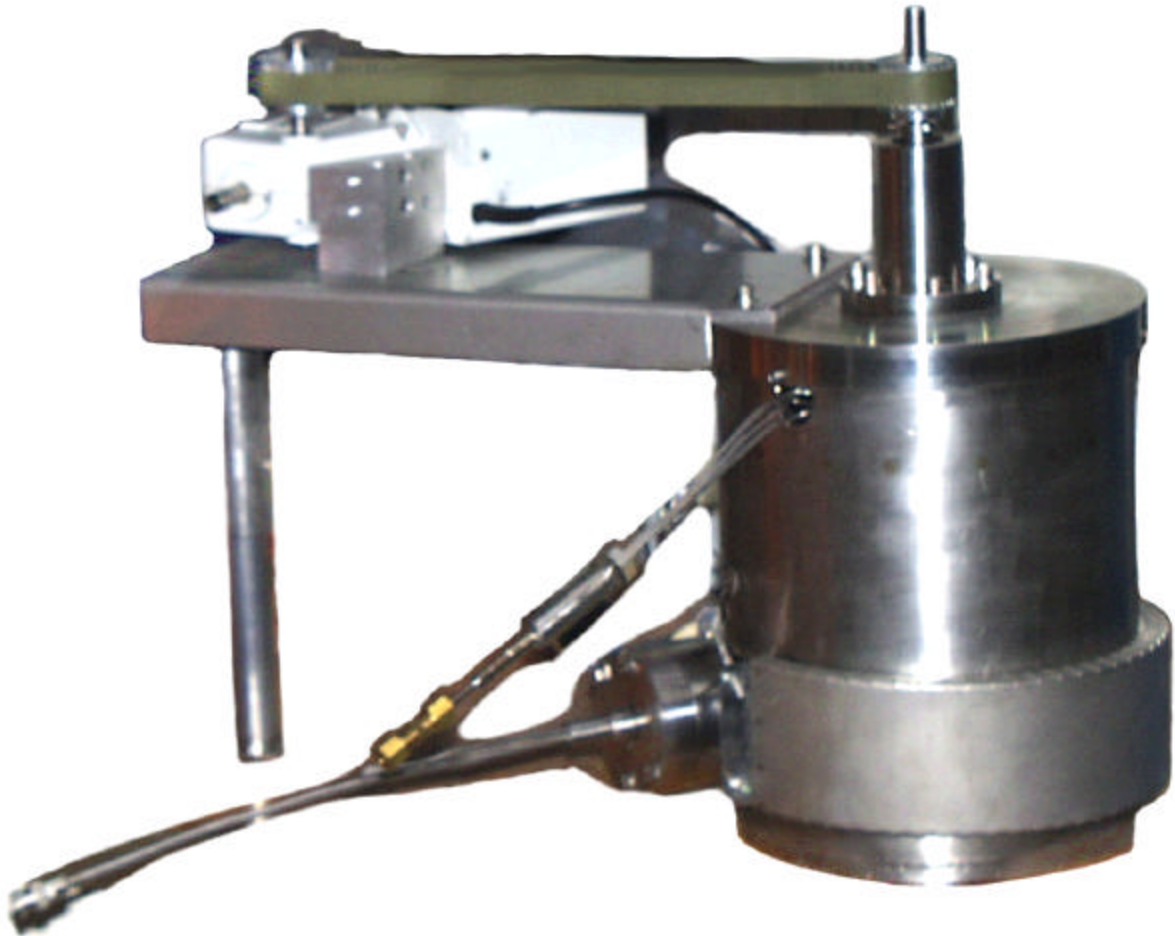


MESURE DE VITESSE DANS LE SODIUM PAR VELOCIMETRIE ULTRASONORE



**Cécile GASQUET, Damien ERICHER,
Arnaud CHIFFAUDEL**

CEA SACLAY
Service de Physique de l'Etat Condensé
Groupe Instabilités et Turbulence

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier chaleureusement François Daviaud d'avoir supervisé l'ensemble de cette étude.

Nous remercions Philippe Dardé et Flavio de Magistris de nous avoir permis d'effectuer les essais sodium au sein de leur laboratoire.

Nous remercions Jean-Baptiste Luciani d'avoir veillé à notre sécurité pendant les manipulations du sodium, pour son aide précieuse à la mise en place de l'expérience et d'avoir témoigné un si vif intérêt à la réussite de ce projet.

Les qualités d'organisation et le dévouement de Rémi Attard sur la gestion du projet à Cadarache sont ici soulignés et remerciés chaleureusement.

Nous remercions Vincent Padilla et Patrick Méninger pour la précision et la qualité de leur travail pour la réalisation de l'ensemble du dispositif expérimental.

Nous remercions Jean-Claude Attiach de l'entreprise TecFlow de nous avoir permis d'utiliser son appareil de vélocimétrie ultrasonore parfois dans des conditions extrêmes d'exploitation et pour ses conseils avisés sur l'adaptation des sondes.

Nous remercions vivement Philippe Ducret et Jean-Luc Berton de nous avoir permis d'utiliser leurs sondes à ultrason spécifiques au sodium sans lesquelles cette étude n'aurait pas pu être possible.

Nous remercions Louis Marié qui nous a permis d'étudier précisément la réponse des sondes à ultrasons ainsi que pour son aide à la compréhension de l'écoulement étudié.

Nous n'oublions pas Ange Pucci et Georges Margaillan pour l'ambiance et l'accueil chaleureux qu'ils nous ont apportés et nous les remercions de nous avoir fait partager leur passion et leur connaissance du sodium.

Nous remercions Patrice Peillon de l'entreprise FSP-one de nous avoir gracieusement offert du fil d'argent nécessaire à la création de nos joints d'étanchéité et de l'intérêt qu'il a témoigné à notre étude.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	2
1- INTRODUCTION	5
<i>1-1- PROBLEMATIQUE.....</i>	5
<i>1-2- ECOULEMENT DE VON KÁRMÁN.....</i>	6
1-2-1- VKS	6
1-2-2- VKE.....	6
2- VELOCIMETRIE ULTRASONORE	8
<i>2-1- Vélocimétrie ultrasonore à effet Doppler</i>	8
2-1-1- Onde ultrasonore.....	8
2-1-2- Interaction : onde ultrasonore / matière.....	8
<i>2-1-2-1- Absorption dans les milieux homogènes</i>	9
<i>2-1-2-2- Réflexions et Diffractions</i>	9
2-1-3- Effet Doppler	11
2-1-4- Principe de fonctionnement d'un vélocimètre ultrasonore	12
<i>2-2- Matériels utilisés</i>	13
2-2-1- Le DOP 2000	13
<i>2-2-1-1- La fréquence de répétition des impulsions (PRF).....</i>	14
2-2-2- Les sondes à ultrasons	14
<i>2-2-2-1- Les sondes commerciales</i>	14
<i>2-2-2-2- La sonde TUSHT (Transducteur à UltraSons Haute Température)</i>	15
3- DEMARCHE EXPERIMENTALE	17
<i>3-1- Ecoulement étudié : un demi écoulement de von Kármán.....</i>	17
3-1-1- Caractéristiques du montage	17
3-1-2- Hypothèse de la rotation solide	18
<i>3-2- Mesures de références en eau.....</i>	19
3-2-1- Hauteur minimale de liquide dans la cuve.....	19
3-2-2- Profils de vitesse avec une sonde commerciale Signal Processing.....	21
3-2-3- Profils de vitesse avec la sonde TUSHT	22
<i>3-3- Essais préparatoires en sodium</i>	24

