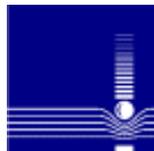


# Amélioration du transfert de chaleur dans un échangeur assisté par ultrasons

Journée thématique SFT - Intensification des transferts dans les échangeurs thermiques  
et multifonctionnels : techniques, outils d'analyse et optimisation

Mathieu Legay, Nicolas Gondrexon, Stéphane Le Person,  
Stéphane Colasson, Primius Boldo, André Bontemps



# Plan

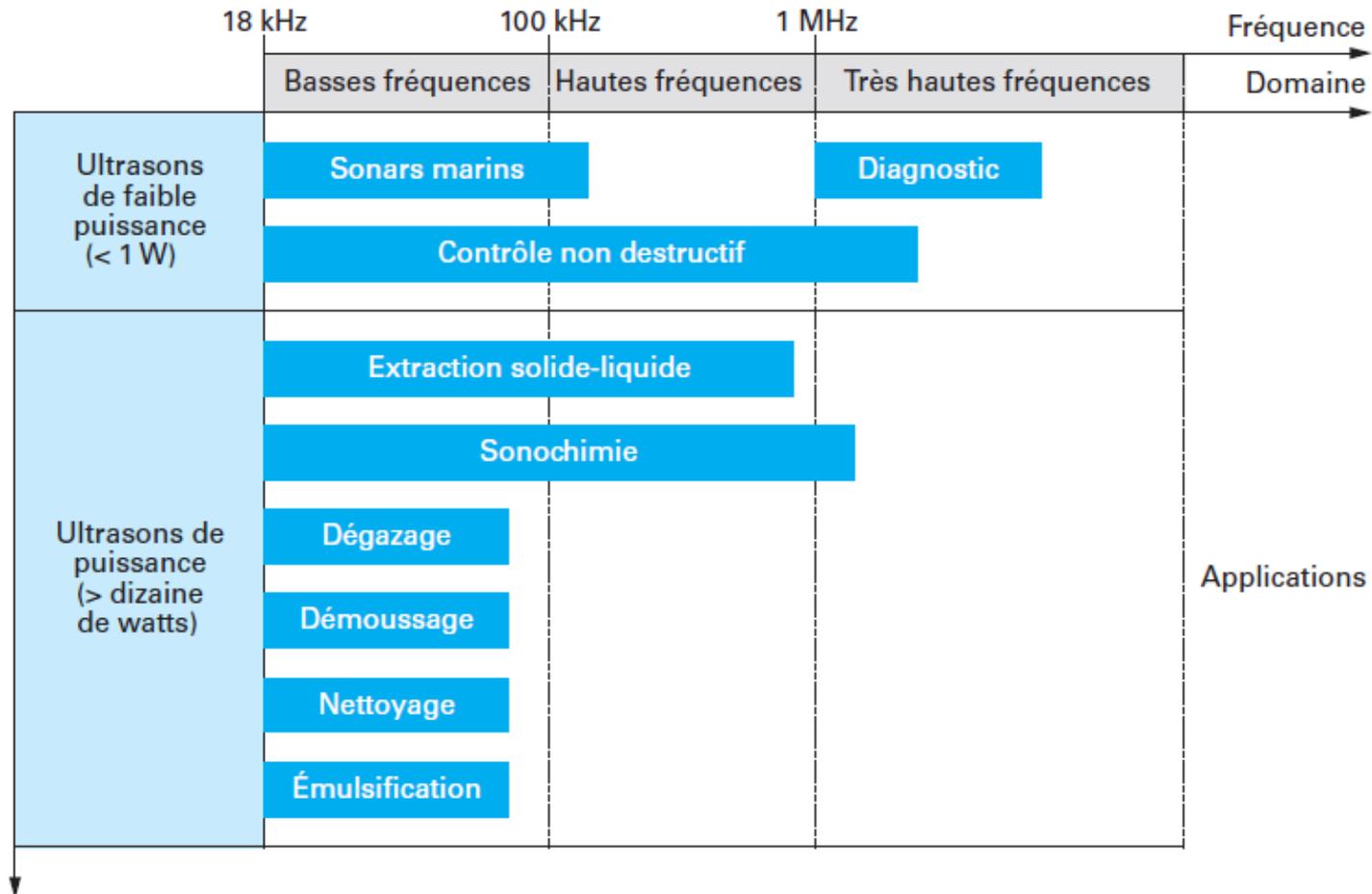
- Les ultrasons
- Contexte, littérature
- Échangeur de chaleur vibrant
  - Banc expérimental
  - Échangeur de chaleur
- Résultats
- Perspectives

# Plan

- **Les ultrasons**
- Contexte, littérature
- Échangeur de chaleur vibrant
  - Banc expérimental
  - Échangeur de chaleur
- Résultats
- Perspectives

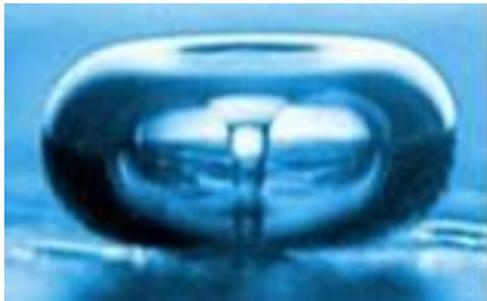
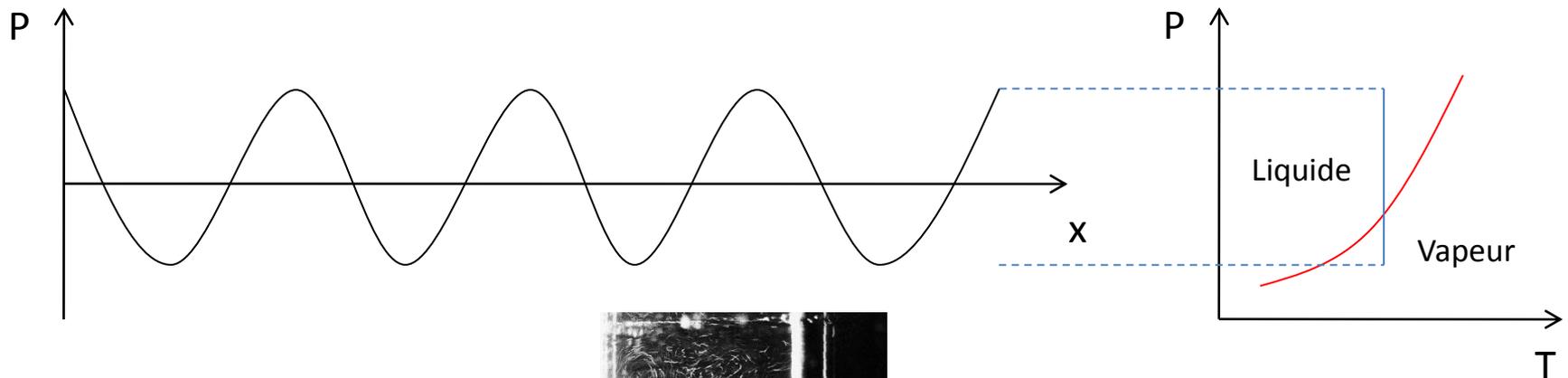
# Les ultrasons

