tracking (lagrangien)
- Level set (eulérien)
- Volume of Fluid (eulérien)
- Interfaces diffuses

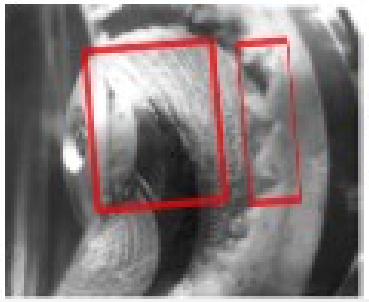
La marche descendante cavitante







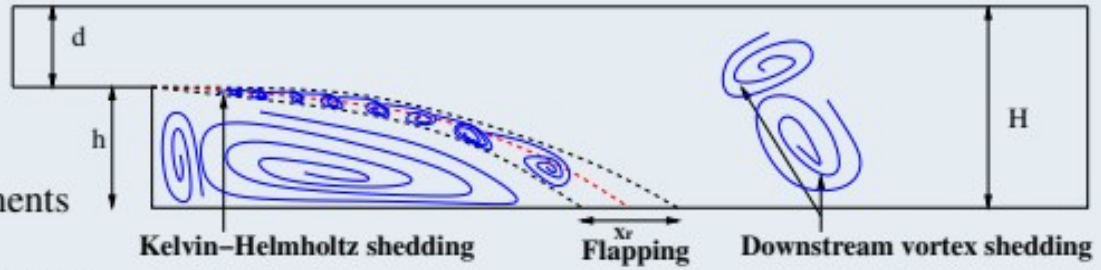




- Sheet cavitation on blades
- Shear layer instabilities
- Recirculating areas

Understand the phenomena to improve CFD predictions

- Model Validation
  - Turbulence
  - Phase Change
- Simple case measurements
  - Canonical flows
  - Backward facing step flow



CFD reference case



La marche descendante cavitante

- Nécessité de caractériser la dynamique tourbillonnaire par des mesures locales
- Mesures des vitesses des 2 phases et du taux de vide
- Caractérisation de la turbulence (résolution spatio-temporelle), énergie cinétique, anisotropie, fort cisaillement, gradient de pression intense …
- Transport de la phase vapeur

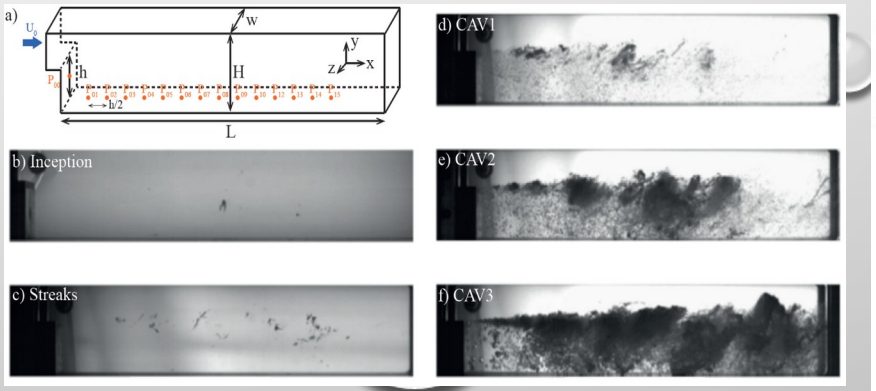
$U_\infty = 11.15\,m/s \Rightarrow Re_h \approx 5.10^5$ Fully turbulent flow



Confined geometry $ER = \frac{H}{d} = 1.4$ $AR = \frac{h}{w} = 0.64$

Controlled parameters
- Flowrate, Tank Pressure
- Water temperature (measured)

Geometrical parameters
- Step height (h=51.8 mm)
- Observable Length (L=400mm)
- Section width (w=80 mm)
- Section height (H=88.8 mm)



$\sigma_{ref} = \frac{P_{ref} - P_{vap}(T)}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2}$ based on total pressure

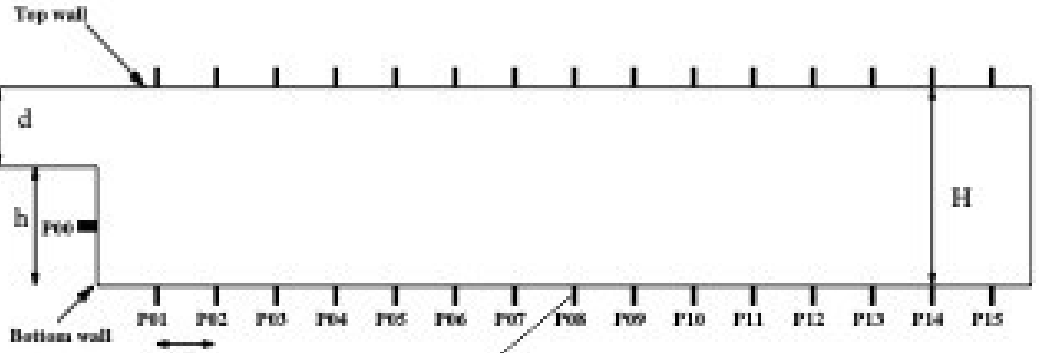
CAS	P_{ref} (Pa)	σ_{ref}
noncav	139720	2.2 ± 0.019
inception	107338	1.736 ± 0.015
Streaks	92612	1.489 ± 0.013
cav1	82622	1.325 ± 0.012
cav2	76819	1.232 ± 0.011
cav3	64227	1.107 ± 0.009

Experimental plan
- Pressure P
  - Piezo-resistive
  - Piezo-electric
- Velocity U
  - LIF-PIV 2D2C
  - rapid LIF-PIV 2D3C
- Density ρ or void ratio α
  - X-ray absorbtion

Dynamic and topology characterization

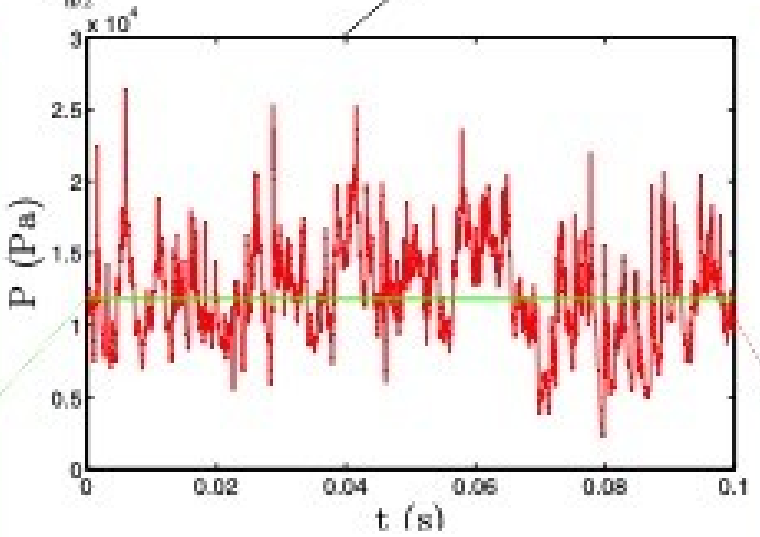
La marche descendante cavitante : l'instrumentation

Pression



Mean pressure

- Piezo-resistive sensors
- Successive acquisitions
- Hydrostatic table
- Sampling rate 2 kHz
- Sampling period 10s
- Accuracy 200Pa

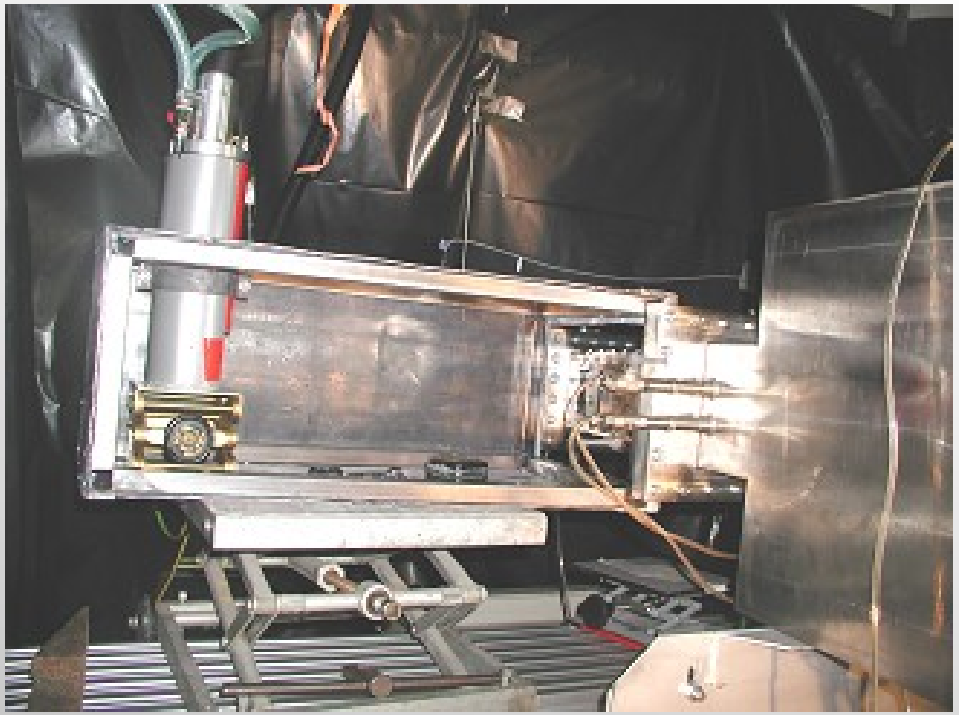


Fluctuating pressure

- 16 Piezo-electric sensors
- 15 ϕ 6 mm, 1 ϕ 10 mm
- Synchronized acquisitions
- Sampling rate 25600 Hz
- Sampling period 10s $\Longrightarrow$ 5 min
- Accuracy 15 at 7Pa, 1 at 0.7Pa

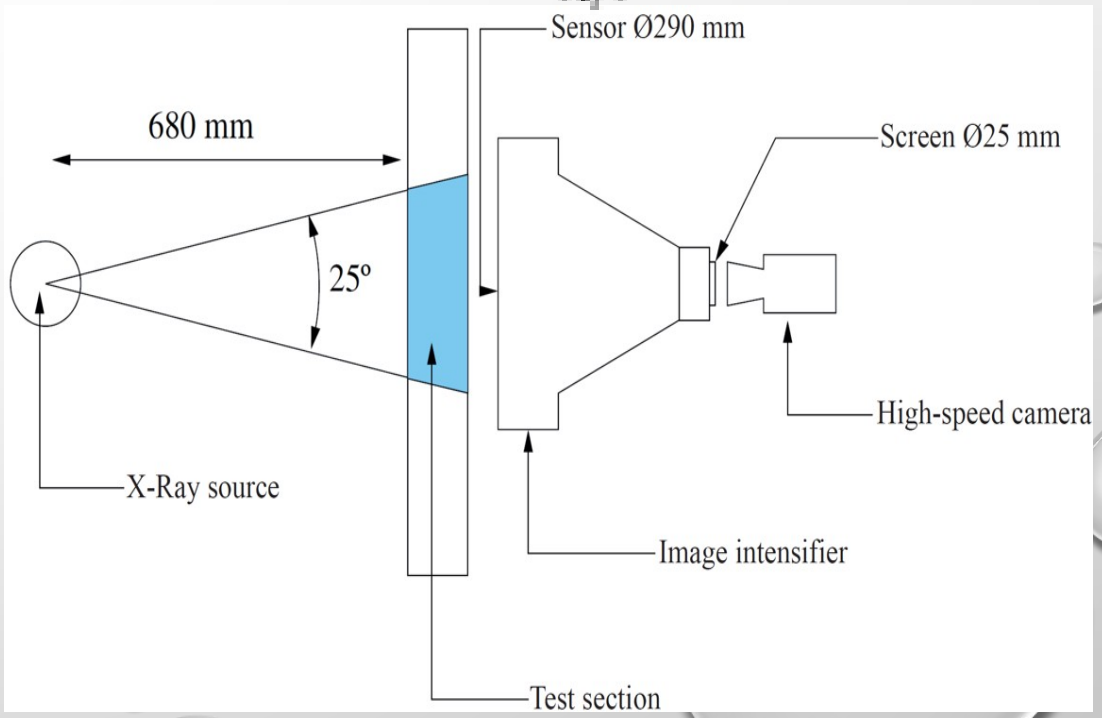
La marche descendante cavitante : l'instrumentation

Phase vapeur : RX



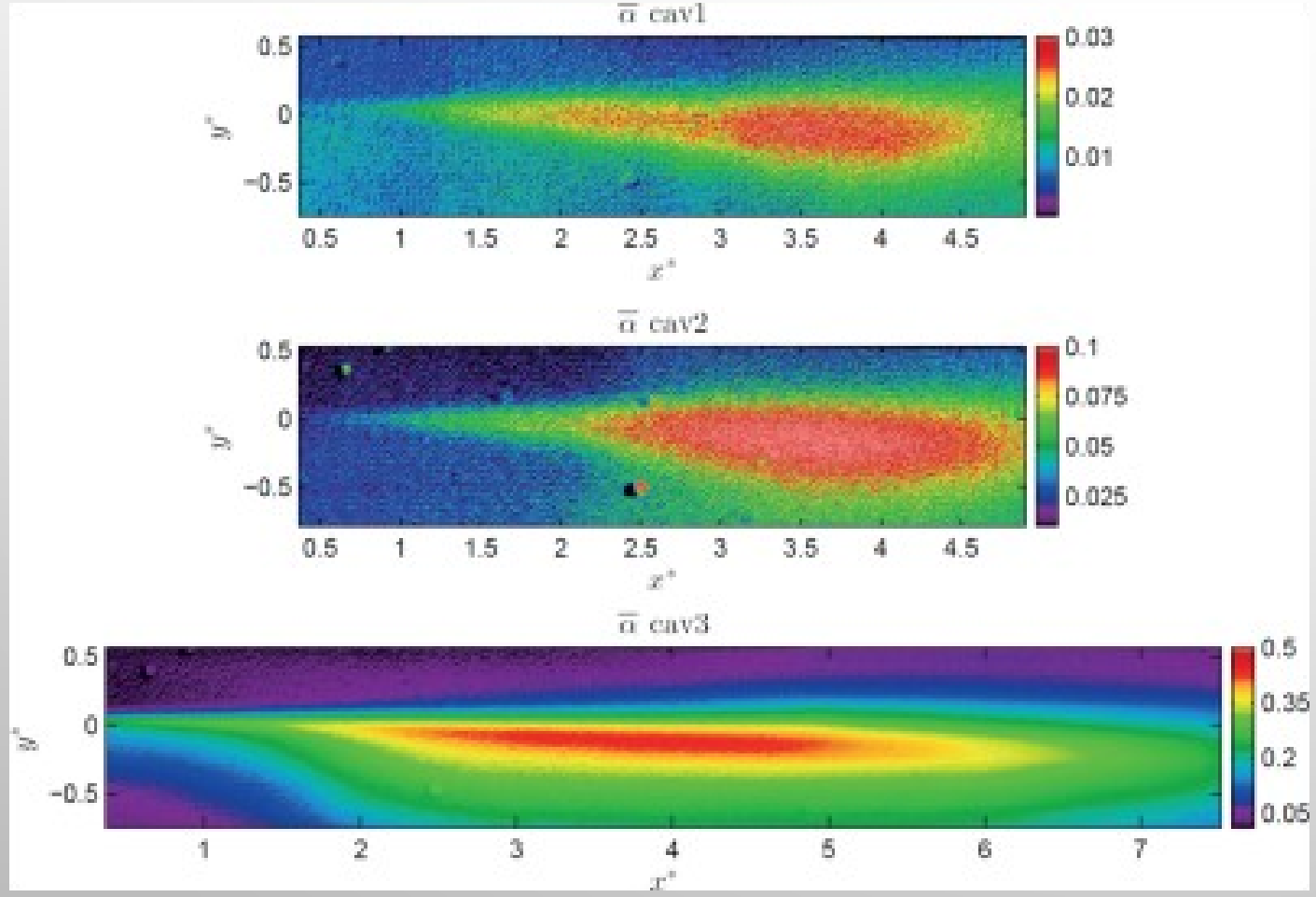
$$I(t) = I_0 \exp\left(-\mu_0 \rho x(t)\right).$$

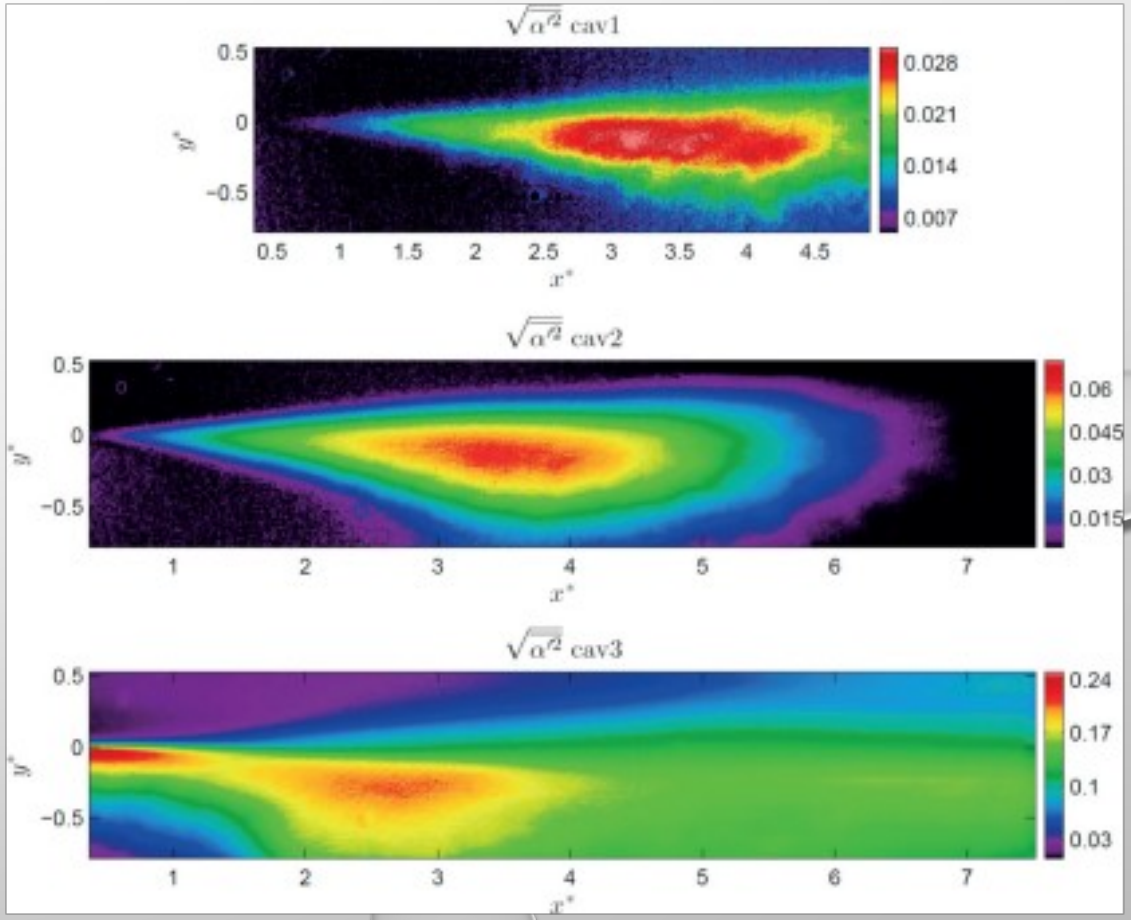
$$\rho = \rho_l - \frac{ln\left(\frac{I}{I_l}\right)}{ln\left(\frac{I_0}{I_l}\right)}(\rho_l - \rho_a),$$