3-3-1- Le Sodium et son utilisation.....	24
3-3-2- Dispositif expérimental.....	26
3-3-3- Protocole expérimental.....	26
3-3-4- Problèmes rencontrés	26
3-3-5- Vitesse du son.....	26
3-3-6- Effet Doppler : réponse à un obstacle mobile	28
3-3-7- Profil de vitesse.....	29
3-4- Protocole de la campagne de mesure en sodium	30
3-4-1- Conditions expérimentales	30
3-4-2- Dispositif expérimental.....	31
4- RESULTATS EN SODIUM.....	33
4-1- Mesures de l'écoulement.....	33
4-1-1- Profils de vitesse	33
4-1-2- Vers une plus grande profondeur de mesures	34
4-2- Qualités des mesures	34
4-2-1- Nombre de zéros de vitesse.....	35
4-2-2- Ecart-Type.....	35
4-3- Vitesse de rotation mesurée	36
4-3-1- Par rapport à la rotation de la turbine.....	36
4-3-2- Autres configurations étudiées	37
4-3-3- Reproductibilité et bilan.....	38
4-4- Comparaison avec l'eau.....	39
4-5- Perspectives	40
5- CONCLUSIONS.....	41
FIGURES.....	42
BIBLIOGRAPHIE.....	44
APPENDICE : CALCULS DES INCERTITUDES SUR LES MESURES DE VITESSE DU SON DANS LE SODIUM	45

1- INTRODUCTION

1-1- PROBLEMATIQUE

Le but de ce projet est d'étudier la possibilité de mesurer des profils de vitesse par vélocimétrie ultrasonore dans le sodium liquide. L'intérêt est d'adapter cette technique à l'expérience VKS (von Kármán Sodium) montée à Cadarache.

L'étude s'est réalisée en plusieurs étapes :

- des mesures dans une cuve en eau avec des particules de verres creuses de différents diamètres utilisées comme traceurs des ultrasons.
- des essais préparatoires et une campagne de mesures dans le sodium où les oxydes de sodium tiennent le rôle de traceurs des ultrasons.

Les mesures en eau ont été effectuées au CEA de SACLAY, DSM/DRECAM/SPEC (Direction des Sciences de la Matière/ Département de Recherche sur l'Etat Condensé, les Atomes et les Molécules/ Service de Physique de l'Etat Condensé) dans le Groupe Instabilités et Turbulence (GIT).

Les mesures en sodium ont été effectuées au CEA Cadarache, DEN / DER / STR (Direction de l'Energie Nucléaire / Département d'Etudes des Réacteurs / Service de Technologie des Réacteurs) dans le hall d'exploitation du LTTS (Laboratoire des Techniques du Traitement du Sodium).

1-2- ECOULEMENT DE VON KÁRMÁN

1-2-1- VKS

L'expérience VKS (von Kármán Sodium) est une collaboration entre le CEA et les Ecoles Normales Supérieures de Paris et de Lyon ayant pour but d'obtenir expérimentalement l'effet dynamo c'est à dire la création spontanée d'un champ magnétique par le mouvement d'un fluide conducteur d'électricité. Cet effet serait à l'origine du champ magnétique de la Terre. L'écoulement dit de von Kármán est le résultat de la mise en rotation de deux disques coaxiaux dans une cuve cylindrique. Le fluide conducteur utilisé est le sodium car il est l'un des meilleurs conducteurs de l'électricité ayant des propriétés hydrodynamiques proches de celles de l'eau. Le CEA possède une longue expérience de son exploitation. La figure 1 montre le schéma de l'expérience VKS installée à Cadarache.

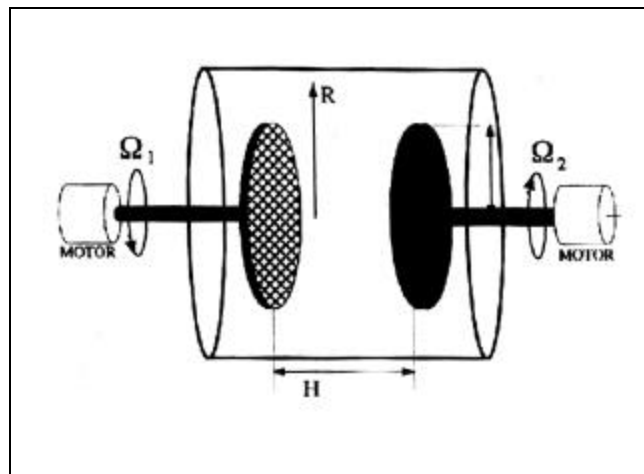


figure 1 : Schéma de l'expérience VKS

Caractéristiques :

- cuve en inox
- fluide : 70 litres de sodium liquide portés à 150°C
- diamètre de la cuve : $2R = H = 400$ mm
- distances entre les turbines : 400 mm
- puissance des moteurs : 2×75 kW
- fréquences de rotation : de 0 à 25 Hz

1-2-2- VKE

Pour étudier l'écoulement de von Kármán, une seconde expérience, constituée d'une cuve en Plexiglas et remplie d'eau, identique à celle en sodium mais à l'échelle $\frac{1}{2}$ est montée au CEA SACLAY. Ce montage nommé VKE (von Kármán Eau) permet d'étudier les caractéristiques du champ de vitesse. En effet, l'eau à 50°C possède les mêmes propriétés physiques (viscosité et densité) que le sodium à 150°C. Un code numérique permet de mesurer l'efficacité de l'entraînement du fluide vis à vis de l'effet Dynamo. Jusqu'à présent, les mesures de champs de vitesse sont réalisées par Vélocimétrie Laser Doppler (LDV). La cuve et le fluide étant transparents (eau et Plexiglas), cette technique de mesure est parfaitement adaptée pour permettre d'obtenir les

champs de vitesse toroïdaux et axiaux. La figure 2 schématise l'expérience VKE et le système de LDV.