Ondes acoustiques dont la fréquence est supérieure à la limite haute d'audition de l'oreille humaine

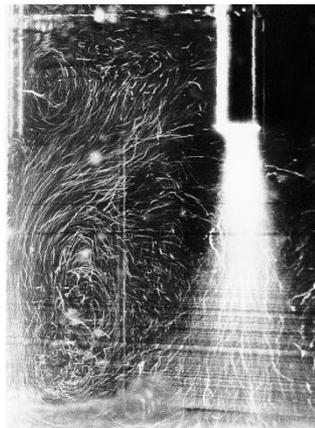


# La cavitation acoustique

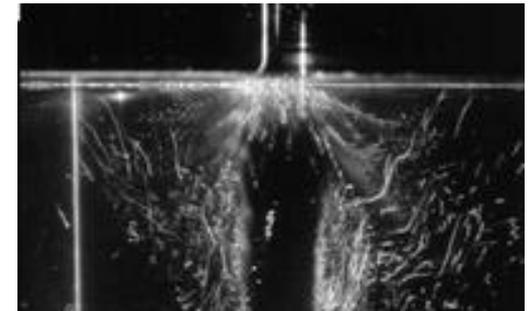
Formation, croissance et puissante implosion de bulles de gaz/vapeur lorsque la pression locale passe sous le seuil de cavitation



<http://www.sinaptec.fr/>



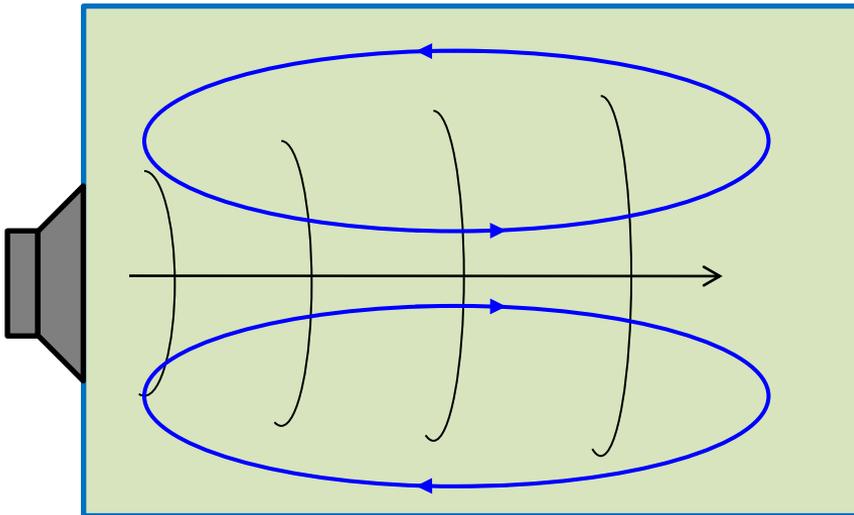
<http://www.ulb.ac.be/>



<http://endirect.univ-fcomte.fr/>

# Le courant acoustique

Courant macroscopique dans le sens de propagation de l'onde dû à la dissipation de l'énergie acoustique

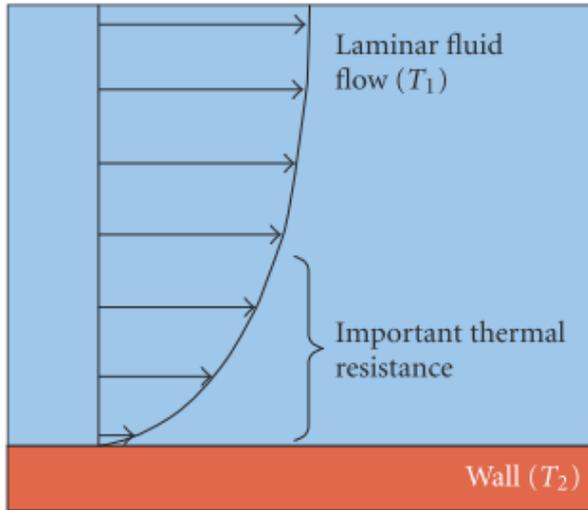


Avec l'aimable autorisation de(\*)

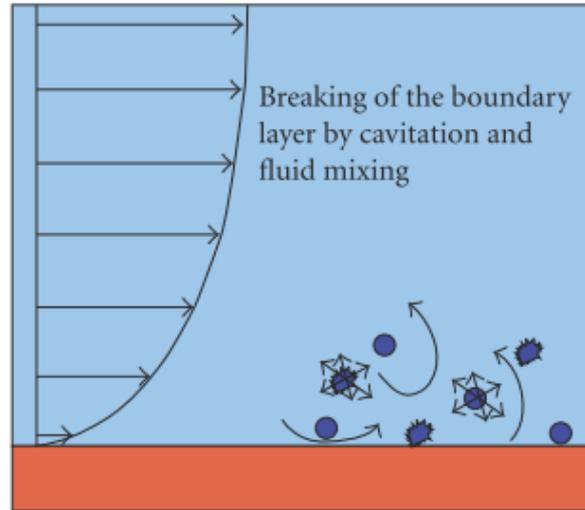
Possibilité d'augmentation des transferts de chaleur par convection

(\*) V. Botton, D. Henry, H. BenHadid, LMFA (UMR CNRS 5509, ECL, Université Lyon I, INSA de Lyon)