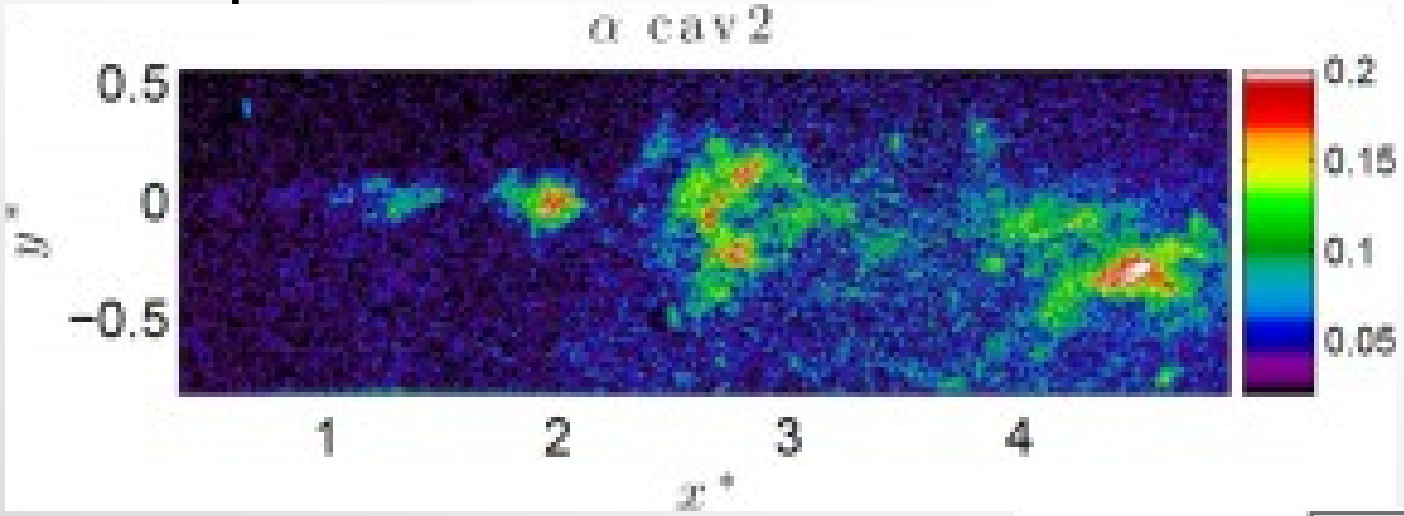
$$\alpha = \frac{\rho_l - \rho}{\rho_l - \rho_v}.$$

La marche descendante cavitante : dynamique de la phase vapeur

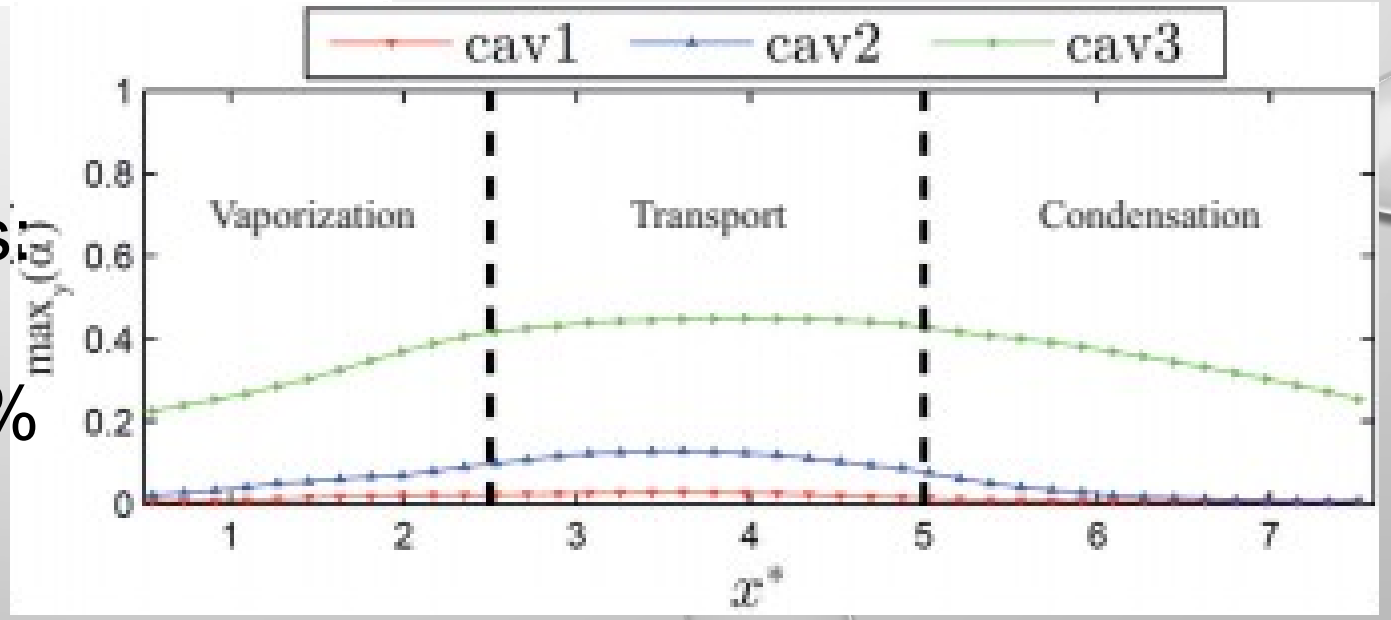




La marche descendante cavitante : dynamique de la phase vapeur

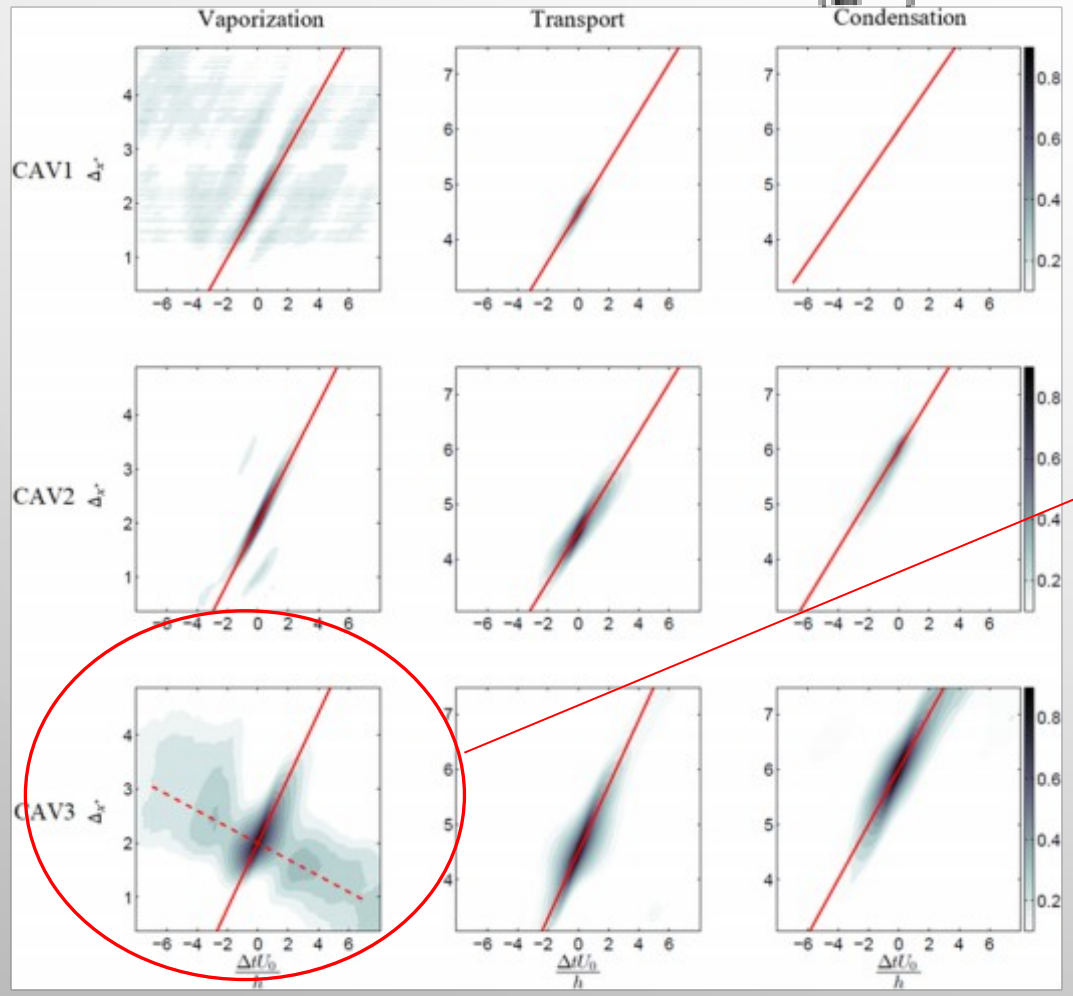


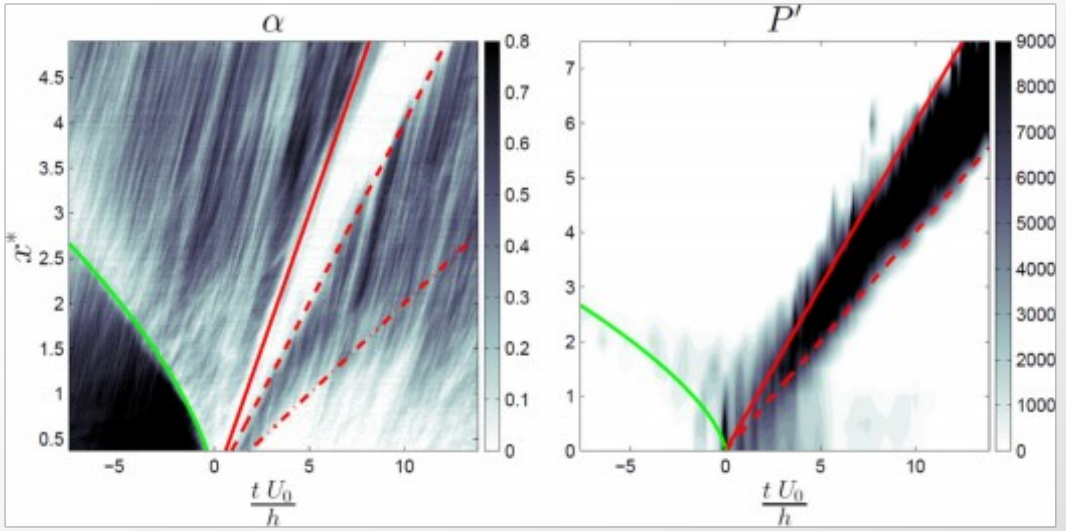
Topologie en 3 zones spécifiques:
Création, transport et destruction
Taux de vide moyen de 1% à 50%

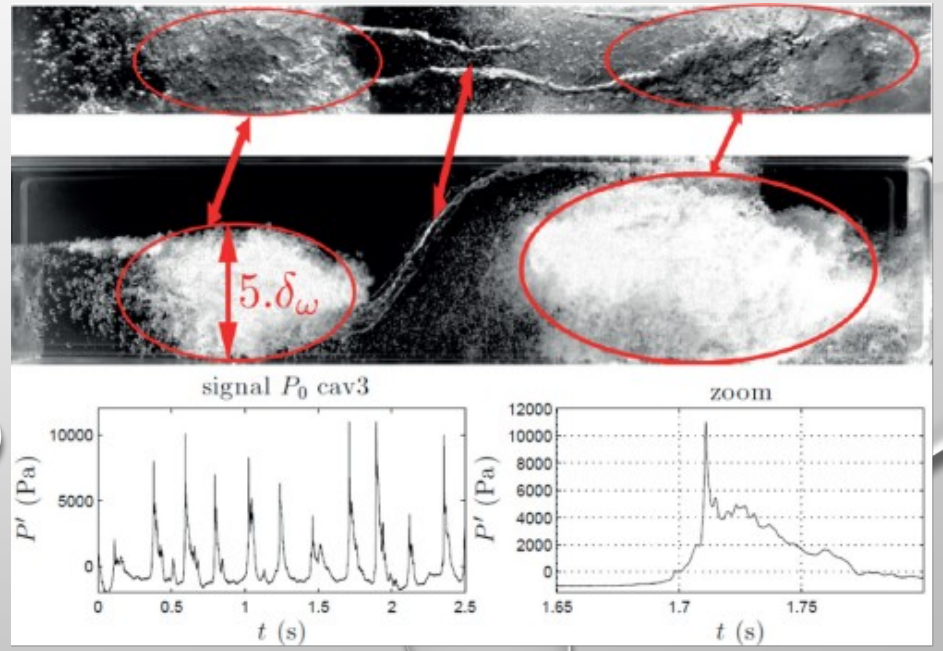


La marche descendante cavitante : dynamique de la phase vapeur

$$R_\alpha(\Delta_x, \Delta_t) = \frac{\langle \alpha'(x, y, t)\alpha'(x + \Delta_x, y, t + \Delta_t)\rangle}{\langle \alpha'^2 \rangle}.$$







EXEMPLE D'ÉTUDE

La marche descendante cavitante : dynamique de la phase vapeur



La marche descendante cavitante : les résultats majeurs

- Existence d'un évènement extrême dû au taux de présence de la phase vapeur
- Saturation des cœurs de vortex responsable de la dislocation intermittente des vortex
- Modification du mode d'instabilité de l'écoulement : couche cisaillée vs mode sillage

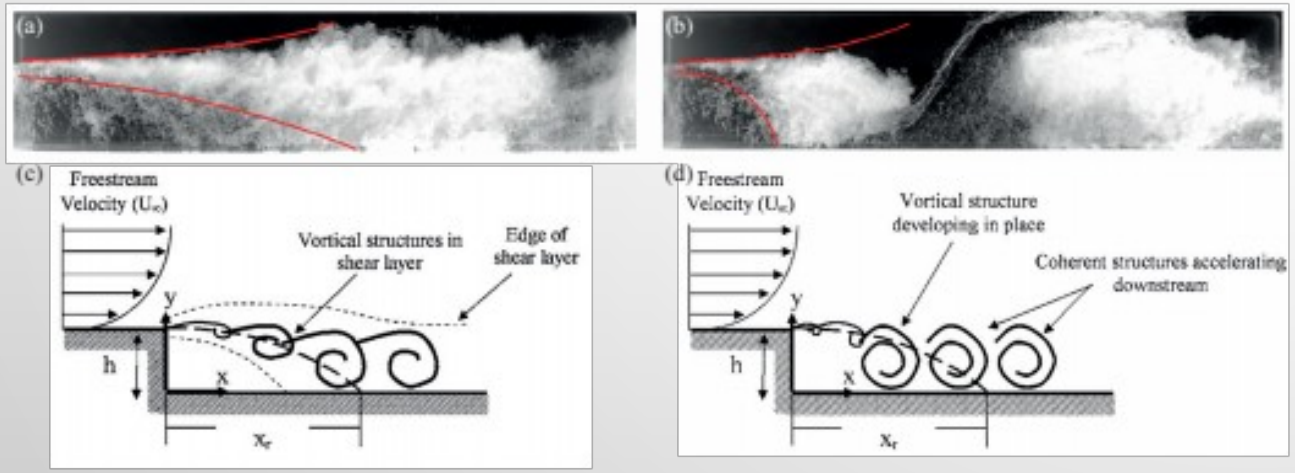
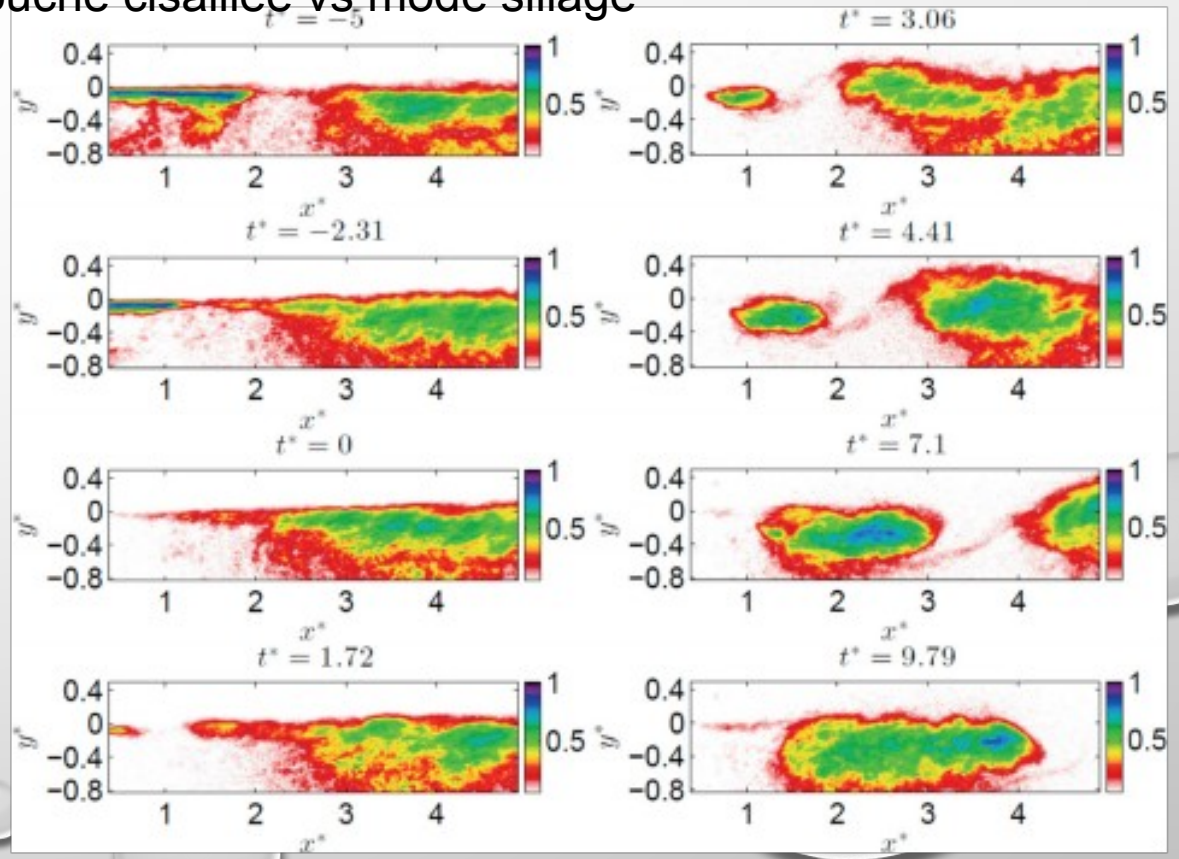
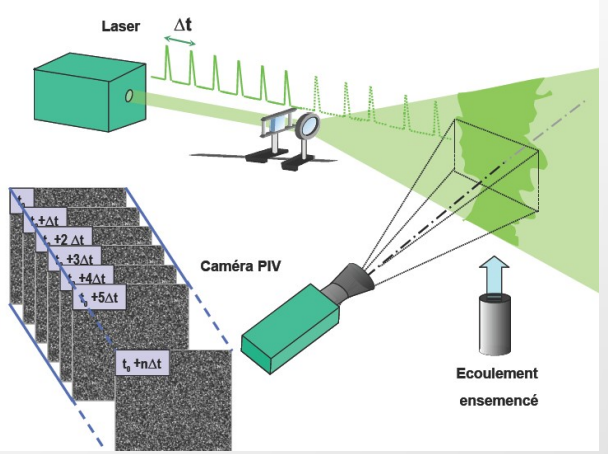