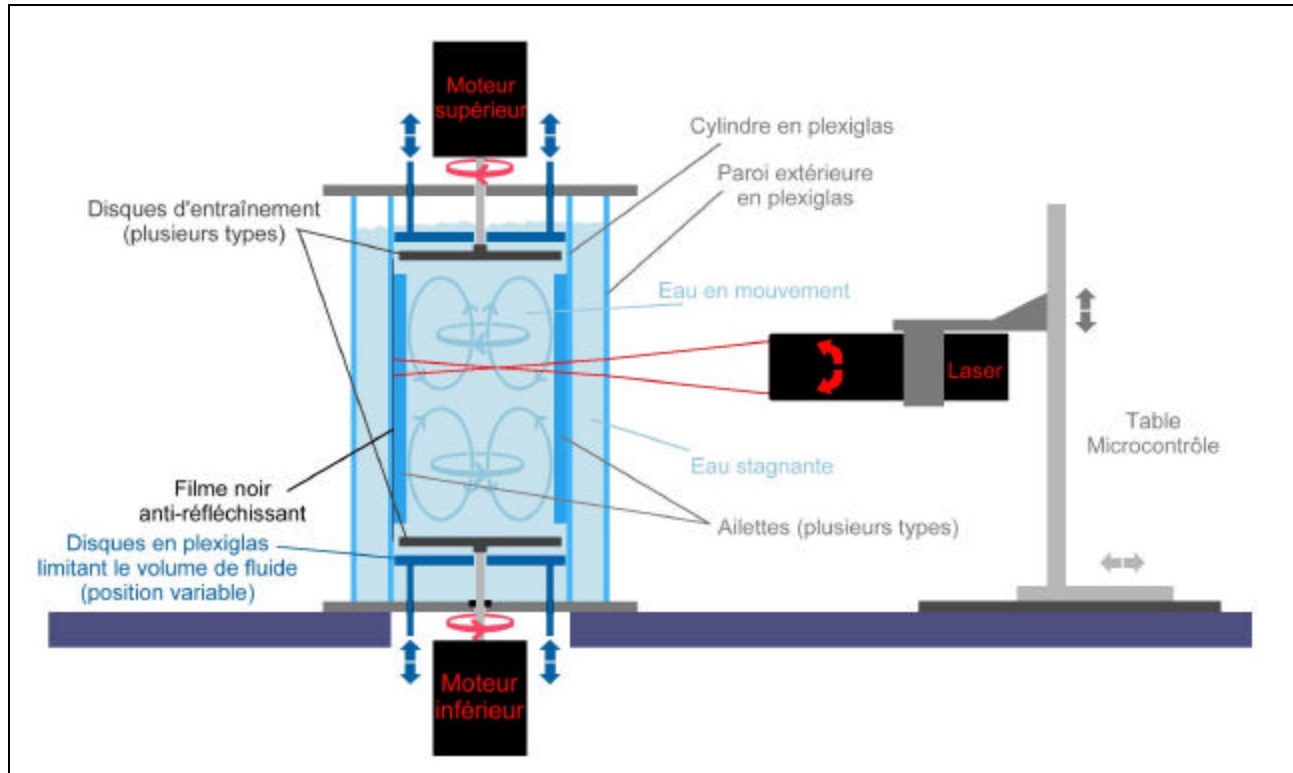


figure 2 : Schéma de VKE avec le système de Vélocimétrie Laser Doppler

Mesurer des profils de vitesses dans VKS par LDV est impossible car le fluide utilisé, le sodium, est opaque. De plus, la LDV ne mesurant la vitesse qu'en un point, pour obtenir un profil complet, le laser doit être déplacé en chaque point de mesure.

2- VELOCIMETRIE ULTRASONORE

Le choix de la mesure des champs de vitesse dans l'expérience Sodium s'est tout naturellement porté sur la technique de la vélocimétrie ultrasonore. Cette technique permet en effet de traverser une paroi ou un fluide opaque et de mesurer directement un profil de vitesse complet dans l'axe de la sonde à ultrasons.

2-1- Vélocimétrie ultrasonore à effet Doppler

La technique des ultrasons possède des applications étendues mais limitées à des milieux peu contraignants. Dans le domaine médical, par exemple, les ultrasons sont principalement utilisés pour réaliser des mesures d'échos (échographie) combinés parfois à des mesures de vitesse par effet Doppler (flux sanguins dans les cavités du cœur). Les appareils utilisant cette technique sont constitués de matériaux et de systèmes électroniques très fragiles restreignant leur utilisation parfaitement maîtrisée dans des fluides à température ambiante.

Ce chapitre décrit les phénomènes physiques sur lesquels se base un appareil de vélocimétrie ultrasonore utilisant le principe de l'effet Doppler.

2-1-1- Onde ultrasonore

L'onde ultrasonore est une onde de pression se propageant dans un milieu élastique. Il s'agit de la propagation d'une énergie mécanique dans un milieu matériel (ce déplacement ne peut se faire dans le vide à la différence des ondes électromagnétiques). Le milieu de propagation de l'onde ultrasonore est soumis à une succession de surpressions et de dépressions et ses particules constitutives sont alors animées d'un mouvement de va-et-vient dans l'axe de déplacement des ultrasons comme illustré sur la figure 3.

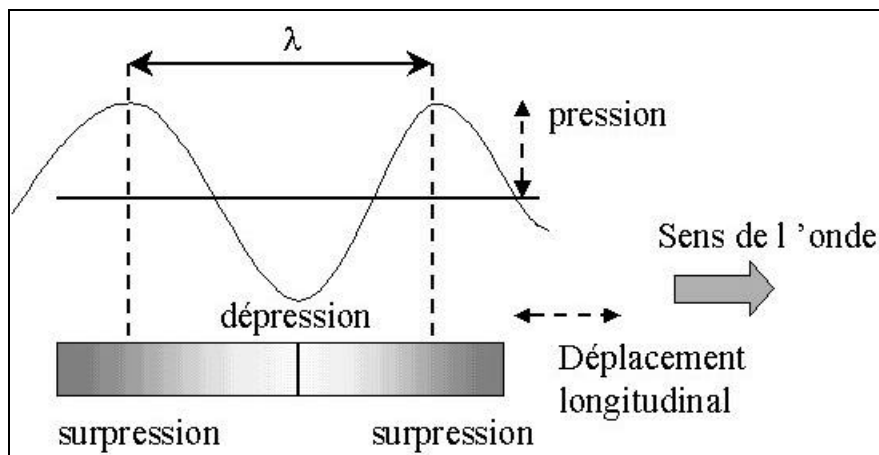


figure 3 : Schéma d'une onde ultrasonore

2-1-2- Interaction : onde ultrasonore / matière

Les ondes ultrasonores, concentrées sous forme de faisceaux vont interagir avec la matière qu'elles traversent. Plusieurs phénomènes aboutissent à leur atténuation :

- une absorption dans les milieux homogènes

- des réflexions, réfractions et diffusion aux changements de milieux

2-1-2-1- Absorption dans les milieux homogènes

En se propageant, l'onde ultrasonore cède une partie de son énergie au milieu qu'elle traverse. L'intensité du faisceau d'ondes diminue : c'est l'absorption de l'énergie ultrasonore (voir figure 4).

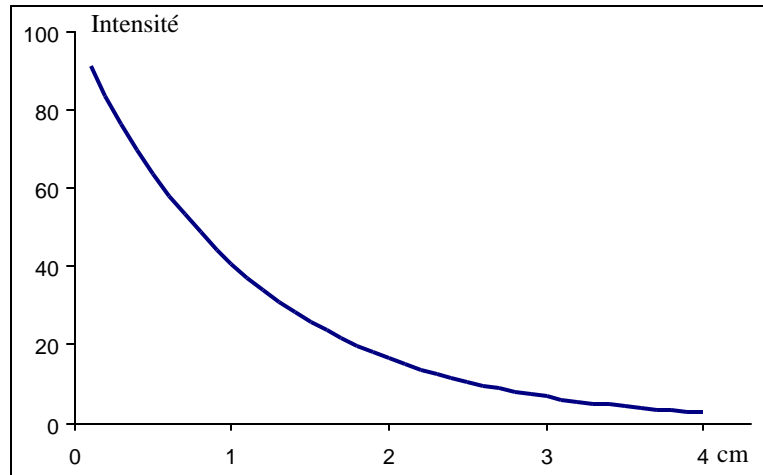


figure 4 : Absorption des ultrasons dans la matière

Cette absorption est liée essentiellement à des mécanismes de conduction thermique et de viscosité étroitement dépendants de la fréquence de l'onde. En effet, les fréquences élevées provoquent de très nombreuses vibrations qui favorisent le transfert d'énergie. L'absorption obéit à une loi exponentielle décroissante :

$$I = I_0 \cdot e^{-a \cdot x}$$

avec

$I \text{ (W.m}^{-2}\text{)}$:	l'intensité à la distance x
$I_0 \text{ (W.m}^{-2}\text{)}$:	l'intensité initiale
$a \text{ (m}^{-1}\text{)}$:	le coefficient d'absorption
$x \text{ (m)}$:	la distance à la source