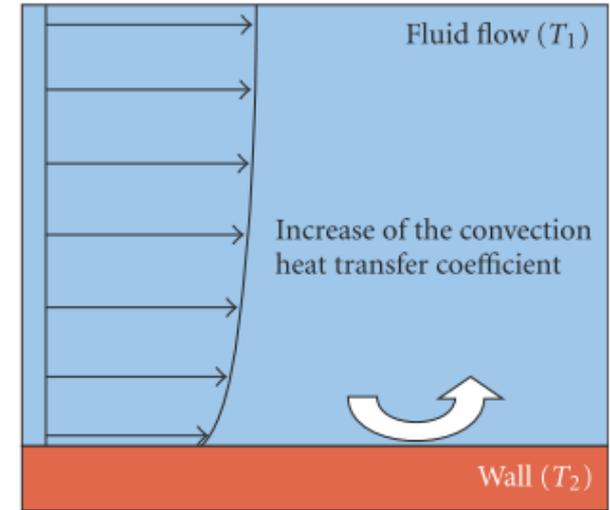
# Utilisation des phénomènes



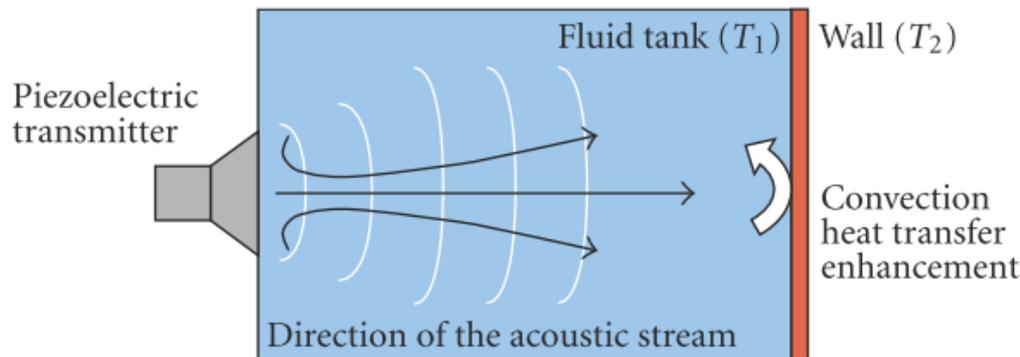
Typical velocity boundary layer



Cavitation and microagitation



Modified boundary layer profile

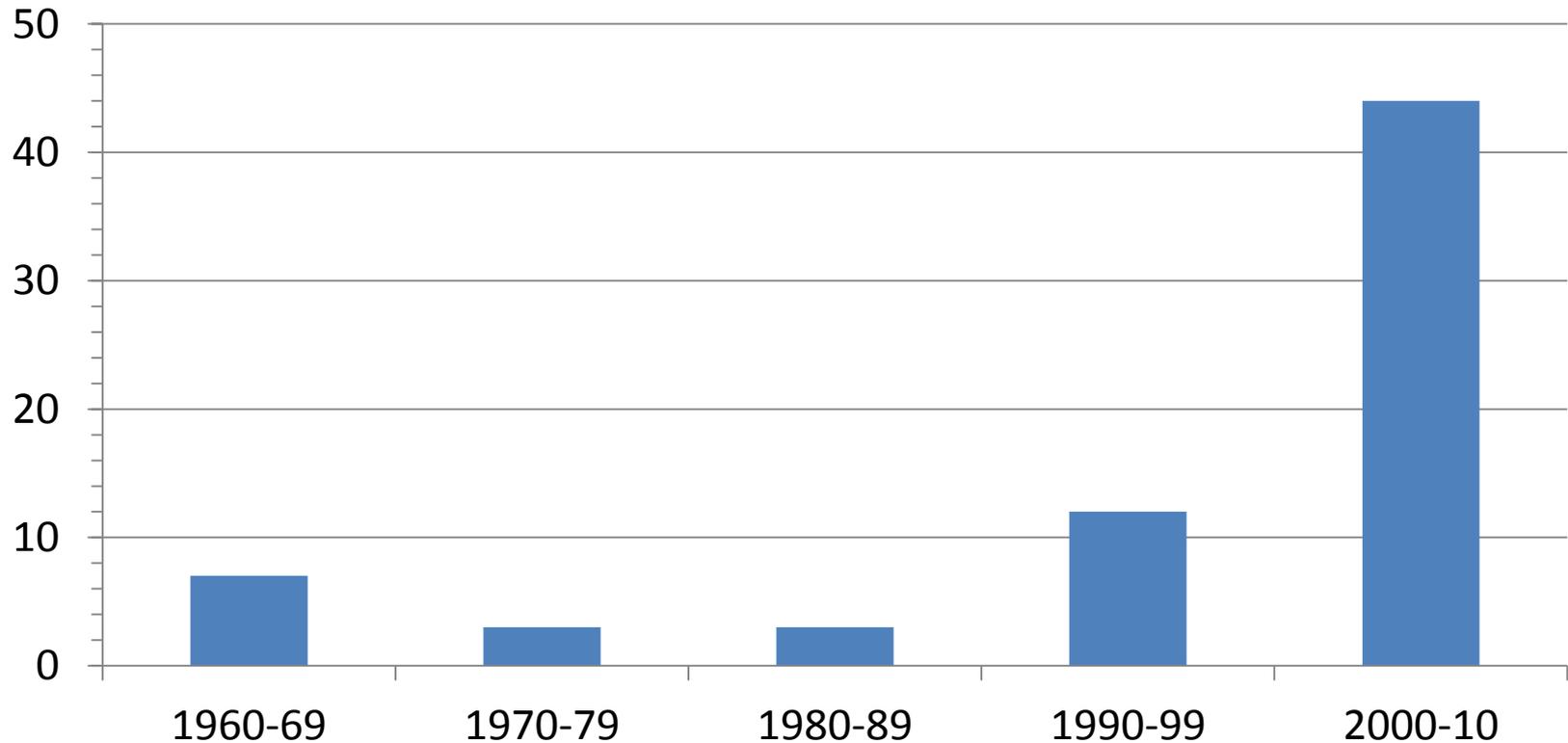


# Plan

- Les ultrasons
- **Contexte, littérature**
- Échangeur de chaleur vibrant
  - Banc expérimental
  - Échangeur de chaleur
- Résultats
- Perspectives