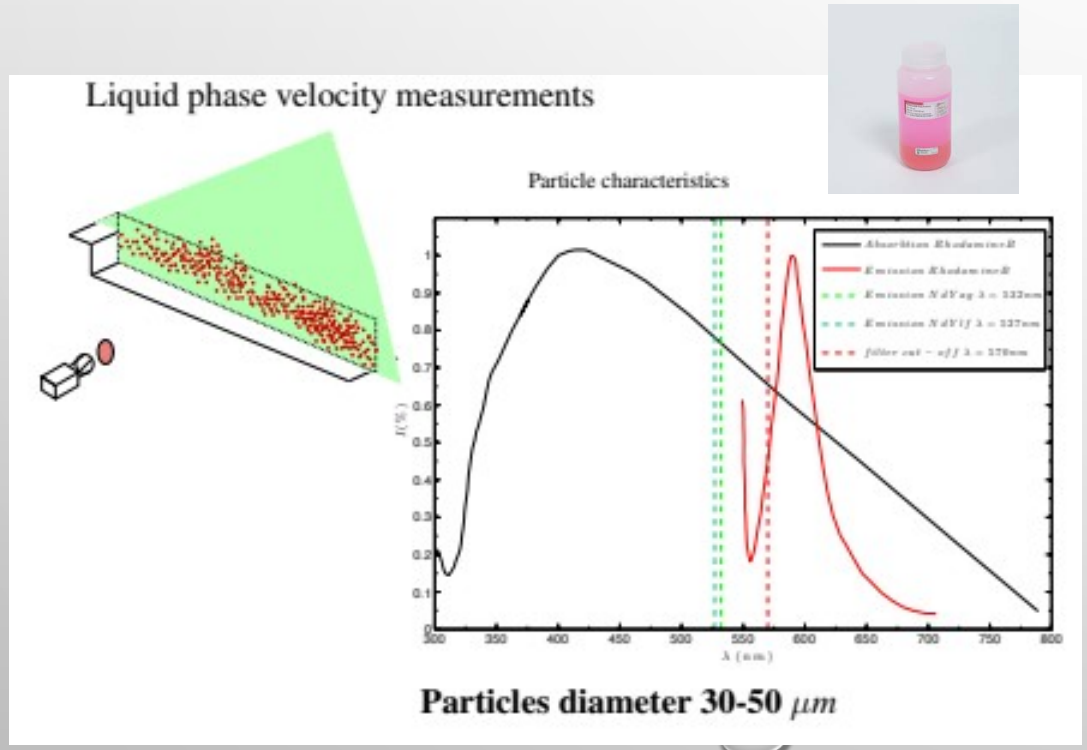
FIG. 12. (a), (b) Two instantaneous snapshots of the CAV3 case showing a shear layer (a) and wake mode (b). The red lines delaminate the shear layer expansion. (c), (d) Respective sketches from Hudy *et al.* 2007.

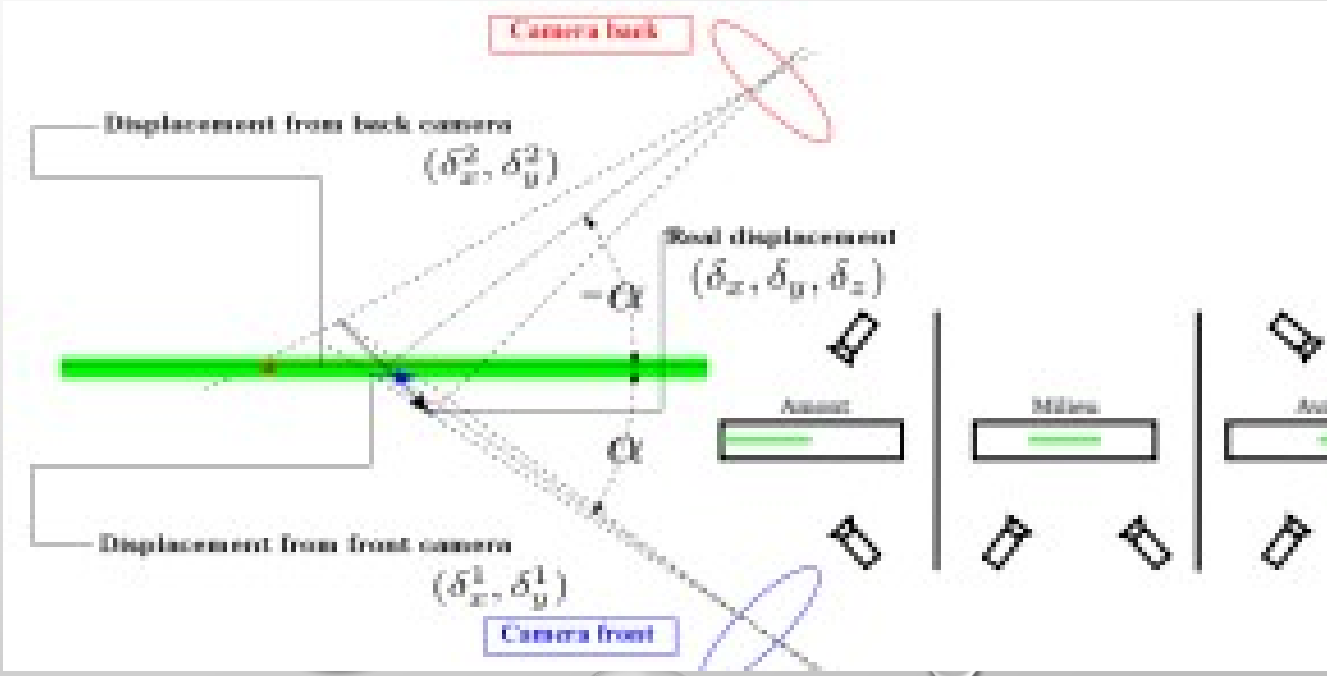


La marche descendante cavitante : l'instrumentation

Phase liquide champ de vitesse : SPIV-LIF-RT



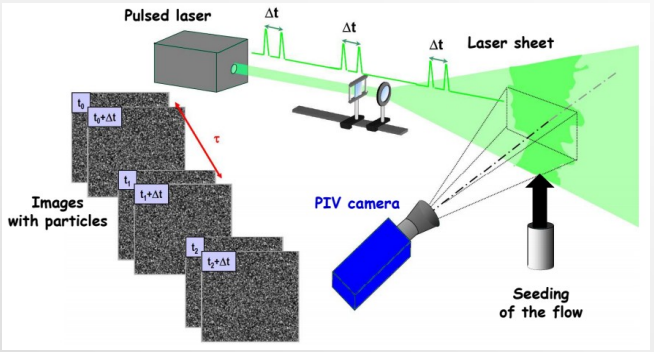


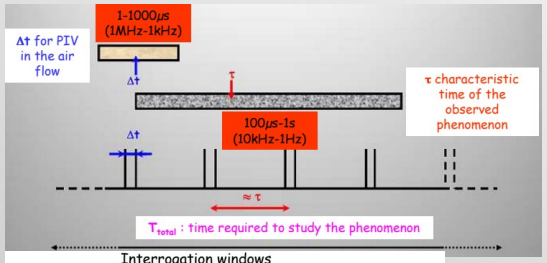


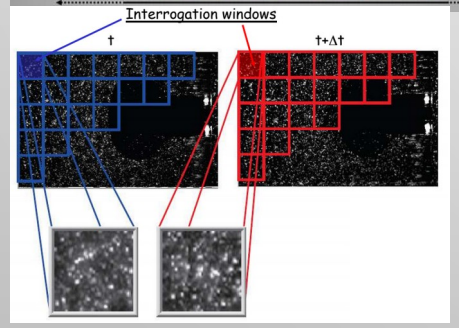
LE PRINCIPE DE LA MESURE OPTIQUE DE LA PHASE LIQUIDE

PIV 2D/2C

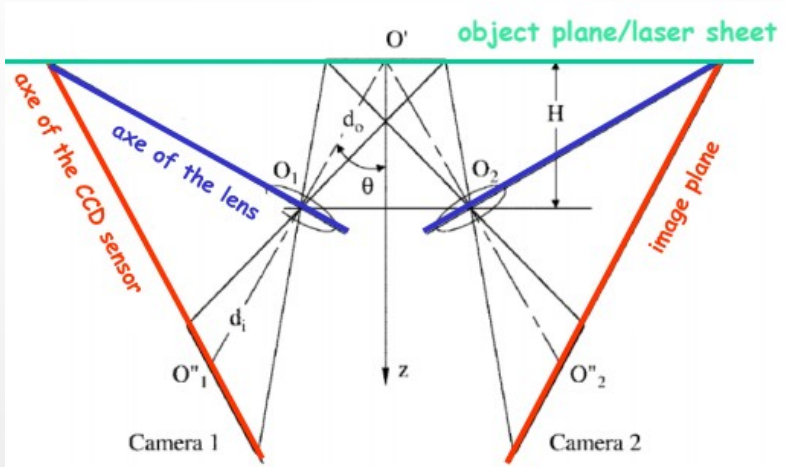
Résolu en temps

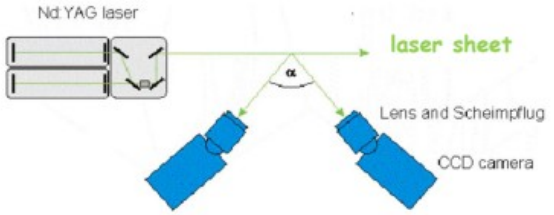






Stereo PIV 2D/3C

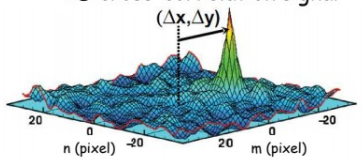




$$R(m,n) = \frac{\sum_{i=-N}^{i=N}\sum_{j=-M}^{j=M}[I(i,j)-\bar{I}][J(i-m,j-n)-\bar{J}]}{\sqrt{\sigma_I^2\sigma_J^2}}$$

I,J : intensity on the 1st image, the 2nd image
$\bar{I},\bar{J}$: mean intensity on the 1st image, the 2nd image
σ_I,σ_J : standard deviation of intensity on the 1st image, the 2nd image
M,N : number of pixels in the interrogation window in the x-direction, the y-direction
(m,n) : coordinates in pixels in the interrogation window

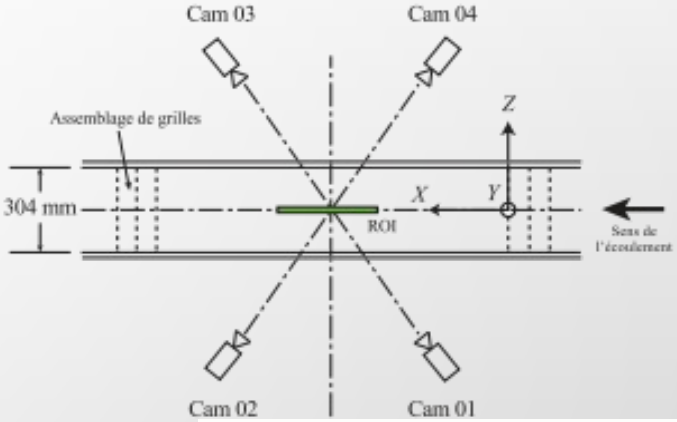
2D cross-correlation signal

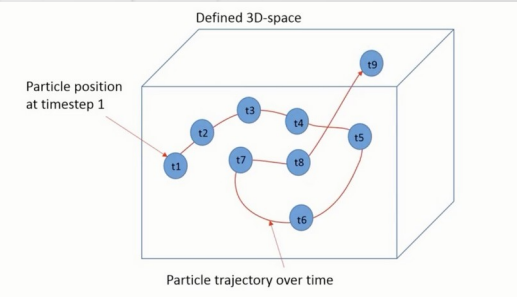


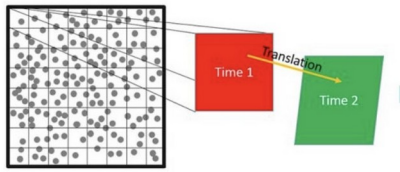
(Δx,Δy) : displacement of tracers contained in the interrogation window

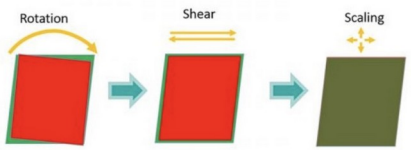
-> one possible displacement

Tomo PIV 4D/3C







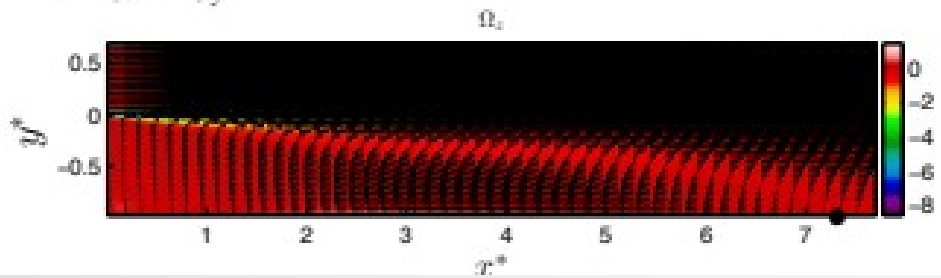


2D example of different flow motions analyzed with Least Squares Matching

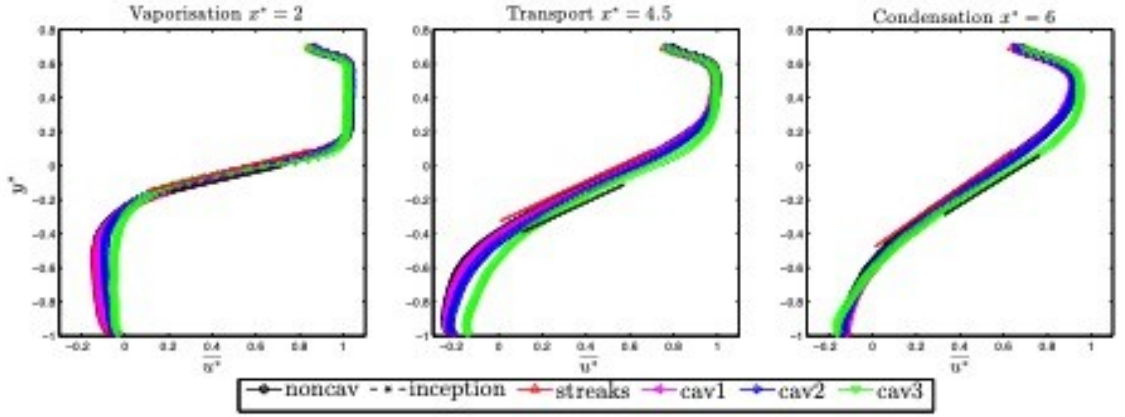
La marche descendante cavitante : dynamique de la phase liquide

- Topologie de la couche cisaillée indépendante du taux de vide
- Modification de l'épaisseur de vorticité

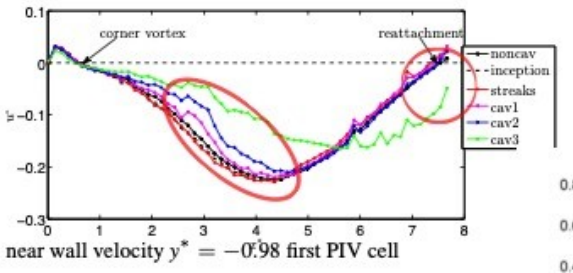
Vorticity noncav $\Omega_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$



Longitudinal velocity profile

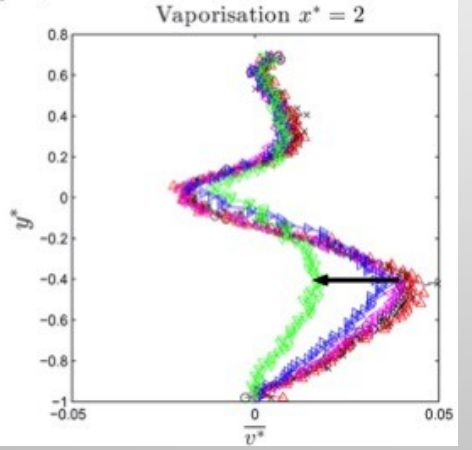


No strong evolution until Cav3



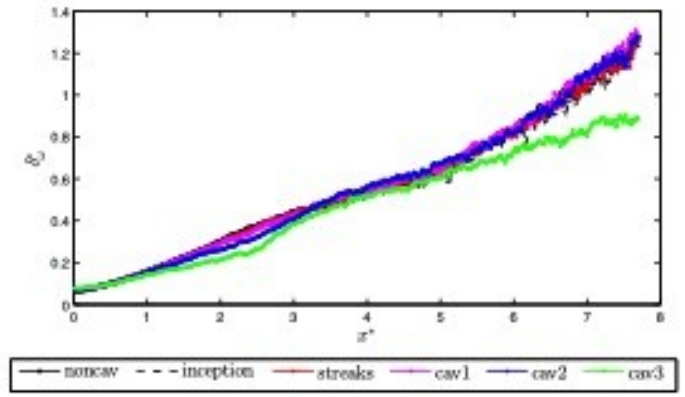
near wall velocity $y^* = -0.98$ first PIV cell