L'intensité ultrasonore décroît plus rapidement dans les premiers centimètres. Le coefficient d'absorption définissant le pouvoir de pénétration des ultrasons est proportionnel au carré de la fréquence ultrasonore :

$$a = Kf^2$$

avec

$a \text{ (m}^{-1}\text{)}$:	le coefficient d'absorption
$K \text{ (s}^2 \cdot \text{m}^{-1}\text{)}$:	constante caractéristique
$f \text{ (s}^{-1}\text{)}$:	la fréquence ultrasonore

2-1-2-2- Réflexions et Diffractions

Lorsqu'une onde ultrasonore atteint perpendiculairement une interface, une partie de son énergie est réfléchiée et un écho ultrasonore se forme comme l'illustre la figure 5.

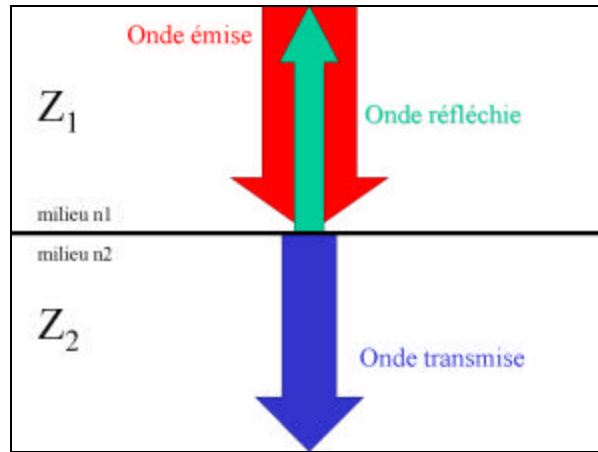


figure 5 : Transmission et réflexion des ultrasons perpendiculaires à l'interface

L'importance relative de l'intensité de cet écho par rapport à l'onde incidente dépend de l'interface :

$$R = \frac{I_r}{I_i} = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2$$

avec

R :	le coefficient de réflexion
I_i (W.m^{-2}) :	l'intensité incidente
I_r (W.m^{-2}) :	l'intensité réfléchie
Z_1 ($\text{kg. (m}^2\text{.s}^{-1}\text{)})$:	l'impédance acoustique du milieu 1
Z_2 ($\text{kg. (m}^2\text{.s}^{-1}\text{)})$:	l'impédance acoustique du milieu 2

sachant que

$$Z_n = \rho_n c_n$$

avec

ρ_n (kg.m^{-3}) :	la masse volumique d'un milieu
c_n (m.s^{-1}) :	la vitesse de propagation du son dans un milieu

Quand l'interface n'est pas perpendiculaire à l'onde ultrasonore, l'onde réfléchie ne repart pas vers la source et l'onde transmise est déviée par rapport à l'onde incidente. L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence comme le montre la figure 6.

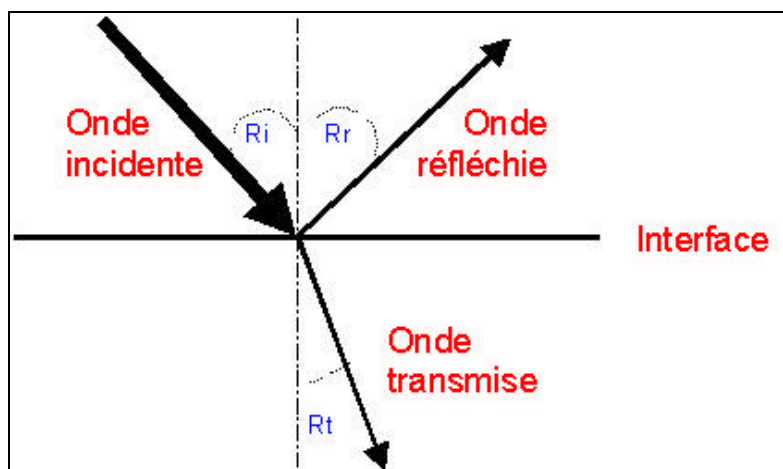


figure 6 : Transmission et Réfraction des ultrasons non perpendiculaires à l'interface

Les ultrasons obéissent aux lois optiques. La réfraction peut être interprétée à l'aide du concept des ondes élémentaires d'Huygens. De chaque point de l'interface touchée par le front d'ondes incident part un ensemble d'ondes élémentaires qui forment un nouveau front d'ondes comme le schématise la figure 7.

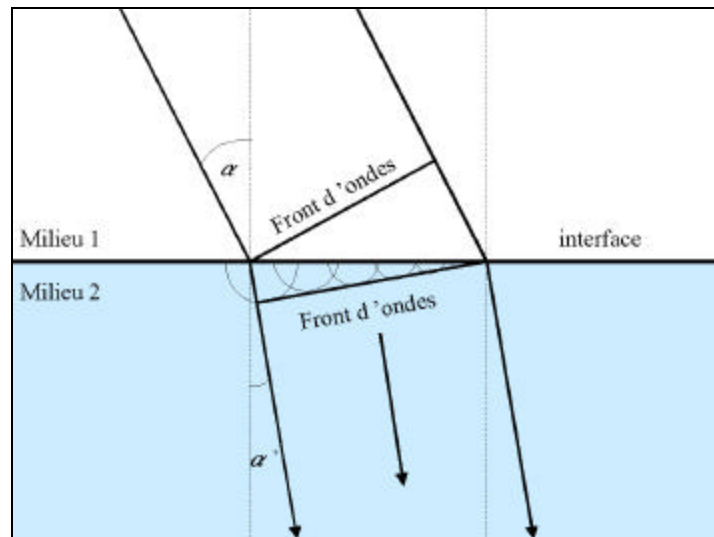


figure 7 : Réfraction des ultrasons

L'angle α' du rayon réfracté peut être déduit de la relation suivante :

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \alpha'} = \frac{c_1}{c_2}$$

avec

- α : angle du front d'ondes incident
- α' : angle du front d'ondes réfracté
- c_1 (m.s⁻¹) : la vitesse de propagation du son dans le milieu 1
- c_2 (m.s⁻¹) : la vitesse de propagation du son dans le milieu 2