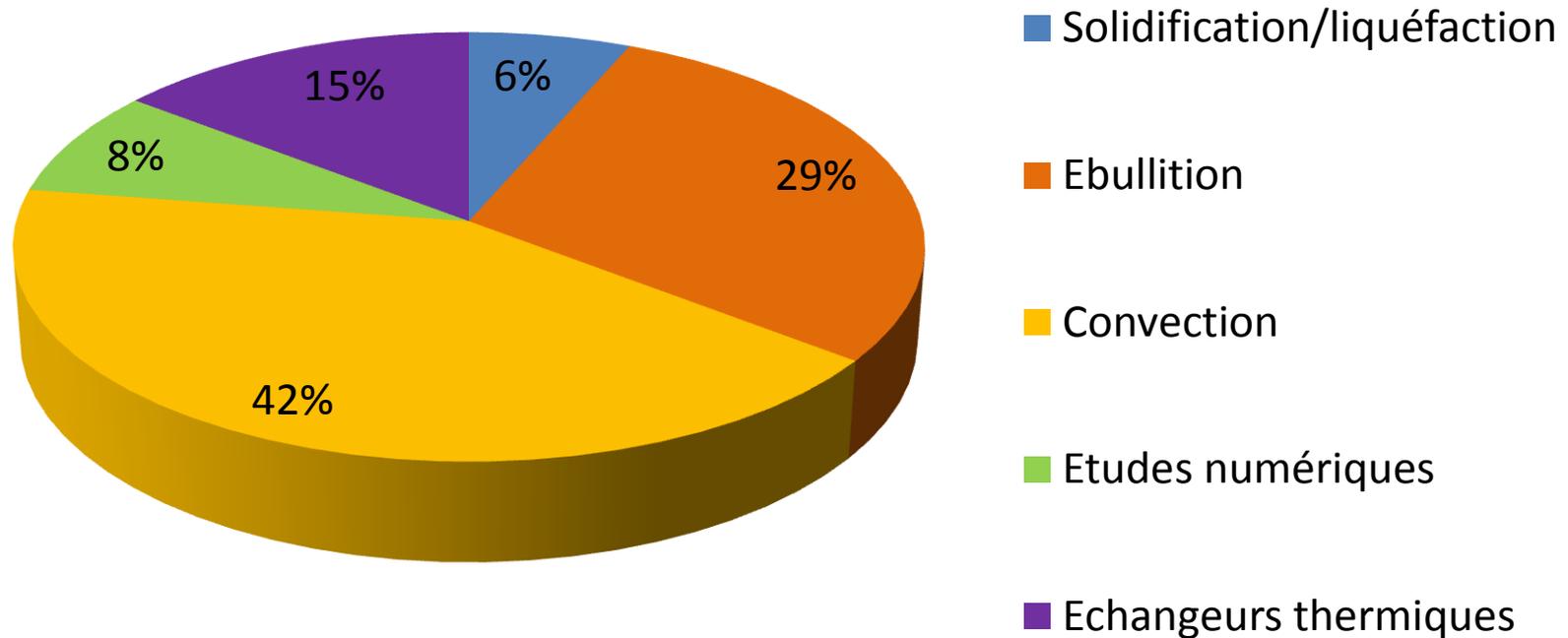
# Nombre de travaux

Nombre de papiers publiés traitant des transferts thermiques assistés par ultrasons



# Répartition des travaux répertoriés

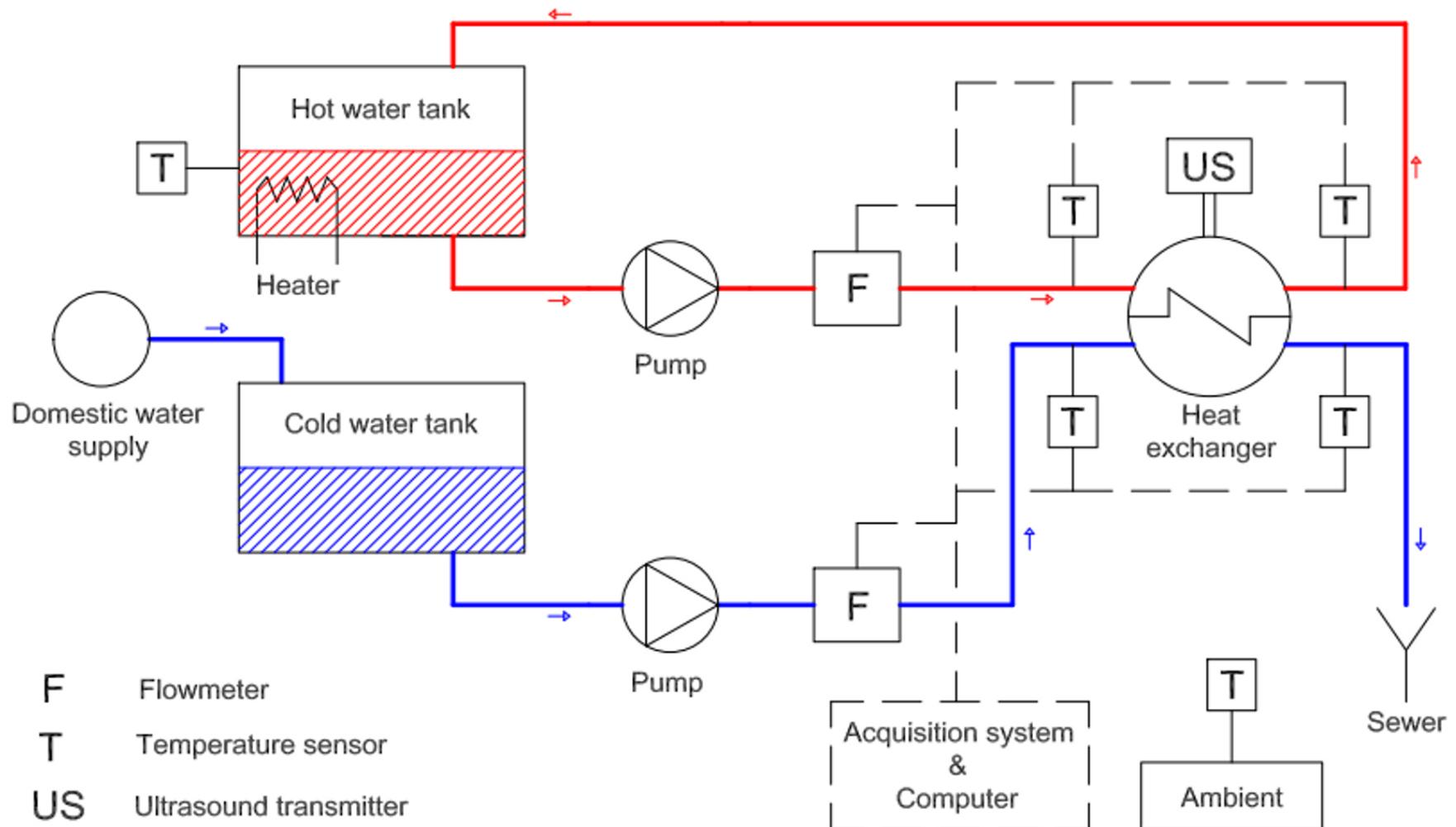
Thèmes étudiés (total : 62 papiers)



# Plan

- Les ultrasons
- Contexte, littérature
- **Échangeur de chaleur vibrant**
  - Banc expérimental
  - Échangeur de chaleur
- Résultats
- Perspectives