- No reattachment for CAV3
- Further recompression



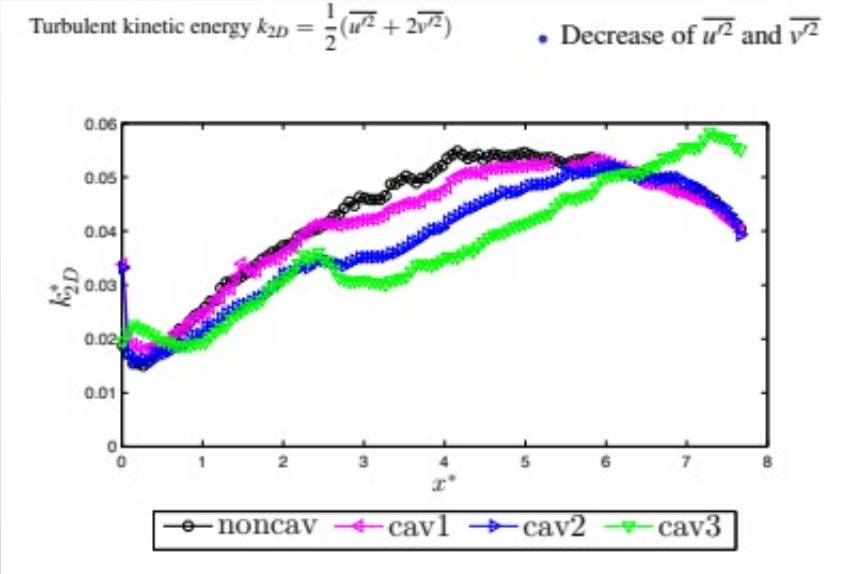
- Weaker backflow
- Shear layer density ↘
- Weaker resurgence velocity

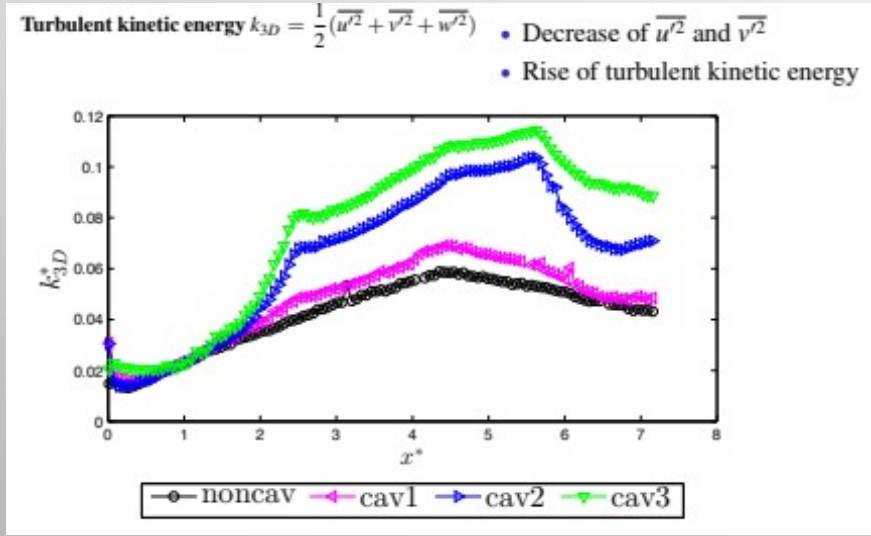
- Weak evolution of velocity gradient
  - cav2 vaporisation +10%
- More significant for cav3
  - cav3 vaporisation +30%
  - cav3 condensation +50%
- Vorticity thickness $\delta_\omega = \frac{U_0}{\frac{\partial U}{\partial y}|_{max}}$

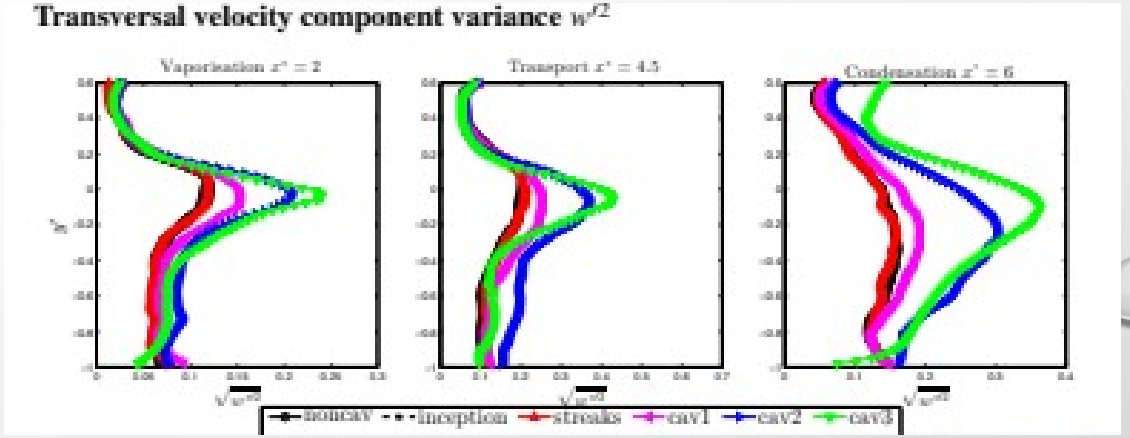


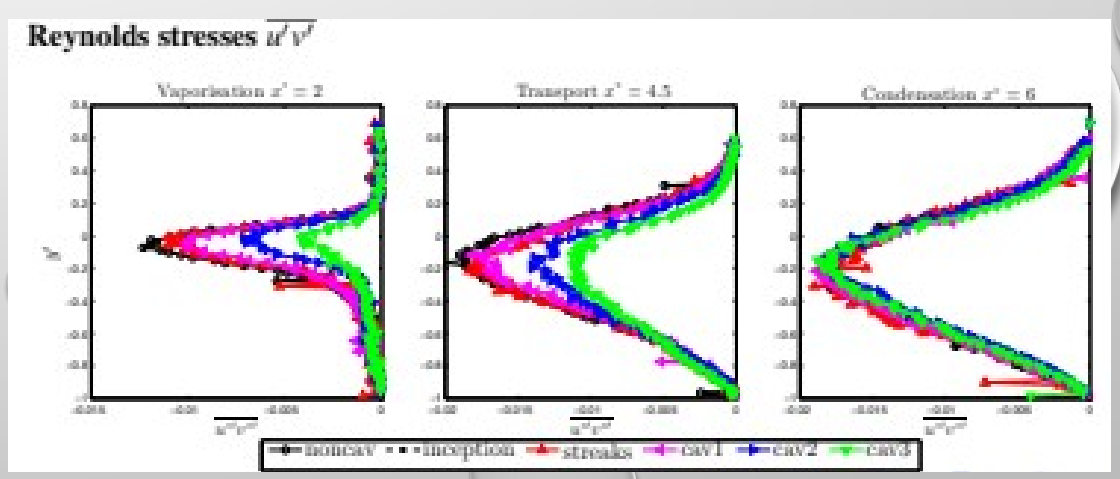
La marche descendante cavitante : la turbulence

- Les effets 3D de la cavitation
- Les effets de l'évènement extrême sur la turbulence à petite échelle









La marche descendante cavitante : quid de la validation des modèles

- Les modèles de viscosité turbulente ….
- Non universalité et correction des modèles

Hypothesis

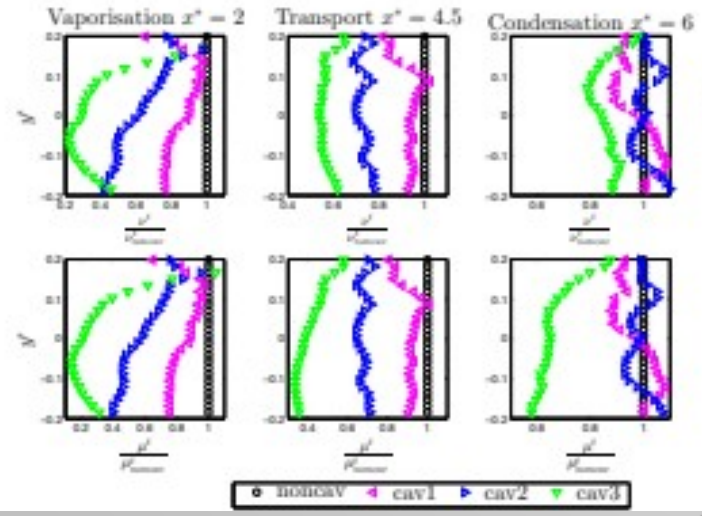
Liquid velocity fluctuations ≡ Mixture velocity fluctuations

Linear eddy viscosity model

$$-\rho\overline{u_i'u_j'} = \mu^t\left(\frac{\partial\overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial\overline{u_j}}{\partial x_i} - \frac{1}{3}\frac{\partial\overline{u_k}}{\partial x_k}\delta_{ij}\right) + \frac{2}{3}k\delta_{ij}$$

For principal shear direction $\Rightarrow -\rho\overline{u'v'} = \mu^t\left(\frac{\partial\overline{u}}{\partial y} + \frac{\partial\overline{v}}{\partial x}\right)$

$$\nu^t = \frac{-\overline{u'v'}}{\left(\frac{\partial\overline{u}}{\partial y} + \frac{\partial\overline{v}}{\partial x}\right)}, \nu^t = \frac{\mu^t}{\rho}$$



decrease of ν^t and μ^t

- Vaporisation and Transport ⇒ deficit of $\overline{u'v'}$
- Condensation ⇒ gradient rise for cav3

$k - k\ell$ Rotta 2D shear flow

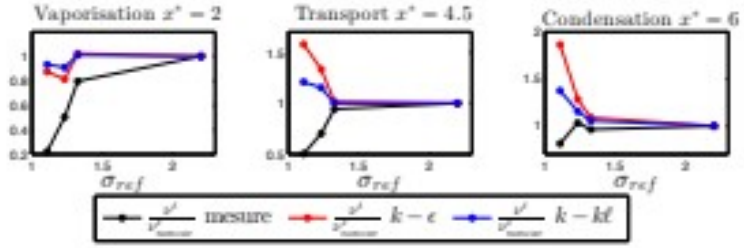
$$\nu^t = C_\mu^{1/4}\sqrt{k}\ell$$

$k - \epsilon$ widely used in industry

$$\nu^t = C_\mu\frac{k^2}{\epsilon}$$

$C\mu = 0.085$, ℓ Rotta turbulence scale, $\epsilon = 15\nu\frac{k^{\frac{3}{2}}}{\lambda^2}$ (λ Taylor micro scale)

hypothesis : Taylor micro scale is proportional to Rotta turbulence scale $\lambda \propto \ell$



Formalism Problem

μ^t Corrector

$f(\alpha) = \rho_v + (1-\alpha)^n(\rho_l - \rho_v)$, $n = 10$ *Reboud et al 1998*

Validation : Venturi 8°cloud shedding frequency

- Not universal
- Cannot be used as prediction tool

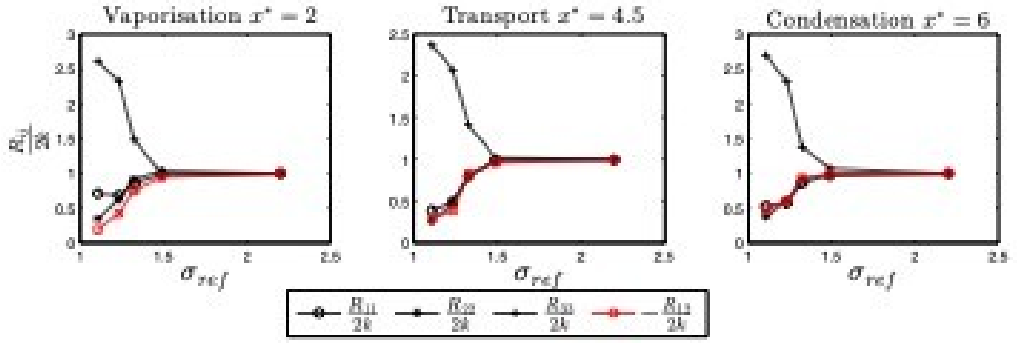
Cav3 example

Position	α	$\frac{\mu^t}{\mu^t_{noncav}}$ expe	$f(\alpha)\frac{\mu^t}{\mu^t_{noncav}}$ $k-\epsilon$
Vaporisation	45%	0.14	0.011
Transport	34%	0.33	0.024
Condensation	30%	0.57	0.06

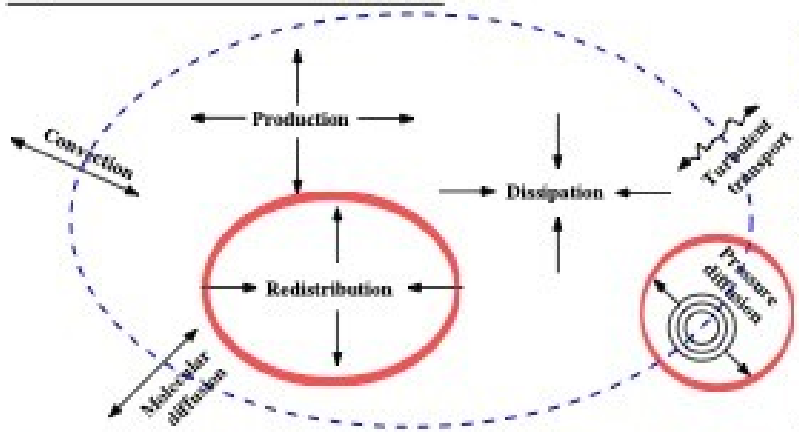
La marche descendante cavitante : quid de la validation des modèles

- Anisotropie et scénario de redistribution des tensions de Reynolds

Linear eddy viscosity ⇒ fixed anisotropy First order modelization can't work



Reynolds stress modelization



- Pressure velocity correlation
- Complex modeling
- Impossible measurements
- Necessity to develop LES formalism
  - simpler modelization

R. Manceau

$$\frac{1}{\rho}\overline{P\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)} \qquad \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_k}\left(\overline{u_i P}\delta_{jk}+\overline{u_j P}\delta_{ik}\right)$$

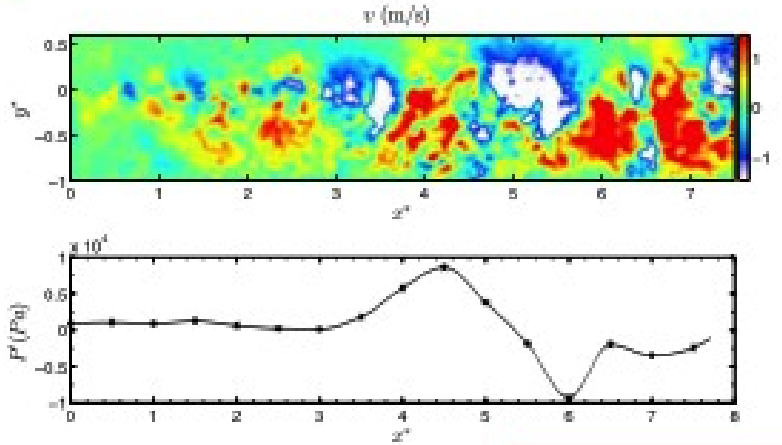
La marche descendante cavitante : quid de la validation des modèles

- Stratégie du transport de taux de vide

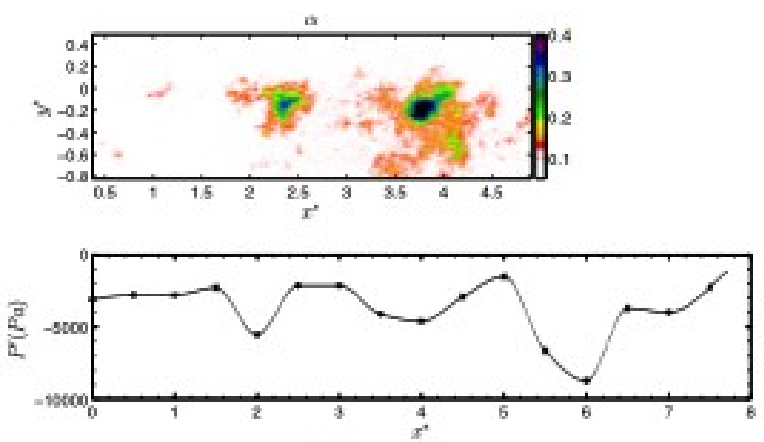
$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha}{\partial x_i} = (1-\alpha)\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \dot{M}$$ *Saurel 2008, Goncalves 2013*

Simultaneous velocity and void ratio measurements

Simultaneous velocity and pressure measurements



Simultaneous void-ratio and pressure measurements



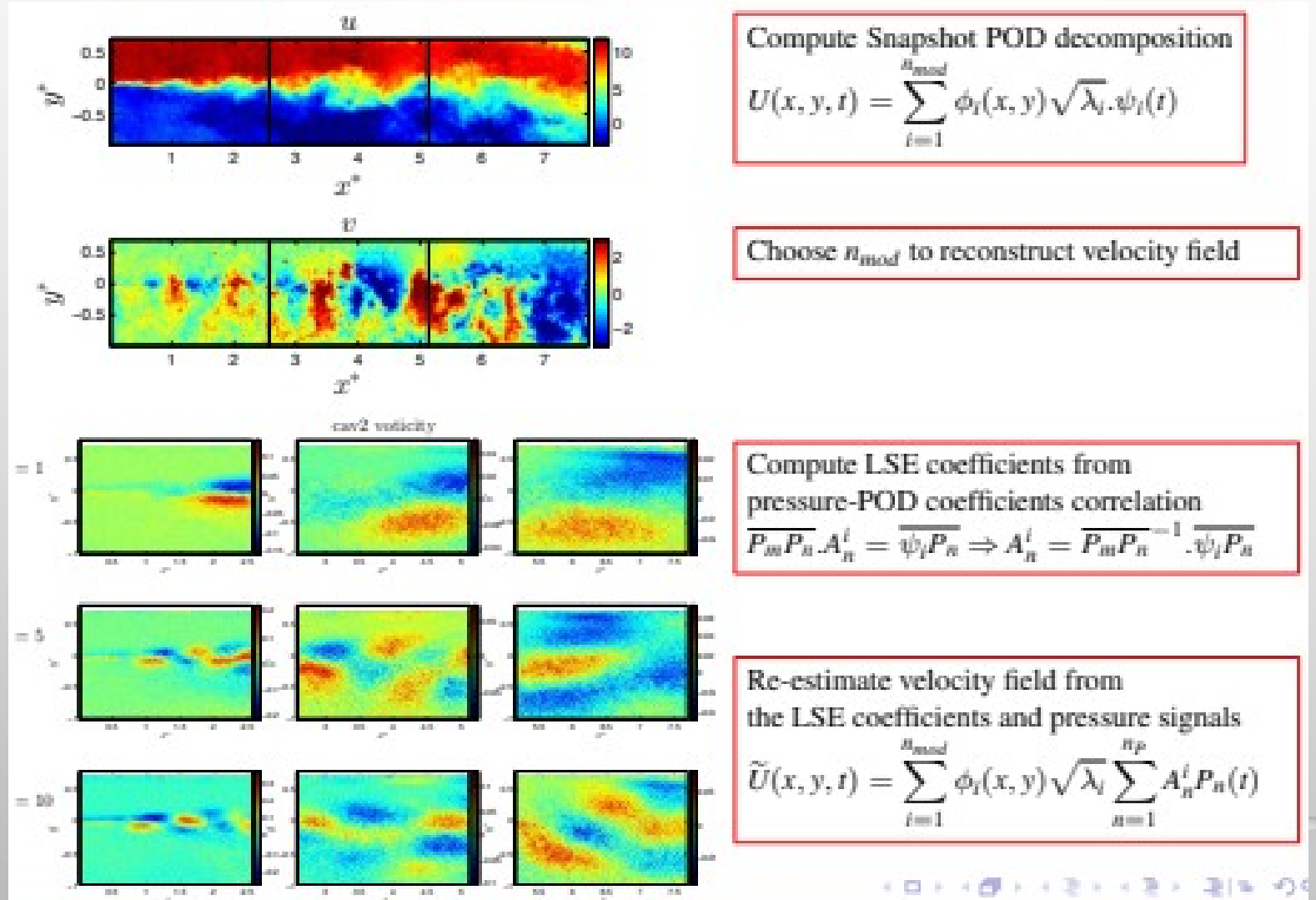
Stochastic estimation from pressure signals