2-1-3- Effet Doppler

L'effet Doppler est la variation de la fréquence d'une onde acoustique ou électromagnétique. Il résulte du mouvement entre l'émetteur et le récepteur. Considérons un transducteur ultrasonore émettant des ondes de fréquence f_e et étant immobile dans un milieu dans lequel la vitesse du son est donnée par la valeur c . Un récepteur, ou cible, se déplace dans le même milieu avec la vitesse v . Par convention, v est considérée comme négative quand la cible se déplace vers le transducteur. Si la trajectoire de la cible forme un angle θ avec l'axe de propagation de l'onde ultrasonore, la fréquence f_g de l'onde perçue par la cible est :

$$f_g = f_e \pm \frac{f_e v \cos \theta}{c}$$

La cible agissant comme une variation de la densité du milieu, les ondes sont partiellement réfléchies. Ainsi la cible joue le rôle de source mobile passive de signaux ultrasonores. La fréquence f_r des ondes réfléchies par la cible mesurée par le transducteur stationnaire est :

$$f_r = f_g \frac{c}{c \pm v \cos \theta}$$

En combinant les deux équations précédentes, la fréquence du signal reçue par le transducteur est :

$$f_r = \frac{(c \pm v \cos \theta)}{(c \mp v \cos \theta)} f_e$$

L'équation peut être simplifiée en considérant que la vitesse de la cible est bien plus faible que la vitesse du son ($v \ll c$). La différence entre les fréquences des signaux émis et reçus est obtenue en employant le développement limité et en négligeant les termes d'ordre supérieurs à deux. Cette fréquence résultante est appelée « fréquence Doppler ». Elle est donnée par l'équation suivante :

$$f_d = \pm \frac{2f_e v \cos \theta}{c}$$

L'angle Doppler, la vitesse du son, les fréquences d'émission et Doppler étant connus par l'appareil de vélocimétrie, la valeur de la vitesse est donnée par la relation suivante :

$$v = \frac{f_d c}{2f_e \cos \theta}$$

Par convention, la vitesse est positive lorsque la cible s'éloigne de l'émetteur.

2-1-4- Principe de fonctionnement d'un vélocimètre ultrasonore

L'analyse des échos d'une cible permet de déterminer à la fois la localisation et la vitesse de cette cible. En connaissant le temps entre les signaux émis et reçus ainsi que la vitesse c de l'onde dans le milieu traversé, il est possible de connaître la distance entre le transducteur et la cible. Un profil de vitesse est ainsi obtenu dans l'axe de tir du transducteur.

Le principe de la mesure de vitesse d'une cible est illustré par la figure 8.

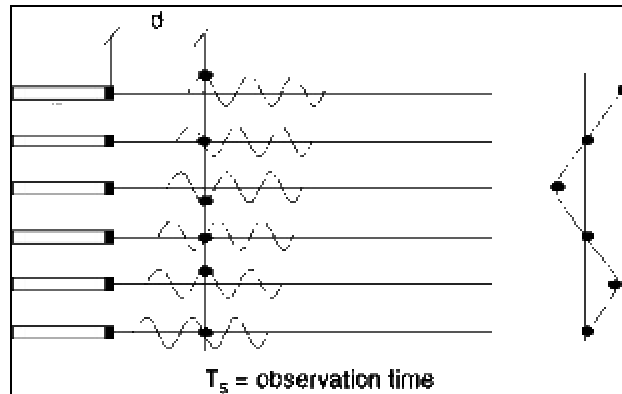


figure 8 : Principe de mesure de vitesse par ultrason

Au fur et à mesure que la cible se déplace, le temps T_v entre l'émission des ondes ultrasonores et la réception de l'écho de la cible diminue ($T_v = 2d/c$). Si, au lieu de suivre l'évolution de ce temps, on

examine l'amplitude du signal reçu après un temps fixe T_s suivant l'émission de l'impulsion, dans le cas idéal, une évolution sinusoïdale des amplitudes des échantillons mesurés aux instants $t_n = nT_{prf} + T_s$ est obtenue (n étant entier et T_{prf} étant la période de répétition des impulsions ultrasonores). Ceci n'est évidemment valable que si le temps de mesure T_s se situe entre le début et la fin de l'écho correspondant à l'impulsion émise. Le principe est le même dans un montage utilisant un stroboscope et un disque en rotation marqué d'un repère. Si la fréquence de rotation du disque est supérieure à celle du stroboscope, un observateur aura l'impression d'un déplacement plus lent du repère.

La fréquence Doppler est reconstruite à partir d'échantillons séparés par T_{prf} . Les appareils à émission pulsée sont soumis au théorème de Shannon et ne peuvent donc pas mesurer des fréquences Doppler supérieures à la moitié de la fréquence des ultrasons. Ils ont également une limite de la profondeur mesurée déterminée par le temps maximum d'un aller-retour de l'impulsion ultrasonore. Ce temps est fixé par la fréquence de répétition des ultrasons donnant une profondeur maximum d'analyse :

$$P_{\max} = \frac{T_{prf} \cdot C}{2}$$

Une diminution de la fréquence de répétition repousse la limite en profondeur mais réduit la valeur de la fréquence Doppler maximum mesurable. Vitesse et profondeur maximum sont reliées par la relation suivante :

$$P_{\max} \cdot V_{\max} = \frac{c^2}{8f_e \cos q}$$

2-2- Matériels utilisés

Pour faire des mesures de vitesses par vélocimétrie ultrasonore, il faut un émetteur/récepteur d'ultrasons (une sonde ou un transducteur) et un appareil de mesures adapté permettant de traiter l'information ultrasonore résultante (DOP 2000).

2-2-1- Le DOP 2000

Le vélocimètre DOP 2000 de Signal Processing SA / TecFlow est un appareil permettant de traiter des signaux ultrasonores. Il a été mis au point dans le but de répondre aux demandes de centres de recherche sur l'hydrodynamique et d'entreprises de production désireuses de maîtriser des débits de fluide. Cet appareil est branché à une sonde émettant et recevant des ultrasons. Il permet de fixer n'importe quelle fréquence d'émission de la sonde au Hertz près. Le principe de fonctionnement du vélocimètre est illustré sur la figure 9 :