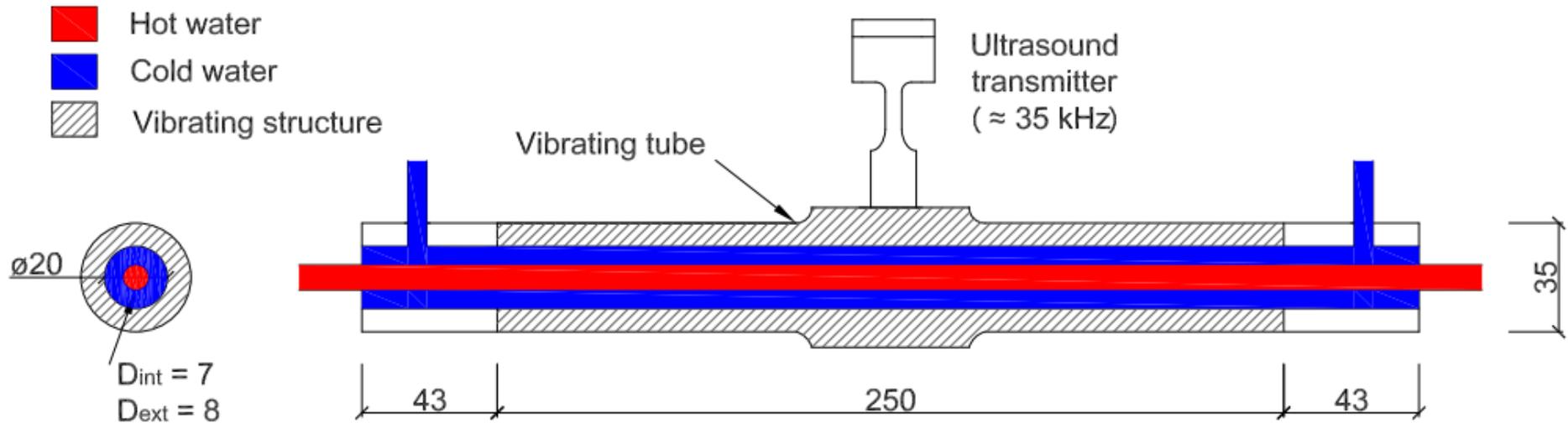
# Banc d'essais - Système



# Construction du banc d'essais



# Échangeur bi-tube – schéma



- Possibilité d'inverser les espaces de circulation des fluides et la configuration co-courant/contre-courant
- Configuration sélectionnée : eau/eau, eau chaude dans le tube central, co-courant

# Échangeur bi-tube – détails



Vue d'ensemble

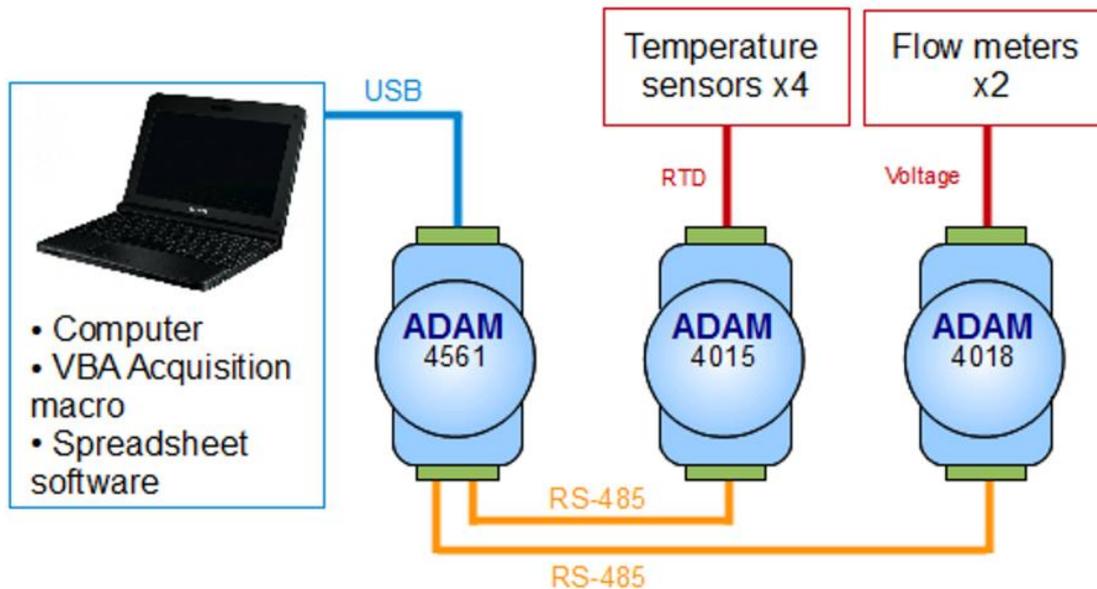


Vue en coupe



Entrée/sortie  
des fluides

# Systeme d'acquisition



Systeme d'acquisition, schéma  
et photo



# Plan

- Les ultrasons
- Contexte, littérature
- Échangeur de chaleur vibrant
  - Banc expérimental
  - Échangeur de chaleur
- **Résultats**
- Perspectives