$$\widetilde{U}(x,y,t) = \sum_{n}^{n_p} A_n(x,y) * P_n(t)$$

Method POD-LSE *Bonnet et al 1994, Piponniau et al 2013*

La marche descendante cavitante : quid de la validation des modèles

- Stratégie du transport de taux de vide

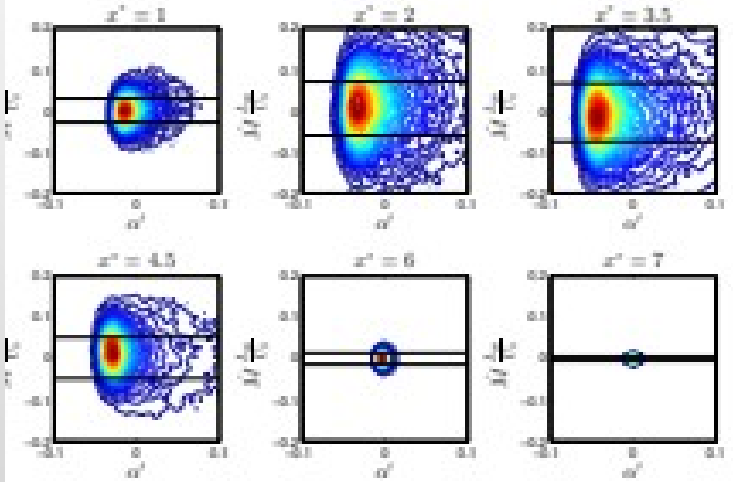


La marche descendante cavitante : quid de la validation des modèles

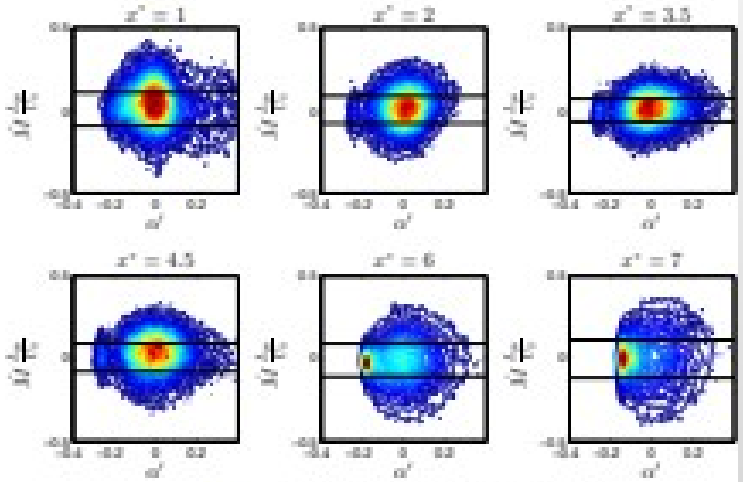
- Estimation des termes sources …..

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + < u_i | P > \frac{\partial \alpha}{\partial x_i} = (1-\alpha)\frac{\partial < u_i | P >}{\partial x_i} + \dot{M} \Rightarrow < \dot{M} | P >$$

Cav2 joint PDF $\alpha' < \dot{M}|P > y : k_{|max}$

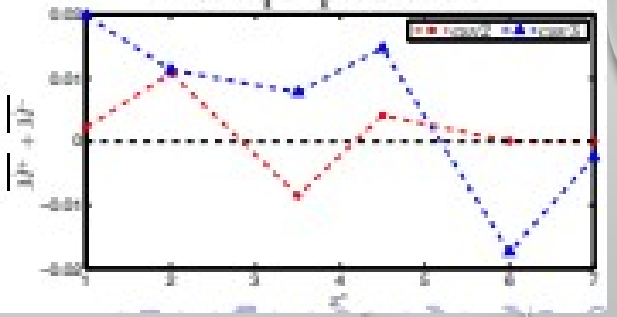


Cav3 joint PDF $\alpha' < \dot{M}|P > y : k_{|max}$



- More complex contribution of α to $< \dot{M}|P >$
- Vapor is created in small scale structures
- Need to be compared to numerical simulations

Net vapor production



La marche descendante cavitante : conclusion

Résultats :

- Le changement de phase n'affecte pas la topologie moyenne
- Modification de la dynamique (diminution de la fréquence de lâcher des vortex et de l'échelle intégrale)
- Champ fluctuant modifié et transition vers une autre instabilité de type sillage
- Augmentation de l'énergie cinétique turbulente sans augmentation de gradient !
- Abandon nécessaire du modèle de viscosité turbulente
- Modèle barotrope non valide (cf mesures de pression)
- Transport de taux de vide (estimation d taux de vide sur une base temporelle de vitesse (source d'erreurs)

Perspectives :

- Mesures 3D résolue en temps de la phase vapeur (tomography RX rapide)
- Étendre les expériences vers d'autres écoulements canoniques
- Utilisation de la database pour le benchmark
- Quid de l'application aux fluides thermosensibles (transposition)

G. MAURICE et al. 27th IAHR symposium on Hydraulic machinery and systems, September 22-26 2014, Montréal Canada.

G. MAURICE et al. International Congress of Multiphase Flow, ICMF2016, 22-27 May, Florence, Italy.

G. MAURICE et al. Phys. Rev. Fluids 6, 044311 – Published 27 April 2021, V. AESCHLIMANN et al. Journal of Physics of Fluids, vol 23, Issue 5, May 2011.

Cavitation sur profil NACA0015 en mode pitching

CAVITATION EROSION AND UNSTEADINESS

Naval International Cooperative Opportunities in Science and Technology Program (NICOP)

CAVERUNS PROJECT

Supported by ONR

LEGI
LABORATOIRE DES ECOULEMENTS GEOPHYSIQUES ET INDUSTRIELS

SIMaP

Office of Naval Research
ONR
Science & Technology

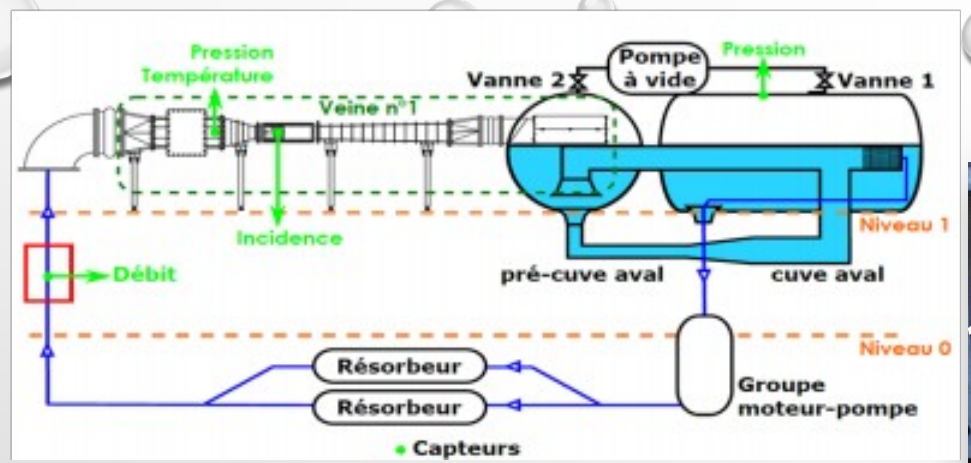
THE UNIVERSITY OF MICHIGAN
ARTES · SCIENTIA · VERITAS
1817

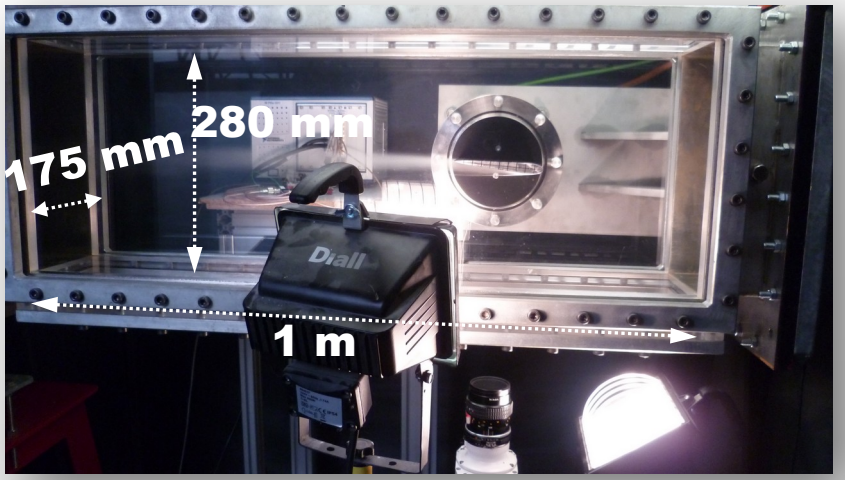
Cavitation sur profil NACA0015 en mode pitching

- Etude du lien entre l'érosion de cavitation et les instabilités hydrodynamiques
- Identification des situations les plus agressives en mode oscillant d'un profil
- Quantifier cette agressivité en fonction de la stabilité de la phase vapeur attaché (Ganesh et al. 2016)
- 4 modes d'investigation :
  - Visualisations par cameras rapides
  - Dynamique du champ de Vitesse SPIV-LIF-RT
  - Mesures de l'impact du chargement d'implosion de bulles par PVDF (polyvinylidene fluoride, capteurs piezoelectriques)
  - Tests de pitting (machine AFM) sur échantillons métalliques

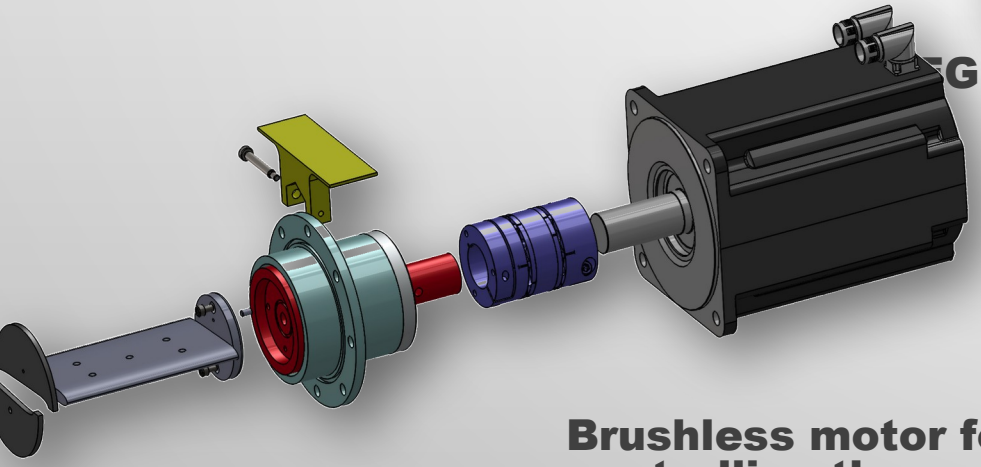
EXEMPLE D'ÉTUDE

Cavitation sur profil NACA0015 en mode pitching

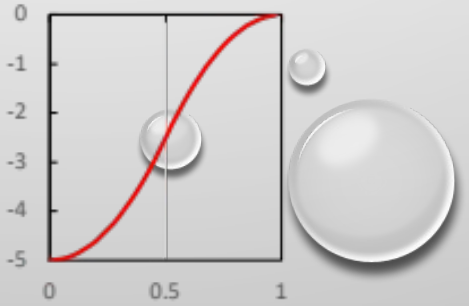




GI hydrodynamic tunnel (750 l/s – 165



Brushless motor for controlling the instantaneous angle of attack (any law α(t) can be



(c) Angle of attack α



Plano-convex hydrofoil for easy mounting of pressure sensors and erosion samples

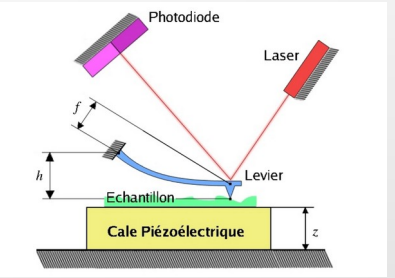
Cavitation sur profil NACA0015 en mode pitching

AFM > Microscope à force atomique : observations quantitatives des empreintes résiduelles d'indentation

Visualisations rapides

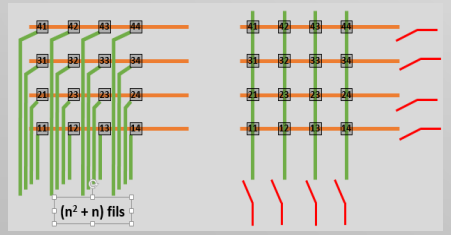
Mesures de pression dynamique (array of PVDF sensors)

Tests de pitting sur matériel calibré

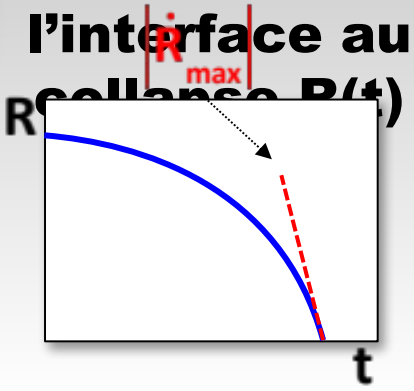


Accès à l'agressivité de cavitation



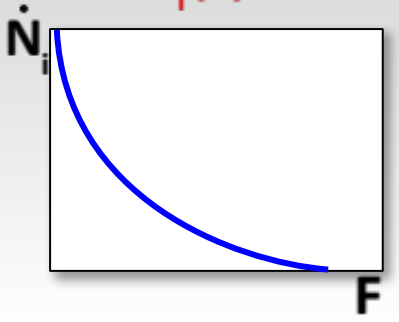


Taille des bulles et vitesse de l'interface au collapse R(t)



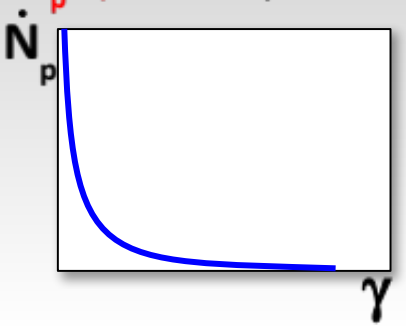
Histogramme cumulés de chargement

$\dot{N}_i(F)$



Histogrammes cumulés de la forma des pit

$\dot{N}_p(\gamma)$ with $\gamma = h/D$



Cavitation sur profil NACA0015 en mode pitching

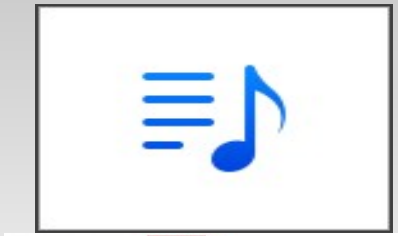
STEREO-TR-PIV 2D/3C

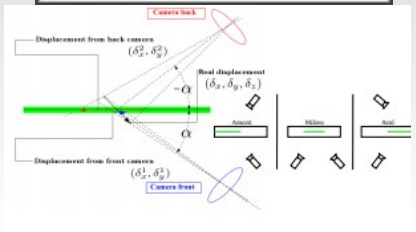
S-TR-PIV-LIF

Mesures de pression

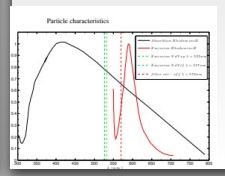
Accès aux instabilités hydrodynamiques

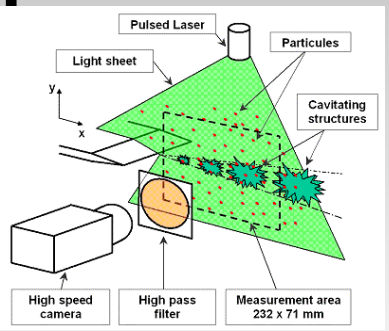
Champ de vitesse



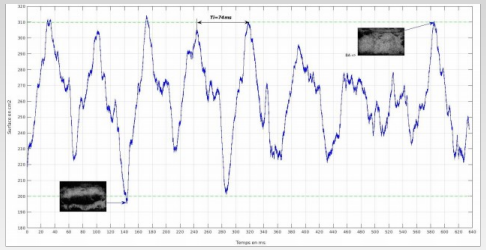


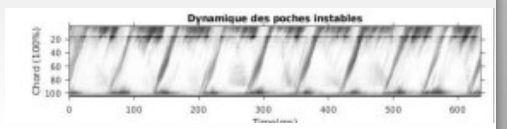
Discrimination de phase





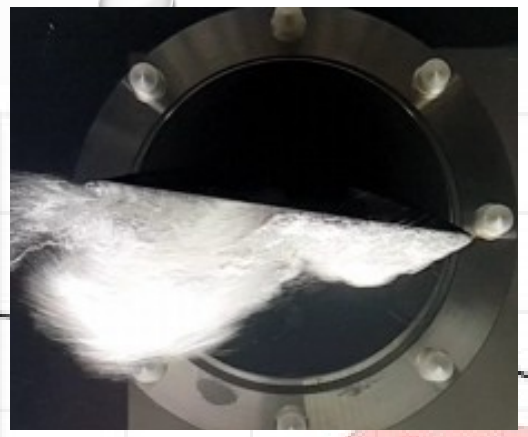
Corrélation pression/vitesse

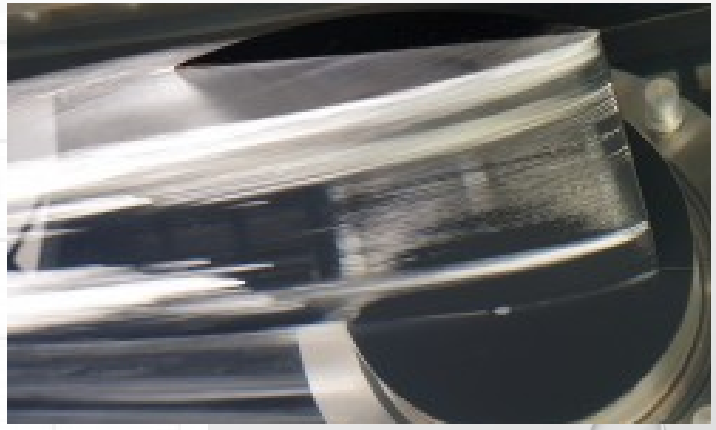


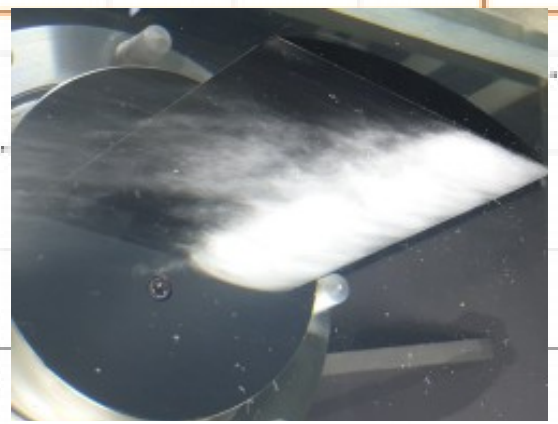


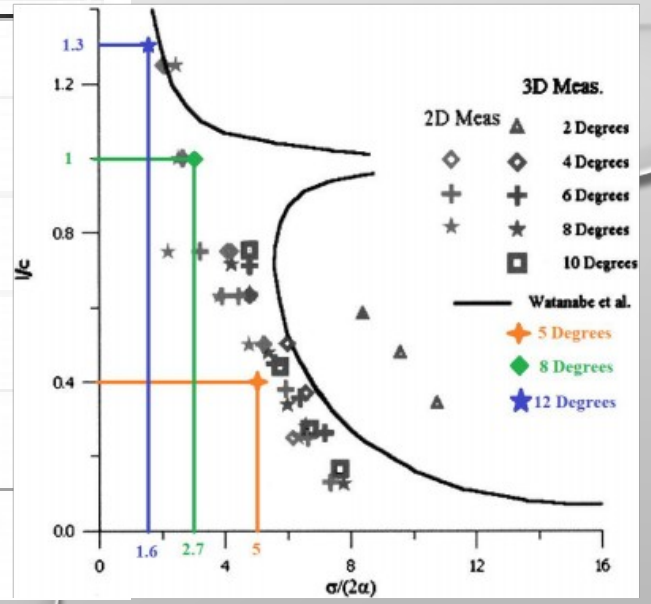
EXEMPLE D'ÉTUDE

Cavitation sur profil NACA0015 en mode « pitching »