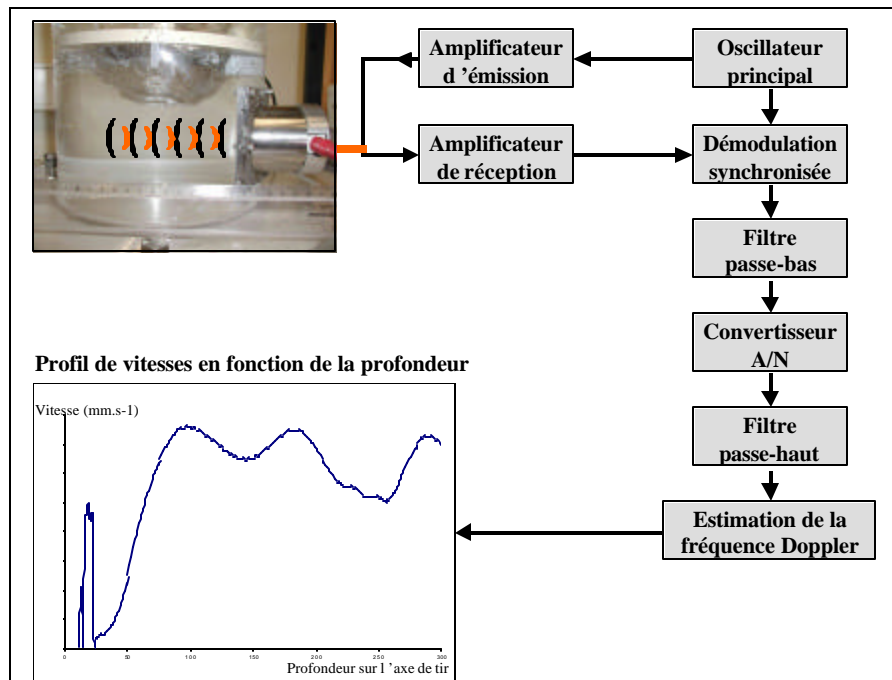


figure 9 : Principe de fonctionnement du velocimètre ultrasonore

Le signal provenant de l'oscillateur principal génère l'impulsion d'émissions nécessaires à l'obtention de la fréquence de répétition synchrone des impulsions ultrasonores. L'amplification du signal d'écho est augmentée proportionnellement à la profondeur afin de compenser l'atténuation des ondes. Après avoir été amplifié, le signal d'écho est démodulé puis filtré afin d'isoler l'information Doppler. Enfin un filtre passe-bas supprime les artefacts dans le spectre généré par la démodulation. Le signal Doppler est ensuite échantillonné puis traverse un convertisseur analogique / digital rapide. Le temps entre chaque acquisition détermine la résolution spatiale entre chaque volume d'échantillons tandis que le temps entre l'émission et la réception détermine la distance du volume d'étude. Le signal issu du convertisseur est mémorisé puis filtré par un filtre passe-haut éliminant les composantes stationnaires et quasi-stationnaires. La fréquence du signal Doppler est ensuite calculée. Le résultat peut alors être utilisé pour déterminer la vitesse.

2-2-1-1- La fréquence de répétition des impulsions (PRF)

L'un des paramètres importants du velocimètre DOP 2000 est la PRF (Pulse Repetition Frequency). Ce paramètre est le temps entre deux émissions d'ultrasons par la sonde. Il conditionne la profondeur maximum mesurable. Dans le velocimètre, la PRF est exprimée en μs . L'appareil est capable de produire différentes PRF et ainsi de mesurer à différentes profondeurs maximum. Pour éviter les parasites dans les signaux de retour, la PRF doit être inférieure au temps nécessaire aux ultrasons pour faire un aller-retour.

2-2-2- Les sondes à ultrasons

Pour cette étude, deux types de sondes ont été utilisés : des sondes disponibles dans le commerce et des sondes sodium développées au CEA.

2-2-2-1- Les sondes commerciales

Les sondes Signal Processing sont spécialement conçues pour travailler jusqu'à des températures de 150 °C et permettent d'acquérir des profils de vitesse dans différents fluides plus ou moins visqueux

(eau, yaourt, chocolat...). Malheureusement, les composants de ces sondes ne supportent pas l'environnement sodium (température d'exploitation supérieure à 150°C et risque d'oxydation).

2-2-2-2- La sonde TUSHT (Transducteur à UltraSons Haute Température)

Dans les Réacteurs à Neutrons Rapides (RNR), le cœur du réacteur est rempli de sodium utilisé comme fluide caloporteur. Des instruments ultrasonores TUSHT ont été développés par le Service de Technologie des Réacteurs. Utilisées lors de la période d'activité de Super Phénix, ces sondes sont initialement destinées à des mesures d'échométrie (localisation d'outils ou de pièces, mesures de niveau...) et à la détection de bruits naturels (cavitation et fuites de sodium). La température de fonctionnement dans les RNR peut atteindre 600°C, ce matériel est donc tout à fait adapté à l'environnement sodium de VKS. La difficulté réside dans le fait qu'aucune mesure de vitesse n'a été testée avec ces sondes dont les fréquences d'émission des ultrasons ne sont, de plus, pas précisément déterminées.

Le chapitre suivant s'efforcera de répondre à la question suivante : Peut-on associer la sonde TUSHT avec le DOP 2000 pour acquérir des profils de vitesse par vélocimétrie ultrasonore ?

Pour cela, il faut d'abord connaître exactement la fréquence d'émission des ultrasons propre à la sonde TUSHT. Pour mesurer cette fréquence, un montage schématisé sur la figure 10 est réalisé pour balayer les fréquences et observer la réponse du transducteur.

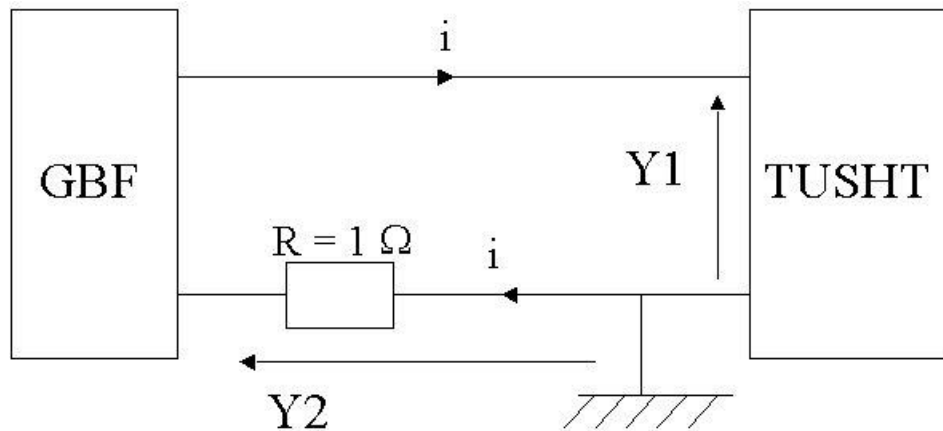


figure 10 : Schéma du montage permettant de déterminer la fréquence d'émission propre à la sonde à ultrason TUSHT

La tension Y1 permet de mesurer la tension d'excitation envoyée aux bornes de la sonde par un Générateur Basse Fréquence (GBF). La tension Y2 est proportionnelle au courant consommé par le circuit. Lorsque la fréquence d'excitation atteint la fréquence de résonance de la sonde, la courbe de Lissajou (Y2 fonction de Y1 sur l'oscilloscope), se désaxe.

Le graphe de la figure 11 représente six ellipses obtenues par simulation numérique calculant à des fréquences d'excitation différentes les courbes obtenues sur l'oscilloscope. Les courbes bleues sont le résultat de fréquences inférieures à la fréquence de la sonde, les courbes vertes obtenues pour des fréquences supérieures. La courbe rouge est l'ellipse obtenue lorsque la fréquence du GBF est égale à la fréquence de la sonde. La courbe noire représente le sommet de chacune des ellipses. La croix noire est le sommet de l'ellipse pour laquelle la fréquence de résonance est atteinte. Par cette méthode, la fréquence d'émission de la sonde TUSHT est estimée à 1.575 MHz et sera considérée par la suite comme sa fréquence de résonance propre. La sonde a également réagi mais de façon moindre à la fréquence 2.92 MHz.