# Méthodologie

- Acquisition des températures

$$T_{ch-fr} = f(t)$$

- Calcul des flux échangés

$$q_{ch-fr} = \dot{m}_{ch-fr} Cp \Delta T_{ch-fr}$$

- Bilans énergétiques

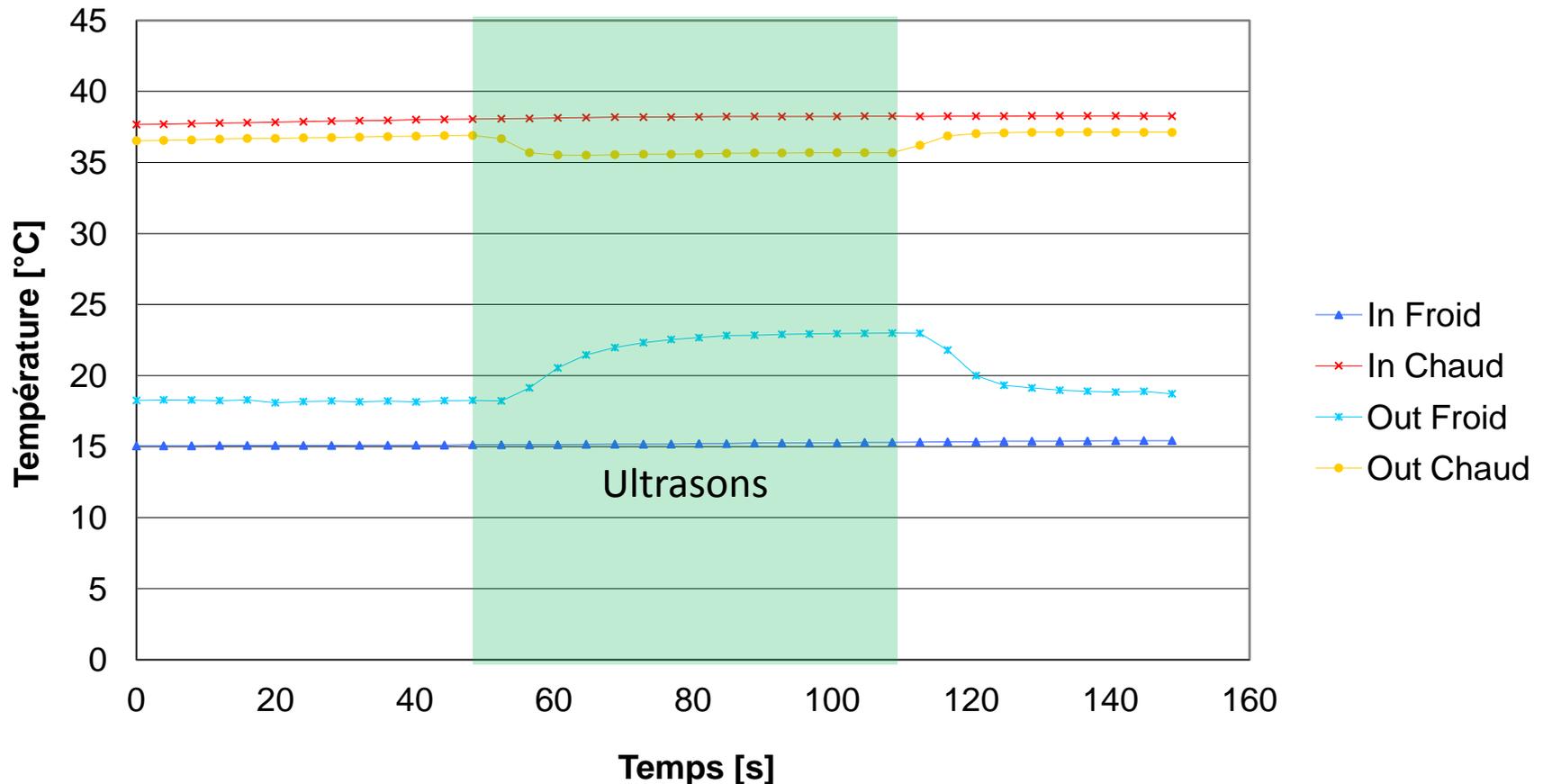
$$q_{ch} + P_{US} = q_{fr} + q_{env}$$

- Facteurs d'intensification

$$EF = \frac{U_{US}}{U}$$

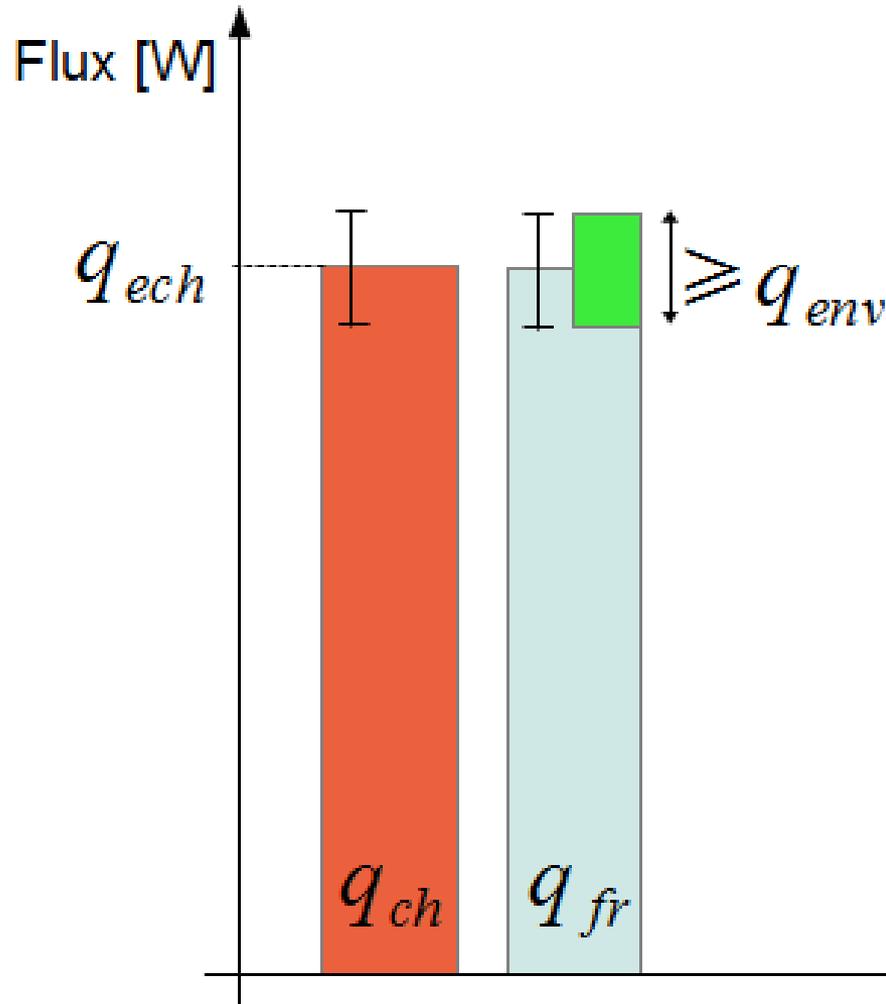
# Observation des températures

Evolution des températures aux entrées/sorties en fonction du temps



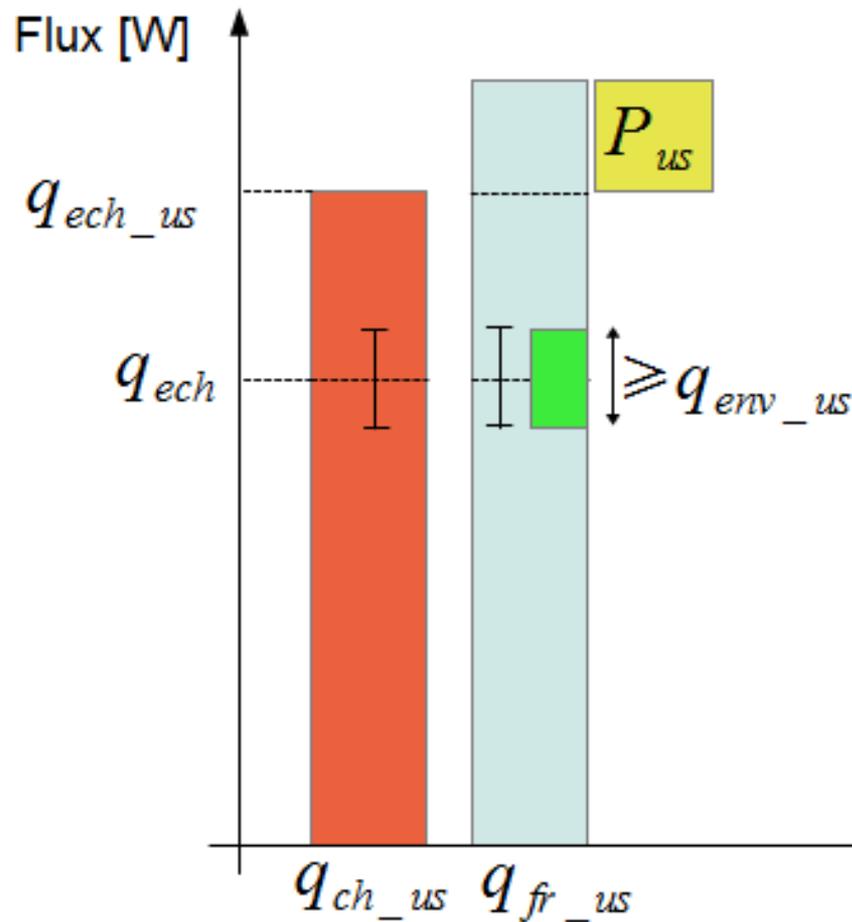
Débits : 1,3 L/min tube interne, 0,6 L/min espace annulaire, eau froide dans l'espace annulaire