EXEMPLE D'ÉTUDE

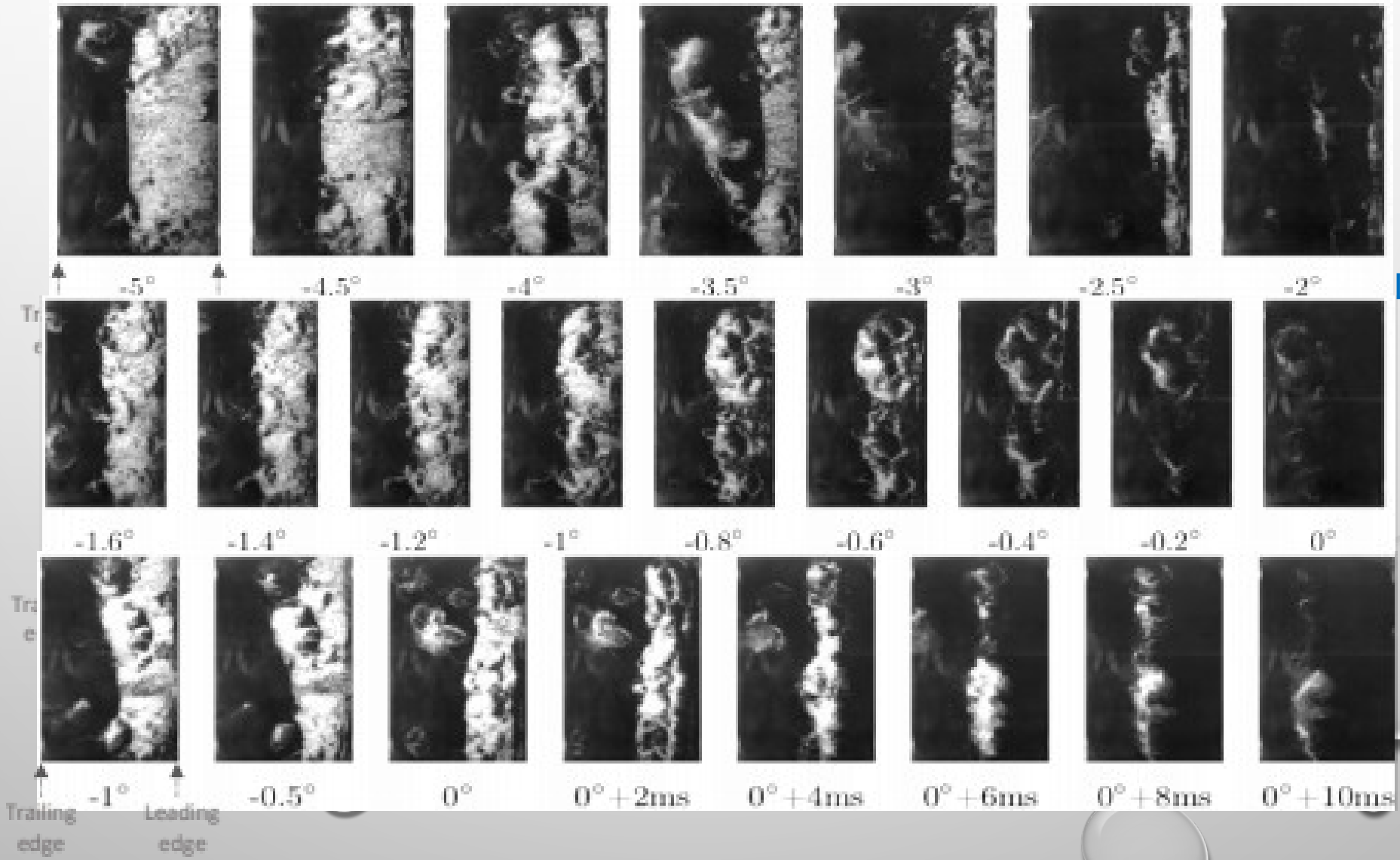
Cavitation sur profil NACA0015 en mode « pitching »

TEMPS

2000 deg/s²

17000 deg/s²

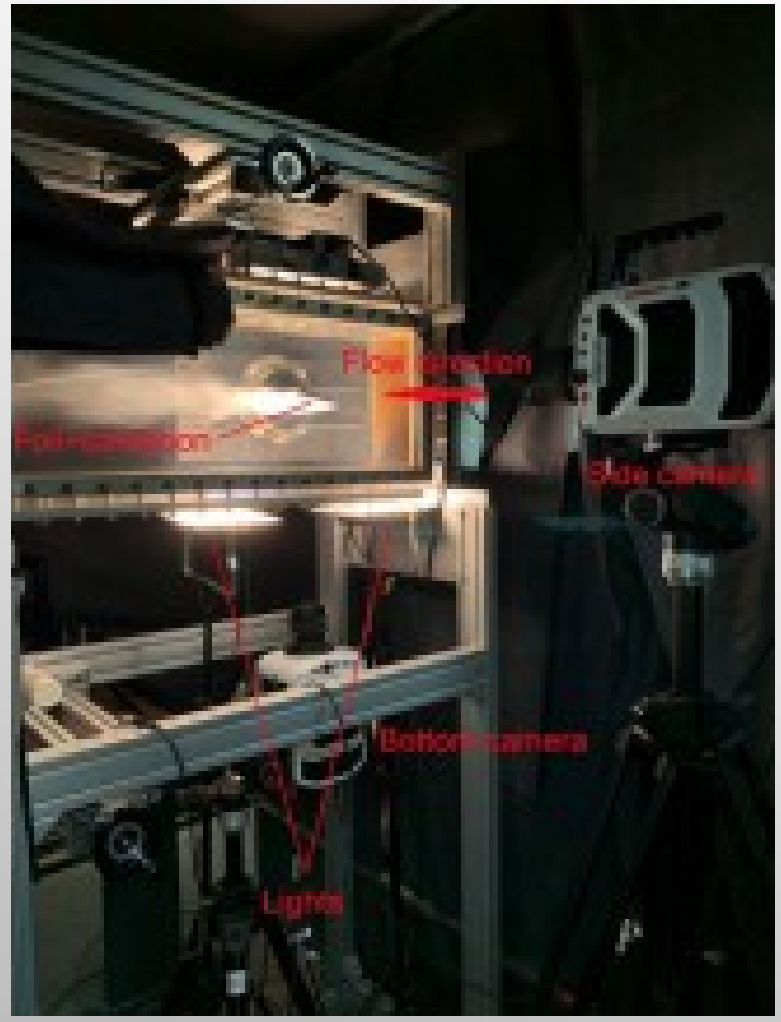
150 000 deg/s²

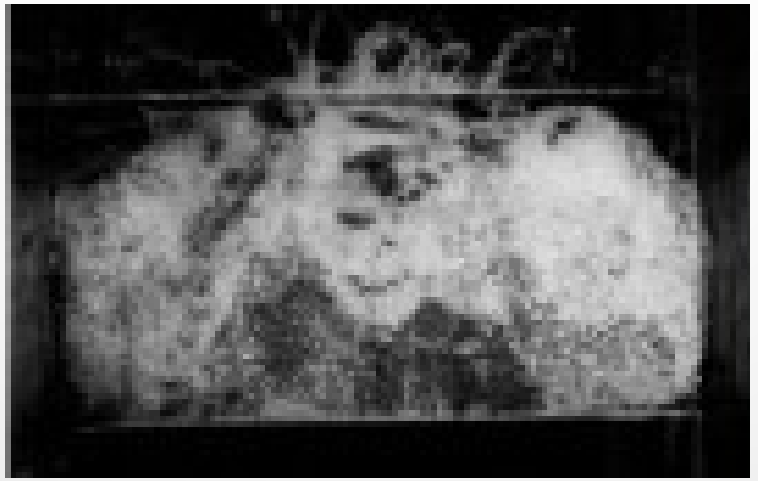


SENS DE L'ÉCOULEMENT

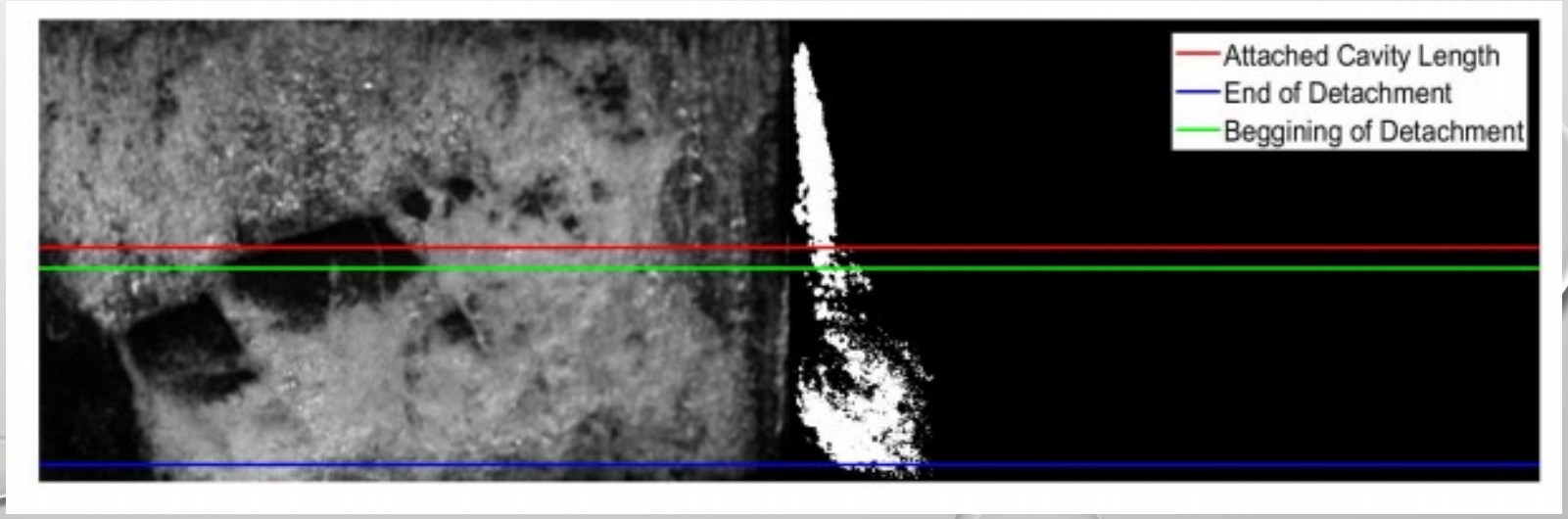
EXEMPLE D'ÉTUDE

Cavitation sur profil NACA0015 en mode pitching



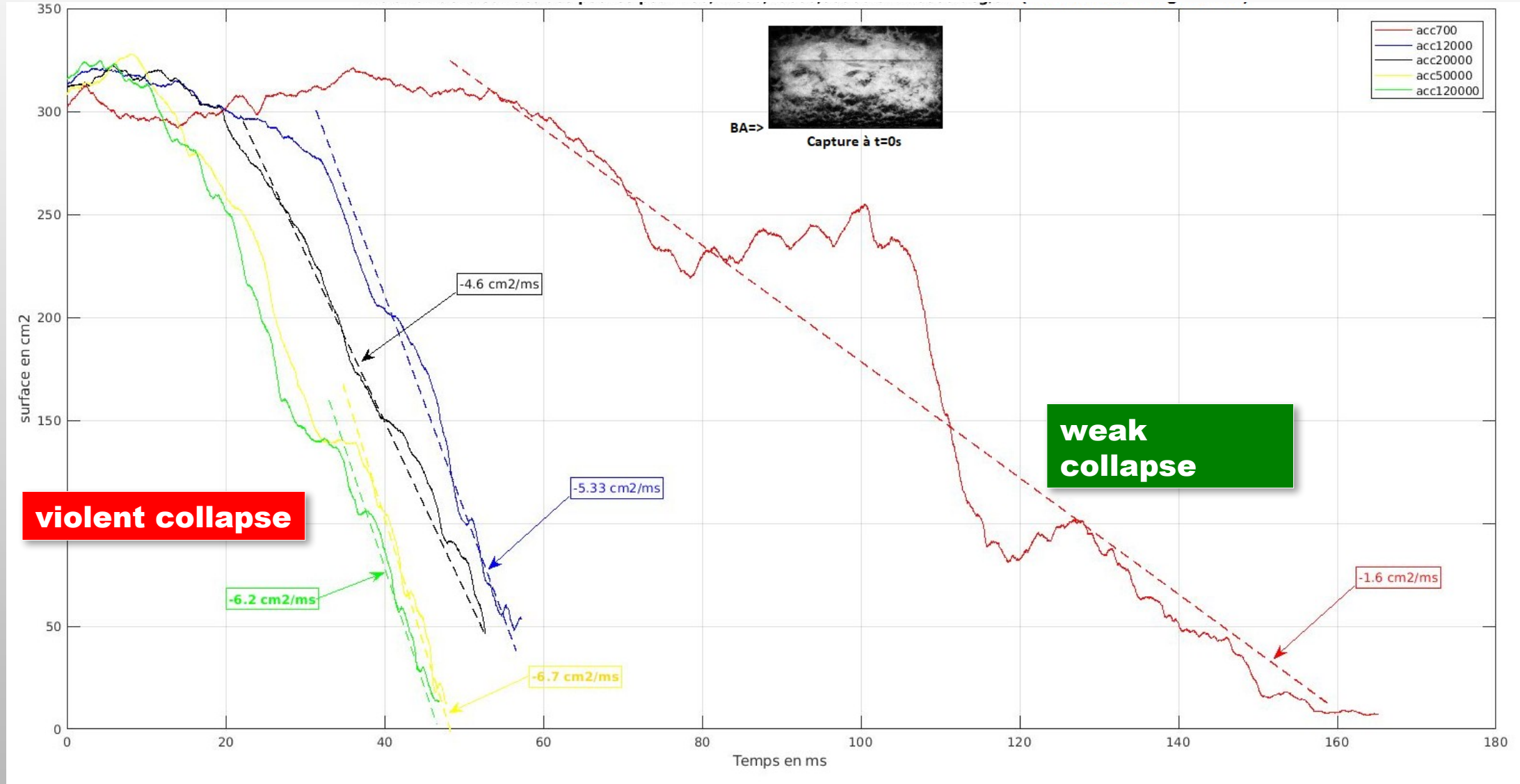






Cavitation sur profil NACA0015 en mode pitching

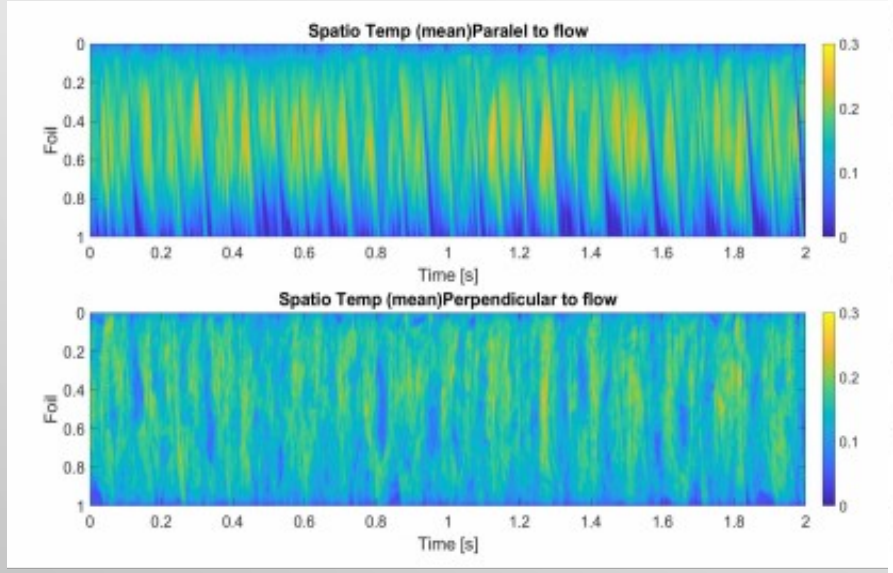
σ = 1, 6 m/s, α=12°

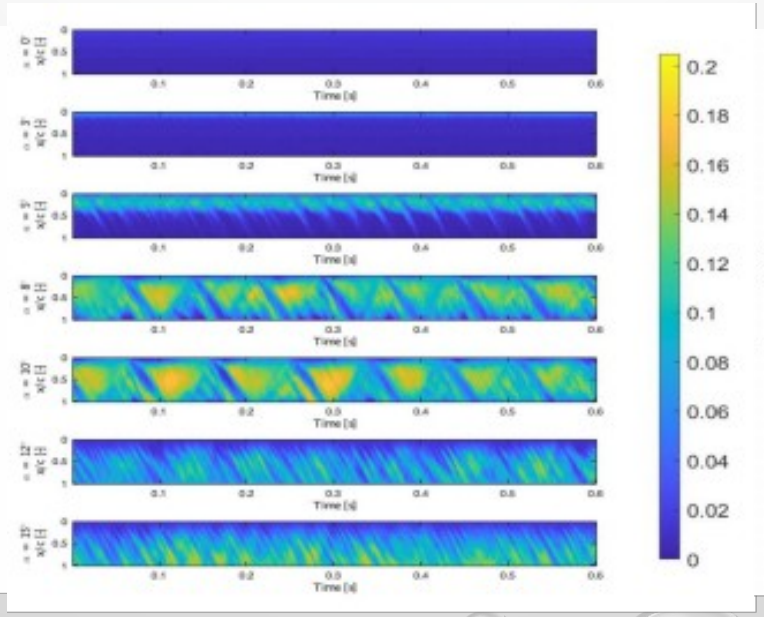


EXEMPLE D'ÉTUDE

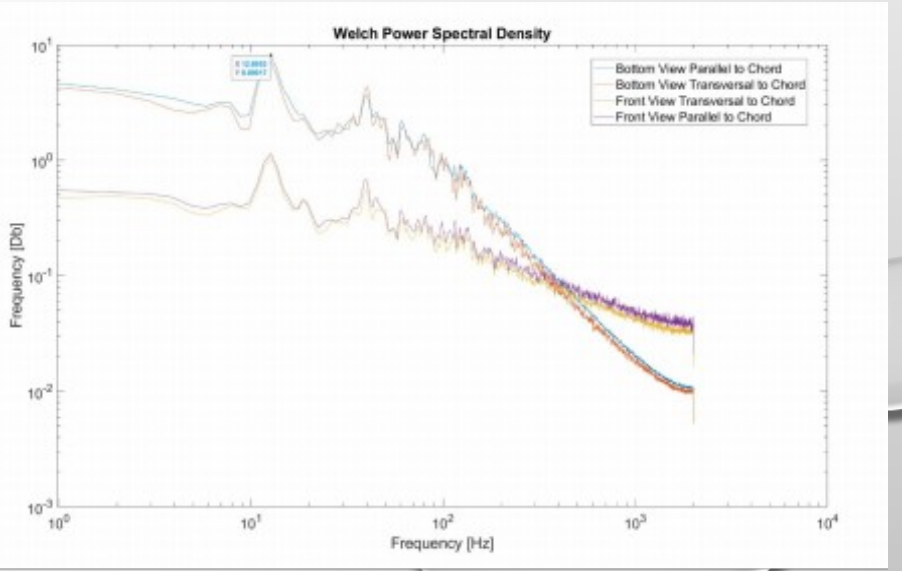
Cavitation sur profil NACA0015 en mode pitching

- Diagrammes spatio-temporels des niveaux de gris sur la longueur de corde : La variabilité de l'étendue de la cavité en fonction du temps est clairement observable.
- comportement périodique de la cavité est démontré par la répétabilité du même motif sur l'axe des abscisses.