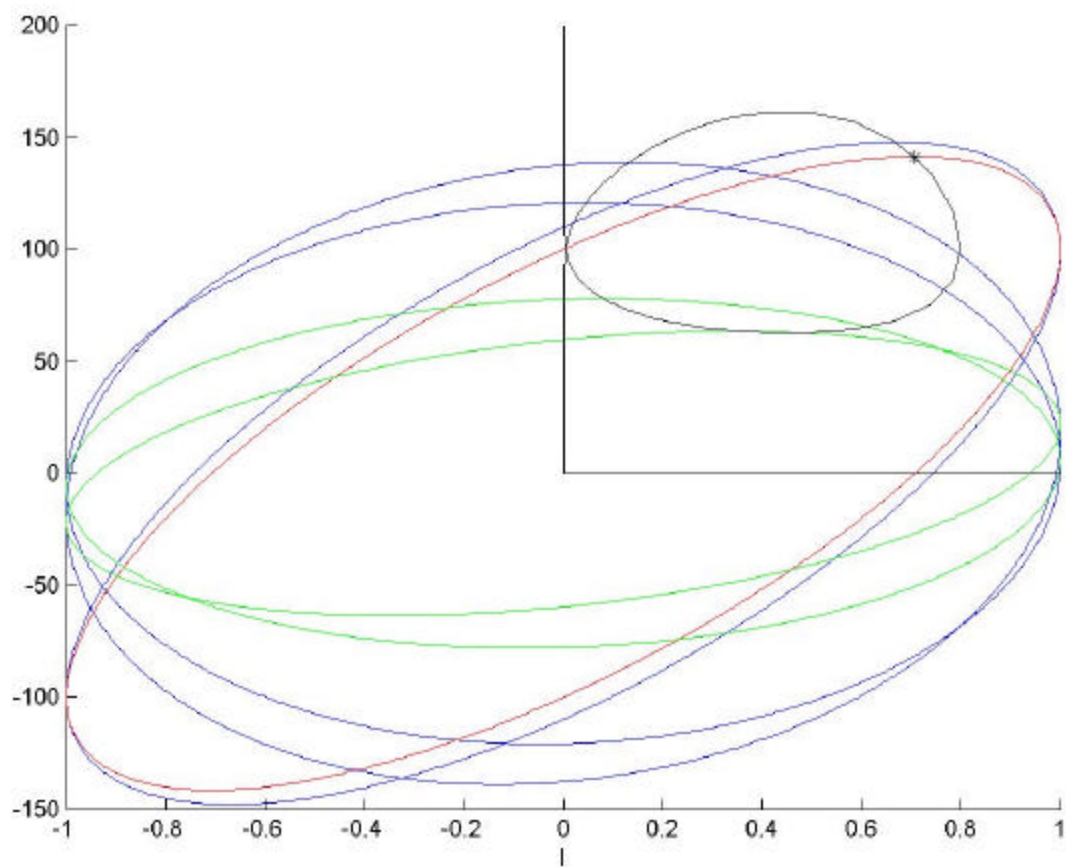


figure 11 : Résultats sous Matlab des courbes de Lissajou obtenues pour différentes fréquences d'excitation

3- DEMARCHE EXPERIMENTALE

De nombreuses équipes travaillent à la mise au point de techniques de vélocimétrie dans les métaux liquides. La principale technique utilisée est la vélocimétrie ultrasonore [Takeda 1999] technique relativement légère d'emploi, mais on peut mentionner aussi la radiographie neutronique [Takenaka et al. 1996].

La vélocimétrie ultrasonore est un enjeu intéressant pour l'étude de l'ensemble des métaux liquides. Elle a été appliquée avec succès au mercure à température ambiante [Takeda 1987, 2002], au Gallium liquide [Brito et al. 2001] et plusieurs groupes travaillent également à l'implémenter de diverses façons dans le sodium liquide vers 100-150°C [Brito et al. 2001, Eckert et Gerbeth 2002].

Les industriels aimeraient pouvoir l'utiliser dans le plomb-bismuth, fluide dans lequel la mesure de débits est peu précise et à plus long terme dans les métaux fondus à très haute température pour lesquels on dispose de peu de moyens d'investigation.

Les techniques employées dans le sodium par Brito et al. [2001] et Eckert et Gerbeth [2002] utilisent une sonde Signal Processing résistant à 150°C. Les premiers font pénétrer le faisceau ultrasonore au travers de la paroi d'inox de l'expérience avec un liquide de couplage, tandis que les seconds la remplacent par une paroi adaptée entourant la sonde ainsi partiellement immergée.

La spécificité de notre approche consiste à immerger une sonde TUSHT dans le fluide afin de limiter les effets de transmission par les parois, particulièrement délicats à contrôler dans le cas du couple sodium/inox. Un avantage subséquent est la possibilité de travailler à des températures plus élevées car la sonde TUSHT employée supporte au moins 600°C, limite bien supérieure à celle des meilleures sondes ultrasonores commercialisées.

3-1- Ecoulement étudié : un demi écoulement de von Kármán

La stratégie mise en œuvre ici consiste à réaliser une expérience modèle dont l'écoulement est simple à étudier. Des essais en eau sont effectués afin d'obtenir des mesures de référence avec une sonde Signal Processing et une sonde TUSHT ainsi calibrée. Ces essais sont suivis de mesures dans le sodium avec la sonde TUSHT.

Une nouvelle expérience, dont l'écoulement est connu, a été réalisée pour vérifier la possibilité de mesurer des profils de vitesses et d'adapter le principe sur l'expérience VKS.

3-1-1- Caractéristiques du montage

La figure 12 présente le schéma du montage. La partie gauche est une vue de dessus, la partie droite une vue de côté.