# Bilan énergétique sans ultrasons



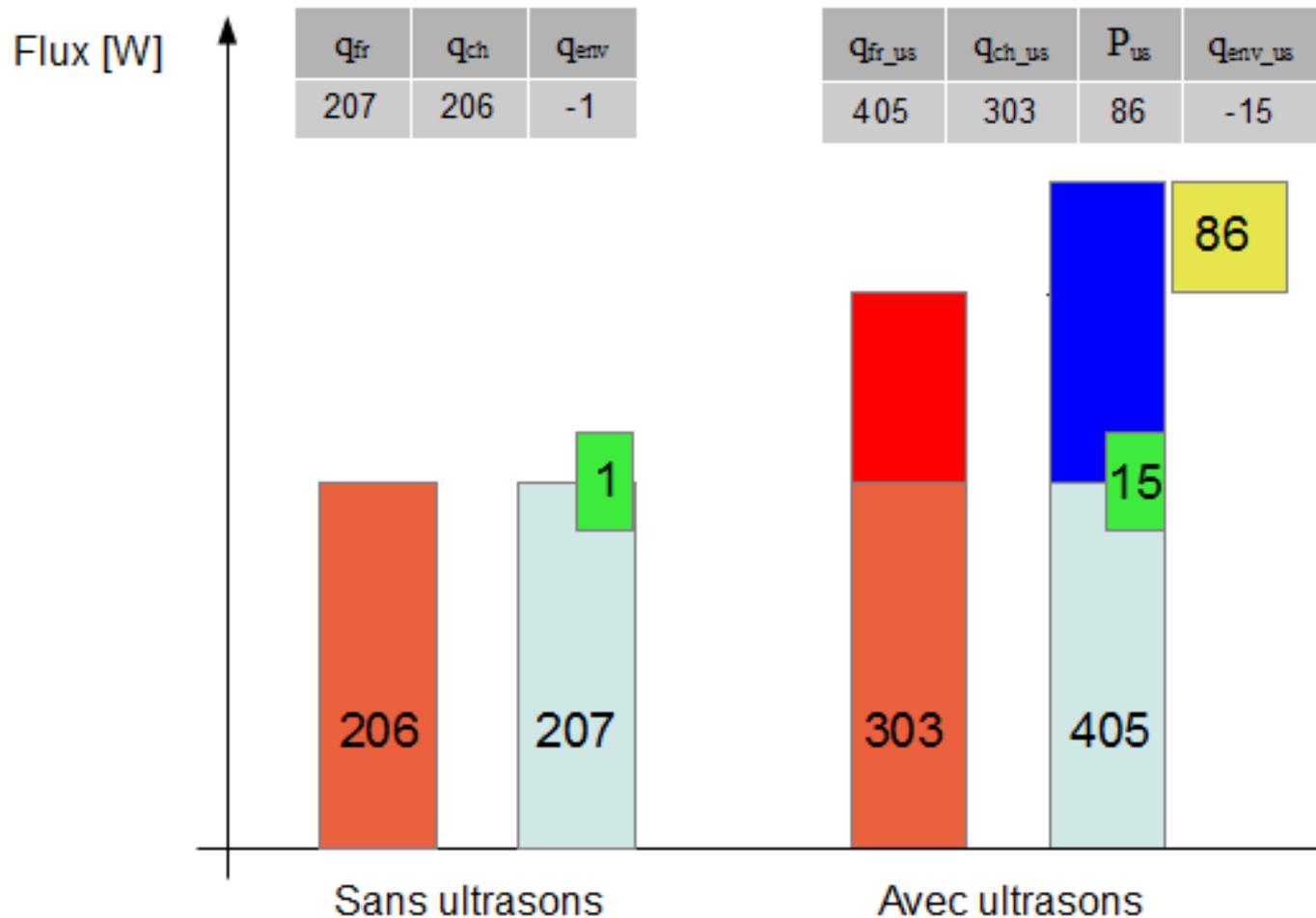
Débit eau chaude [L/min]	Débit eau froide [L/min]	$q_{fr}$ ( $\approx q_{ech}$ ) [W]	$q_{ch}$ ( $\approx q_{ech}$ ) [W]	$q_{env}$ [W]
2.0	0.2	109	111	2
2.0	0.4	156	154	-3
2.0	0.6	168	174	6
2.0	0.8	185	192	7
2.0	1.0	207	206	-1
2.0	1.4	234	237	2
2.0	1.6	249	252	3
2.0	2.0	286	274	-12
2.0	2.2	297	280	-17
2.0	2.4	312	291	-20
2.0	2.5	310	291	-19

# Bilan énergétique avec ultrasons



Débit eau chaude [L/min]	Débit eau froide [L/min]	$q_{fr\_us}$ [W]	$q_{ch\_us}$ ( $\approx q_{ech\_us}$ ) [W]	$P_{us}$ [W]	$q_{env\_us}$ [W]
2.0	0.2	223	148	75	0
2.0	0.4	327	222	84	-21
2.0	0.6	361	260	83	-18
2.0	0.8	396	292	85	-19
2.0	1.0	405	303	86	-15
2.0	1.4	421	319	89	-13
2.0	1.6	437	331	80	-27
2.0	2.0	451	337	81	-32
2.0	2.2	463	352	79	-31
2.0	2.4	473	364	81	-28
2.0	2.5	476	368	77	-32

# Comparaison des bilans énergétiques



À débit eau chaude 2.0 L/min, débit eau froide : 1.0 L/min

# Facteur d'intensification ( $U_{us}/U$ )

Enhancement factor (EF)

➤ Détails du calcul :