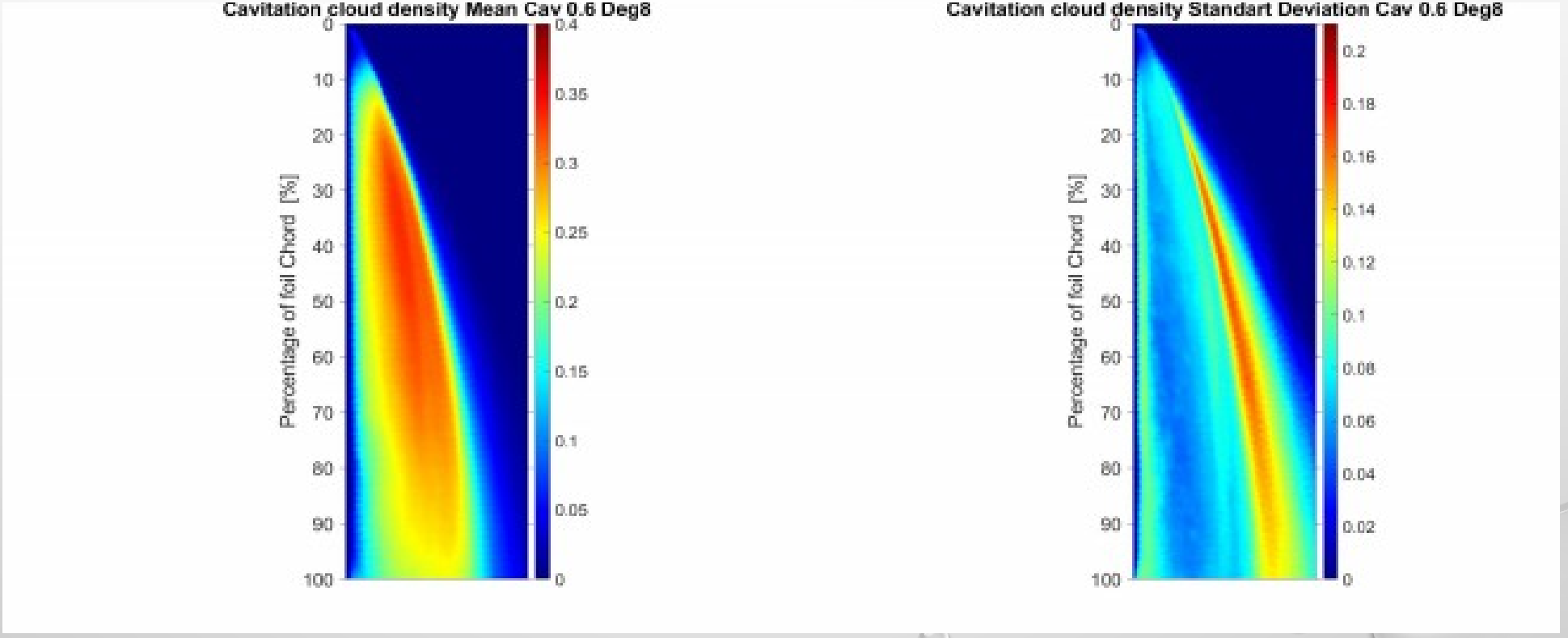




(b) $\sigma = 0.8$,$\alpha = 0, 3, 5, 8, 10, 12, 15$



Cavitation sur profil NACA0015 en mode « pitching »



(a) Cavitation cloud mean density

(b) Cavitation cloud density standard deviation

surface de chaque ligne de pixels de la vue inférieure = facteur de densité et multipliée par la valeur de l'échelle de gris de la même ligne dans l'image de la vue latérale.

EXEMPLE D’ÉTUDE

Cavitation sur profil NACA0015 en mode « pitching »

La phase liquide



EXEMPLE D'ÉTUDE

Cavitation sur profil NACA0015 en mode « pitching »

La phase liquide

Naca 0015 - Incidence 15° - Uinf=5m/s - Re= 500 000
Acquisition 1 kHz







Cavitation sur profil NACA0015 en mode « pitching »

La phase liquide





Cavitation sur profil NACA0015 en mode « pitching »

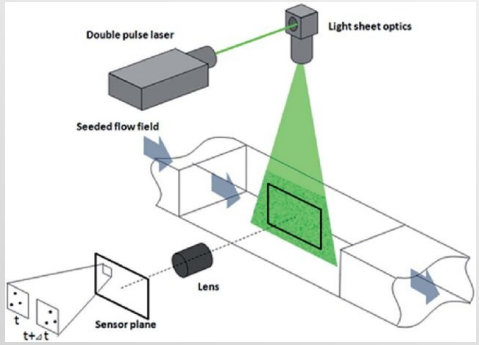
Quantification de la dynamique de la phase rapide : visualisation rapide
Quid des mesures RX résolues en temps et en espace (cage à plomb de grande dimension)
Quantification de la phase liquide (sillage instationnaire à haut Reynolds en 3D)
Mesure en cours de la phase liquide en présence de cavitation
Choix des matériaux pour les tests d'érosion : 1 inconnue sur le temps d'érosion ?
Fabrication en salle blanche des capteurs PVDF …

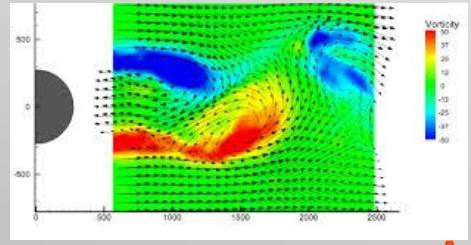
DÉVELOPPEMENT D'INSTRUMENTATION DÉDIÉE

2012 — 2019 — 2021

CAMÉRAS RAPIDES HAUTE RÉSOLUTION (PIV FLUIDE)

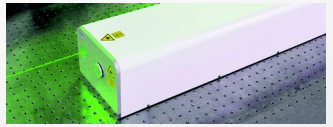
PIV 2D/2C (15 Hz), 50 μm -> 20 cm
Financement : LEGI

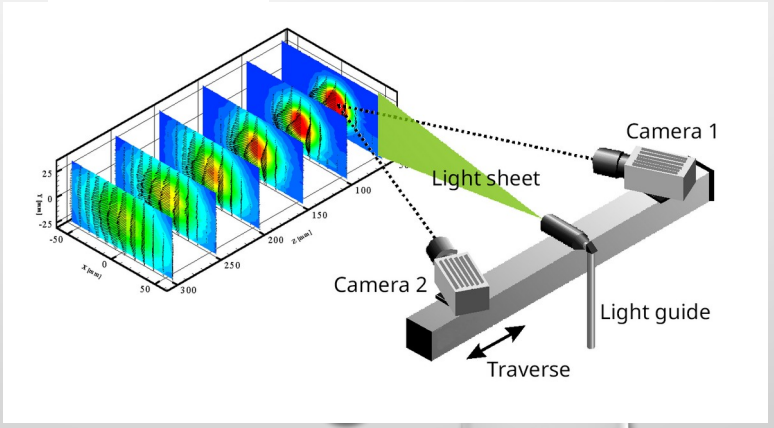


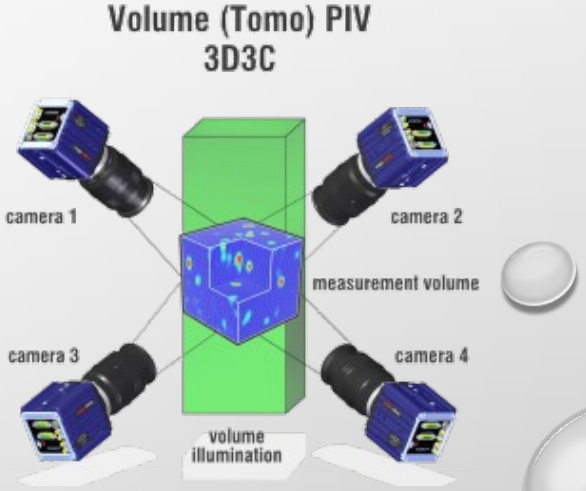


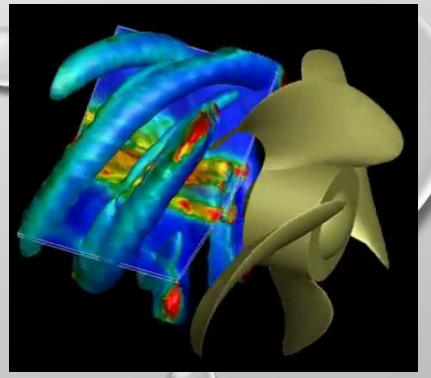
PIV 2D/3C (10 KHz), 100 μm -> 10 cm
Financement : LEGI, 3SR, G-INP, CNRS











Applications:

Turbulence, atomisation (aérospatial), sillages fortement instationnaires (turbomachines), transport de particules (nuages, thermique du bâtiment)

CPER : VAURA4D

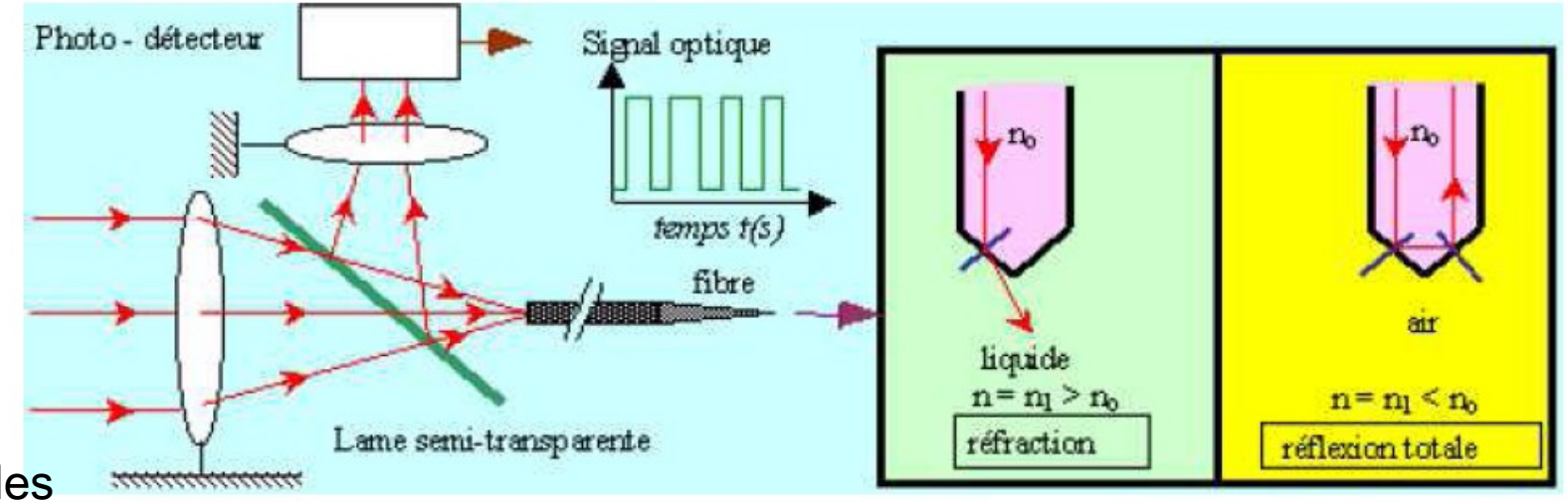
DÉVELOPPEMENT D'INSTRUMENTATION DÉDIÉE

$$\alpha = \frac{S_{gaz}}{S_{gaz} + S_{liquide}}$$

- La sonde optique :
- Mesure locale intrusive et en un point (nécessité de profils)
- Résolue en temps et en espace



En écoulement gaz-liquide, les sondes optiques permettent la **détection de la phase gazeuse (taux de vide local)**. Le principe de détection est basé sur la différence d'indice de réfraction du milieu à l'extrémité de la fibre optique.

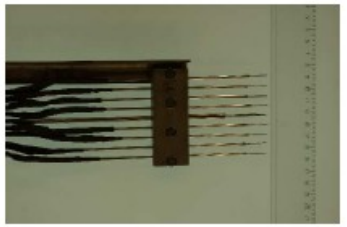


Valable pour des concentrations en gaz de 0 à 100%, des vitesses de 0.1 à 25 m/s, des bulles > 0.01 mm, des gouttes > 0.01 mm.

Incertitudes de 5% sur la concentration et 15% sur la vitesse et la taille.

Nécessité de bisonde pour des bulles de grande taille.

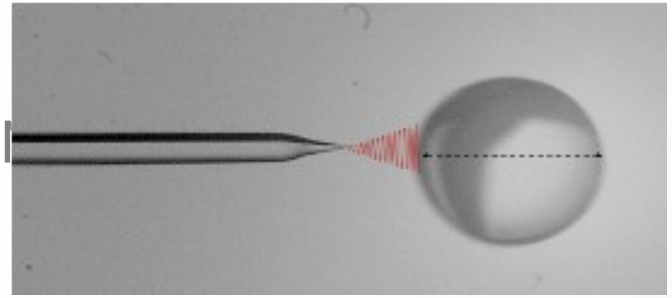
Peigne de sondes pour mesurer la vitesse de l'écoulement en plusieurs points ou pour détecter la phase gazeuse en plusieurs points.



- En lien avec la modélisation à 2-fluides
- Fonction indicatrice de phase

DÉVELOPPEMENT D'INSTRUMENTATION

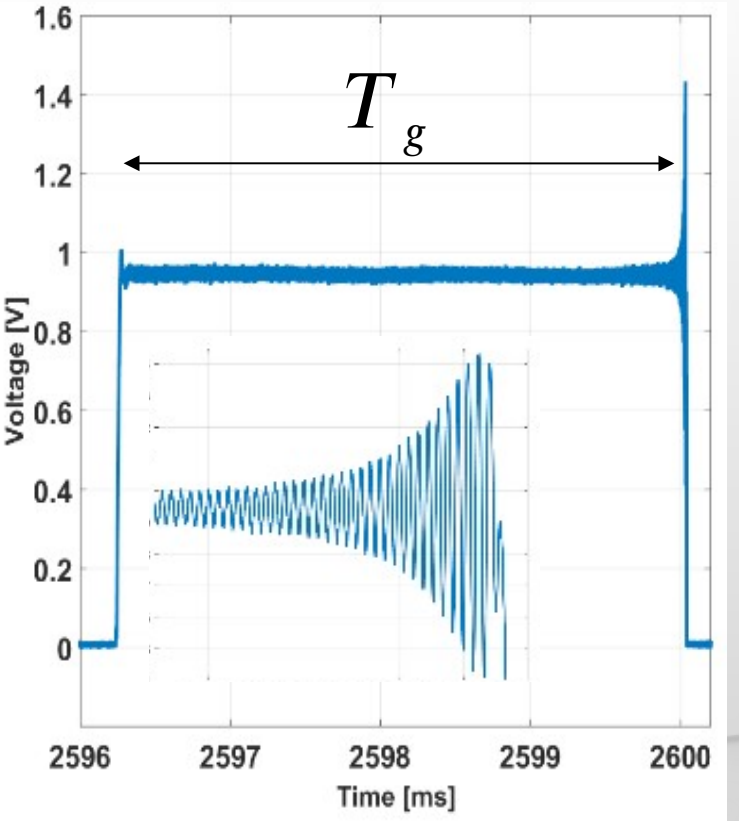
Sonde Doppler:

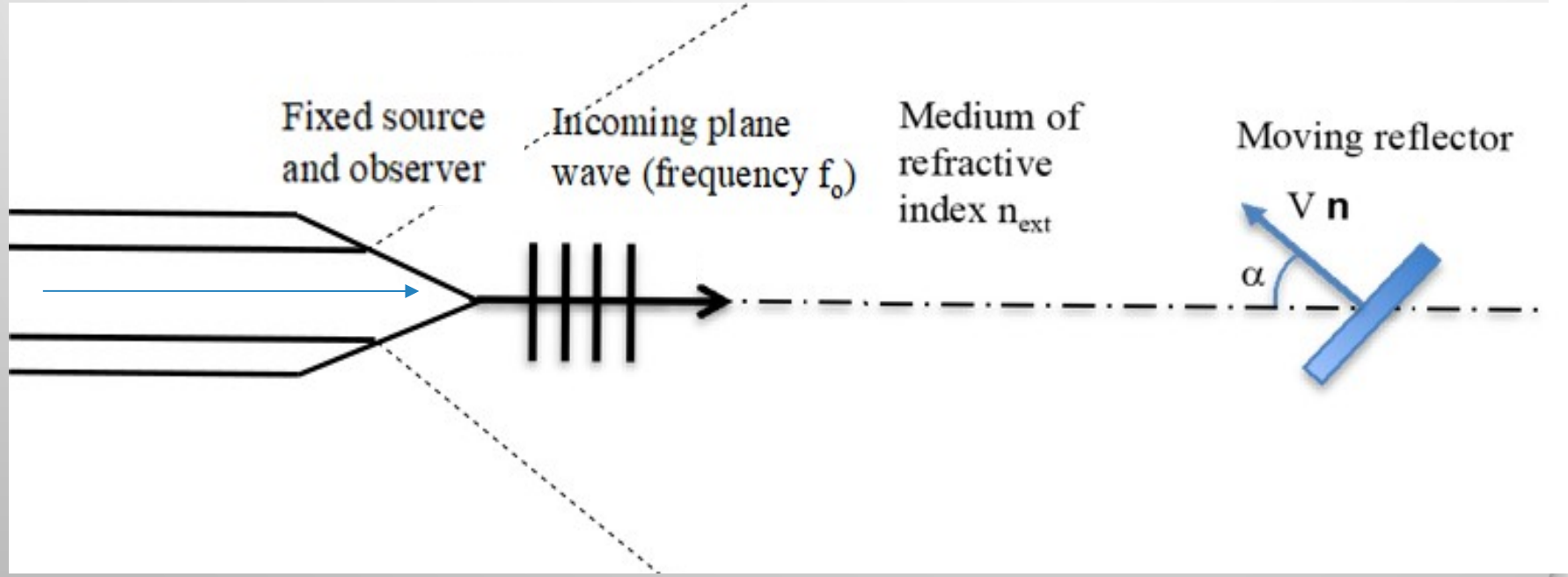


Sonde conique classique

+

Mesures de vitesses par effet Doppler





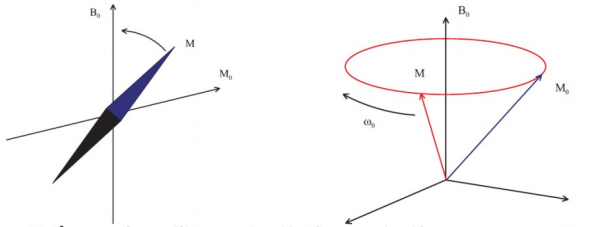
$$f_d = 2V \vee \vec{n}.\vec{k} \vee \frac{¿}{\lambda_0 / n_{ext}} ¿$$

DÉVELOPPEMENT D'INSTRUMENTATION DÉDIÉE

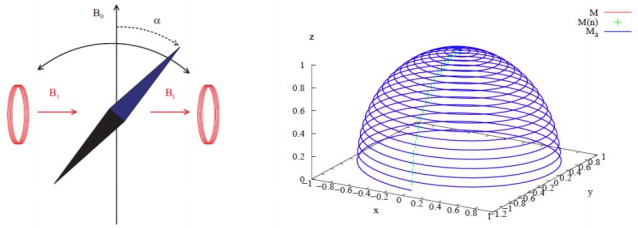
- Mesures RMN : identification de la phase liquide
- Taille de l'échantillon et Traitement du signal compliqué

Principes de la RMN

- Aimantation de la matière (M), spin nucléaire, Analogie: la boussole



Précession libre de l'aimantation $\omega_0 = \gamma B_0$



Basculement de l'aimantation autour de B_1
Nutation à la résonance $\alpha = \gamma B_1 T$

- Equation de Bloch (1946)

$$\frac{d\mathbf{m}}{dt} = \gamma \mathbf{B} \times \mathbf{m} - \frac{\mathbf{m}_\perp}{T_2} - \frac{\mathbf{m}_\parallel - \mathbf{m}_\infty}{T_1}$$

où T_1 et T_2 sont les temps de relaxation spin-réseau, spin-spin

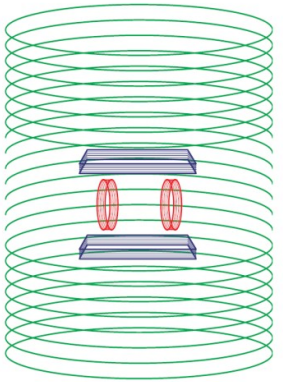
- Spectromètre RMN

Electro-aimant: $B_0 \approx 0.12T, f_0 = 5$ MHz

Gradient de champ: g≈5 G/cm, Δf≈5kHz/cm

Manipulation de l'aimantation α≈π/2, t=13 µs

Détection synchrone à 5 MHz permet de déterminer



- **taux de vide** par un marquage en fréquence
- **déplacement (vitesse)** par deux marquages en phase de intensité g séparés d'un temps Δ
- **profils de vitesse** par un marquage en phase et un marquage en fréquence de la position transversale

DÉVELOPPEMENT D'INSTRUMENTATION DÉDIÉE

Installation SPINFLOW

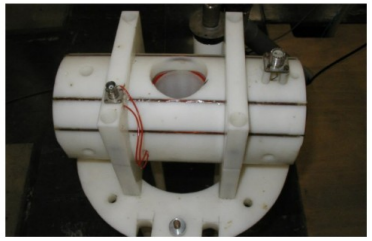




Bobine de gradient en z

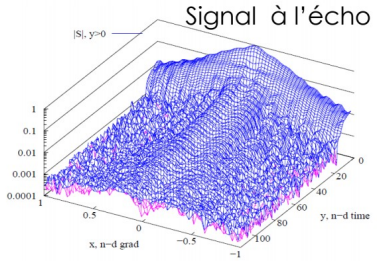


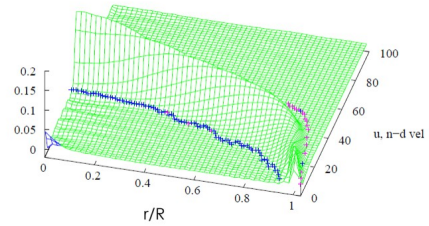
Bobine de gradient en x

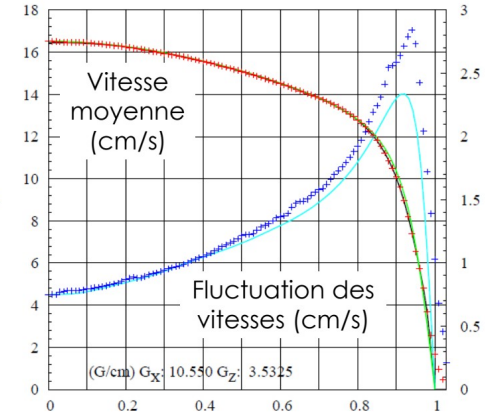


Bobine RF

Exemple de mesures en écoulement de conduite

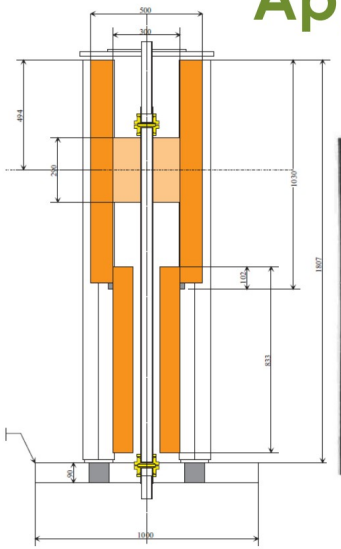


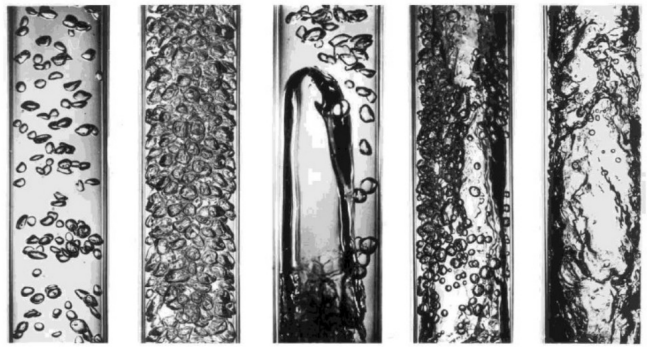




Re=5300, R=42 mm

Application écoulement diphasique

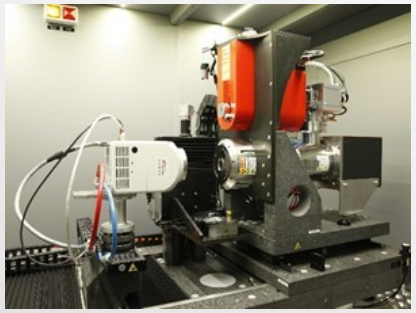




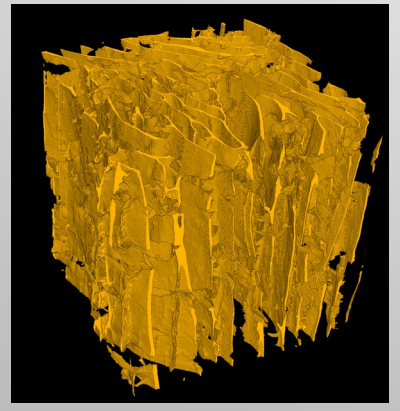
Volume de mesure: d=60 mm, h=50mm

DÉVELOPPEMENT D'INSTRUMENTATION DÉDIÉE SOLIDE ET MILIEUX POREUX

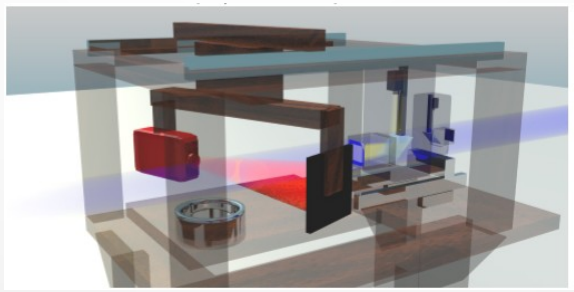
2015 2018 2020



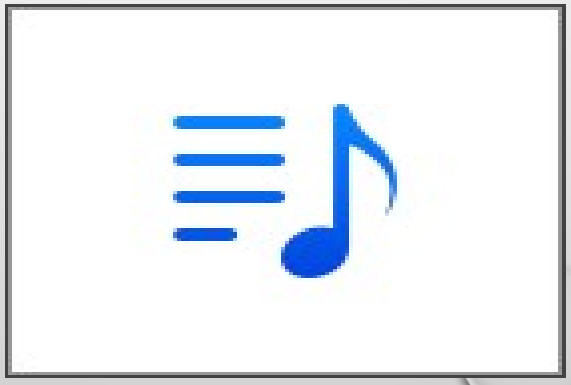
Taille de pixel : 0.3 µm
Financement : CEMAM, SIMAP, Tec21 (these + Tomo), OSUG, 3SR, PHITEM, G-INP, LEPMI, IGE, LMGP,



Couplage RX/Neutrons



Taille de pixel : 4 µm
Financement : 3SR, UGA, ILL



Création UMI

(Neutron Imaging for Materials and Energy Research

Applications:

Séchage béton (couplage RX/ Neutron pour visualiser l'eau (bleu foncé)

DÉVELOPPEMENT D'INSTRUMENTATION DÉDIÉE

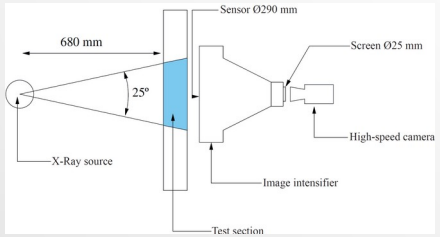
2014

2022

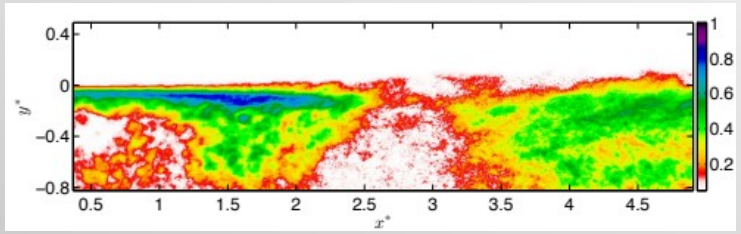
ABSORPTION RX (FLUIDE)

Coopération CEA

RX 2D (50 μm-> 10 cm 5 kHz)



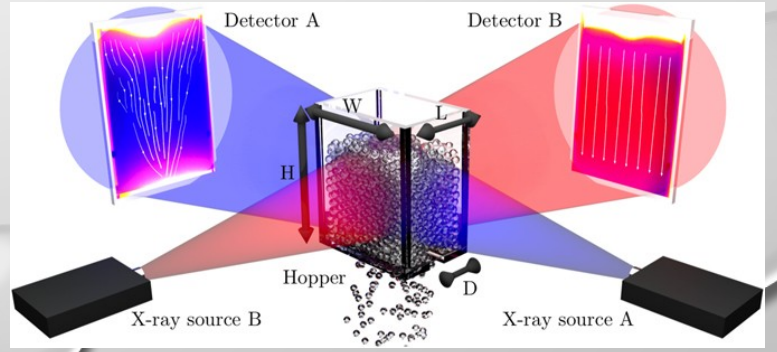




CPER : MECASNOW

Échelles spatio-temporelle visées : 10 μm sur des tailles de 10 cm, fréquence 100 Hz





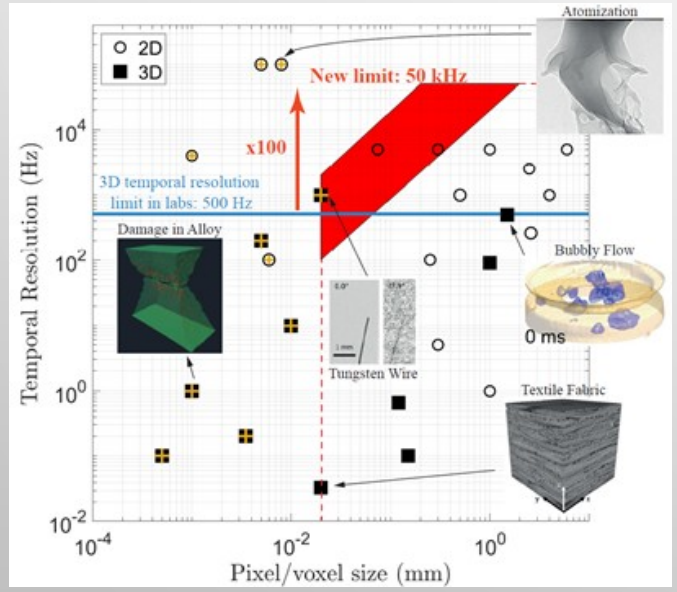
Applications:

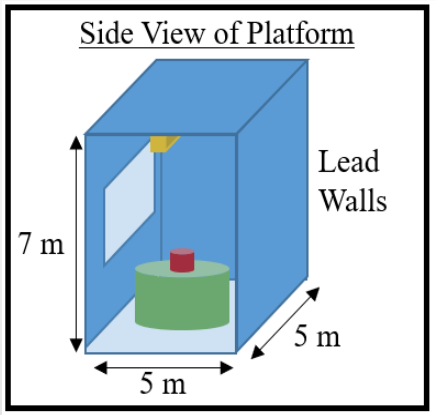
haute résolution temporelle en 2D : Atomisation (aérospatial), cavitation et turbomachines

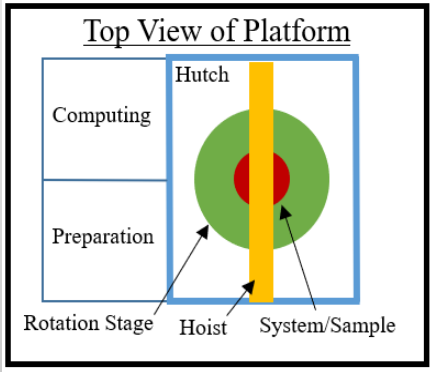
haute résolution temporelle en 2D : écoulement granulaire

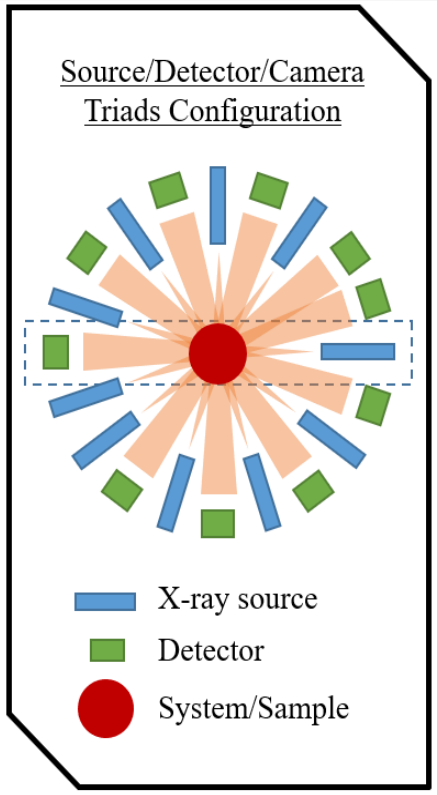
DÉVELOPPEMENT D'INSTRUMENTATION DÉDIÉE

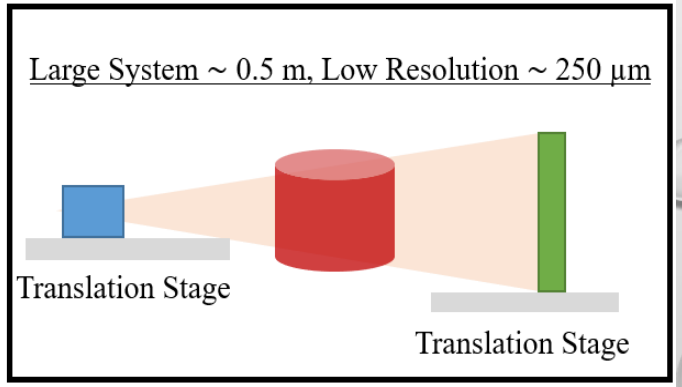
■ **Plateforme Multidisciplinaire mutualisée et ouverte** d'Imagerie **haute résolution temporelle 3D** par rayons X permettant une approche locale haute résolution des systèmes par des diagnostiques combinés des systèmes **multiphasiques** (pour des systèmes à dynamique rapide) de taille **méso-échelle** (5-50 cm)

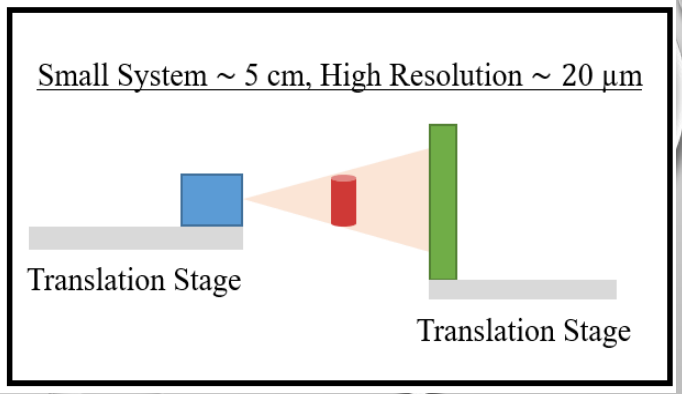












MERCI