$U$  : coefficient *global* d'échange [ $W m^{-2} K^{-1}$ ]

$$EF = \frac{U_{US}}{U}$$

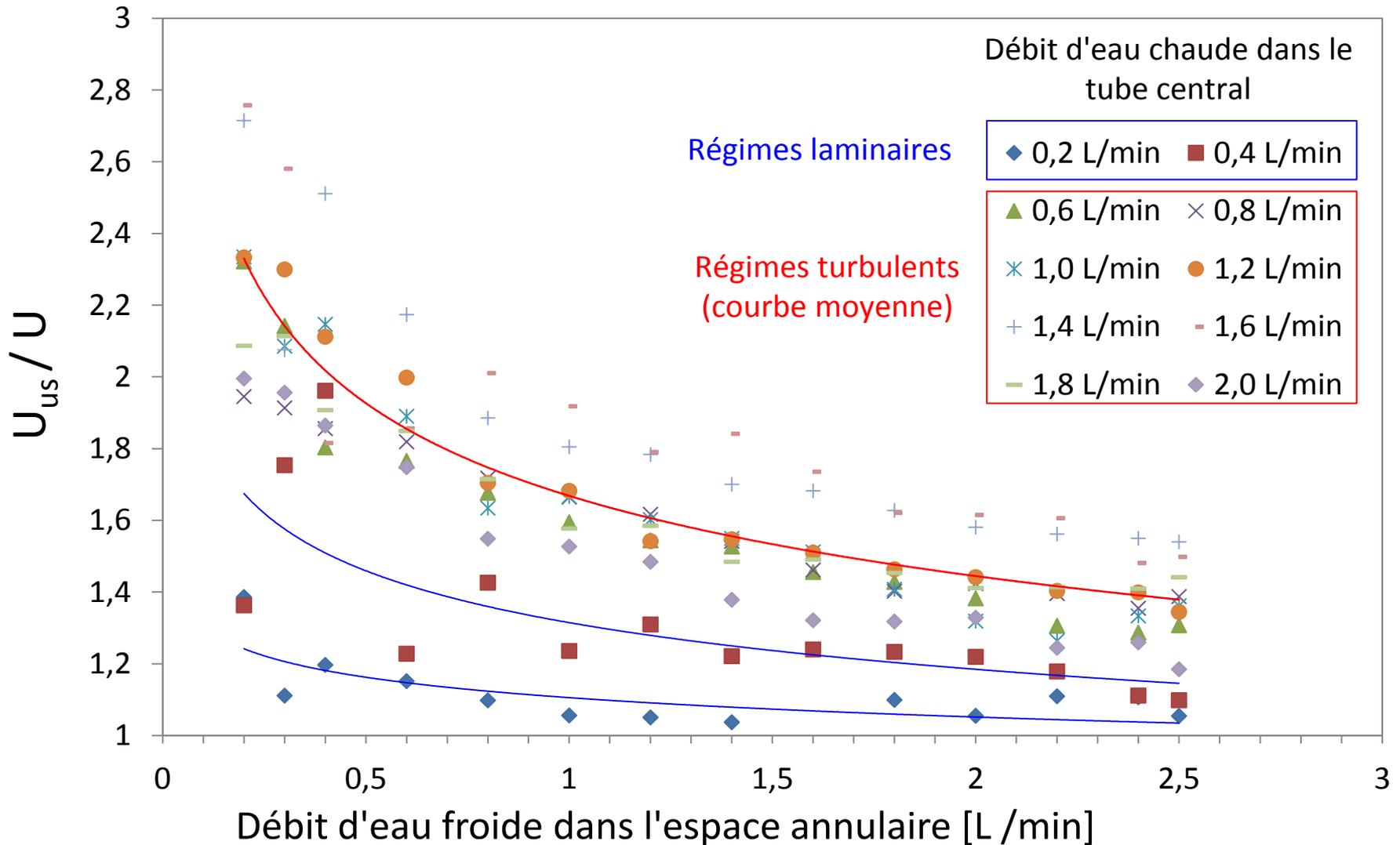
$$q_{ech\_us} = U_{us} A \Delta T_{lm\_us}$$

Calculé sur le fluide qui n'est pas directement soumis aux ultrasons

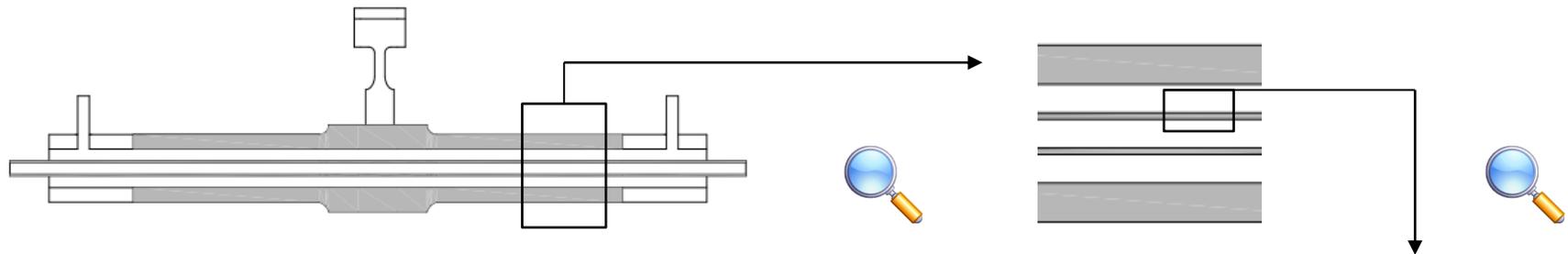
Calculé sur le fluide chaud ou froid (égaux)

$$q_{ech} = U A \Delta T_{lm}$$

# Facteurs d'intensification ( $U_{us}/U$ )



# Interprétation



	Without ultrasound	With ultrasound
Annulus side (laminar flow)	<p>Flow velocity profile</p> <p><math>R1</math></p>	<p>Acoustic cavitation &amp; vibrations</p> <p><math>R1_{us}</math></p> <p><math>R1 &gt; R1_{us}</math></p>
Internal pipe thickness	<p>Thermal conduction resistance (negligible)</p> <p><math>R2</math></p>	<p><math>R2_{us} = R2</math>: assumed unchanged</p> <p><math>R2_{us}</math></p>
Internal pipe side (turbulent flow)	<p>Thermal convection resistance <math>R3 &lt; R1</math></p> <p><math>R3</math></p> <p><math>q_{exc}</math></p>	<p><math>R3_{us} = R3</math>: assumed unchanged</p> <p><math>R3_{us}</math></p> <p><math>q_{exc US}</math></p> <p>→ Overall heat transfer coefficient increase</p>

# Plan

- Les ultrasons
- Contexte, littérature
- Échangeur de chaleur vibrant
  - Banc expérimental
  - Échangeur de chaleur
- Résultats
- **Perspectives**

# Expériences complémentaires

- Nature des effets responsables?
  - Vibrations
  - Cavitation acoustique
- Test sur tube encrassé
  - Effet préventif ?
  - Effet curatif ?
- Géométrie échangeur à plaques

# Projet PETRUS



**PETRUS :**  
**Prototype d'Echangeur**  
**de TRansfert sous UltraSons**



Merci pour votre attention

Merci pour votre invitation

Questions / remarques ?