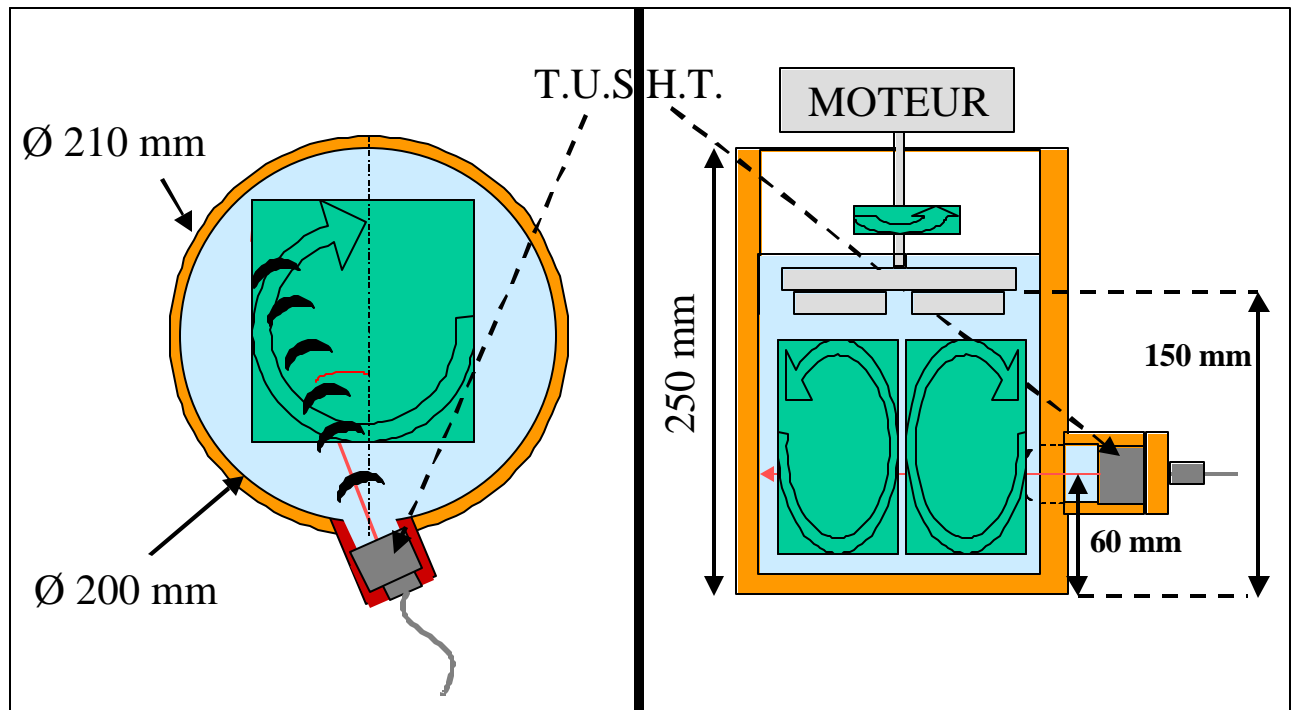


figure 12 : Schéma de l'écoulement de base étudié : écoulements primaire (rotation d'ensemble) et secondaire (aspiration par la turbine)

Caractéristiques :

- cuve cylindrique en cuivre:
 - hauteur : 250 mm
 - diamètre intérieur : 200 mm
- sonde à ultrasons :
 - TUSHT
 - axe de tir :
 - forme un angle de 25° avec le diamètre
 - fixé à 60 mm du fond de la cuve
- fréquence de rotation de la turbine : jusqu'à 4 Hz
- turbine en inox :
 - disque plat de 180 mm de diamètre situé à 60 mm du fond de la cuve
 - 4 pales droites :
 - hauteur : 20 mm
 - longueur : 75 mm
 - épaisseur : 5.5 mm

3-1-2- Hypothèse de la rotation solide

Une quantité déterminée de fluide, contenue dans une cuve cylindrique, est entraînée par une turbine constituée de 4 pales droites. Cette configuration constitue un demi écoulement de von Kármán simple à étudier où l'hypothèse de la rotation solide peut être envisagée en première approximation. Le schéma de la figure 13 illustre le calcul du champ de vitesse dans l'axe de la sonde.

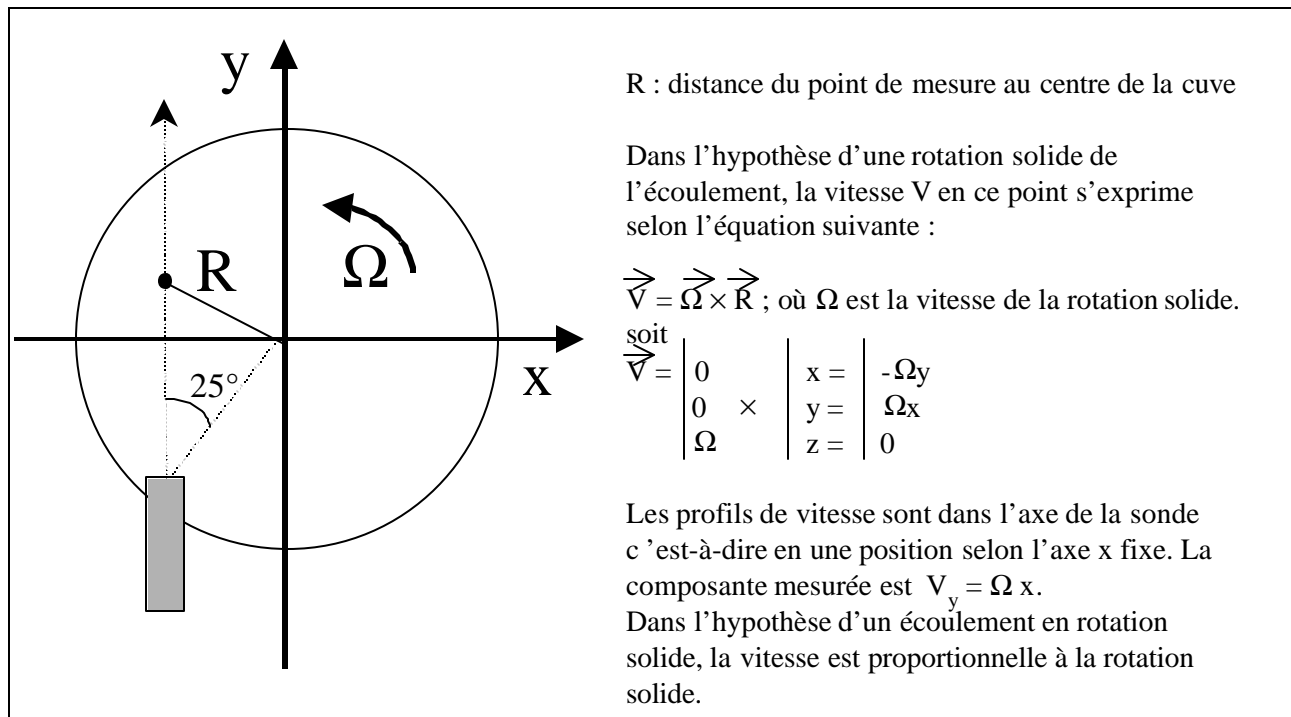


figure 13 : Calcul du champ de vitesse dans l'écoulement de base dans l'hypothèse d'une rotation solide

Dans l'hypothèse d'une rotation solide de l'écoulement, la vitesse mesurée dans l'axe de tir de la sonde est proportionnelle à la vitesse de la rotation solide. La sonde, en contact avec le fluide, est placée à 25° par rapport au centre de la cuve afin d'éviter les réflexions sur le fond de la cuve et afin d'éviter de mesurer une vitesse nulle. Dans cette configuration, la mesure ne se fera qu'à une seule hauteur (60 mm), le support de sonde étant soudé à la cuve et n'étant pas réglable.

En plus de ce mouvement azimutal, la turbine aspire du fluide vers le haut sur son axe et produit un vortex annulaire schématisé sur la figure 12. La contribution de cet écoulement secondaire à la vitesse sur l'axe de visée est quasiment négligeable.

3-2- Mesures de références en eau

Les essais en eau ont été réalisés au SPEC du CEA Saclay. Pour que les sondes puissent mesurer une vitesse, il faut que des particules, entraînées par le fluide, réfléchissent les ultrasons. Pour les essais de référence avec la sonde Signal Processing, les traceurs d'ultrasons utilisés sont des particules de verre creuses de diamètre compris entre 80 et 200 μm .

3-2-1- Hauteur minimale de liquide dans la cuve

Si la hauteur de liquide dans la cuve n'est pas suffisante, il se forme une zone de bulles d'air sous la turbine. La figure 14 montre les profils de vitesse réalisés avec différentes hauteurs d'eau à vitesse du moteur constante. Pour une hauteur de fluide inférieure à 10 cm, la turbine est trop haute et n'entraîne pas le fluide. Au delà de 13 cm de fluide, les profils moyens sont constants. Entre 10 et 13 cm de fluide, la turbine aspire de l'air qui forme une zone de cavitation au centre des pales. Ce phénomène s'observe par des profils de vitesse à deux bosses (appelé familièrement « le chameau »).

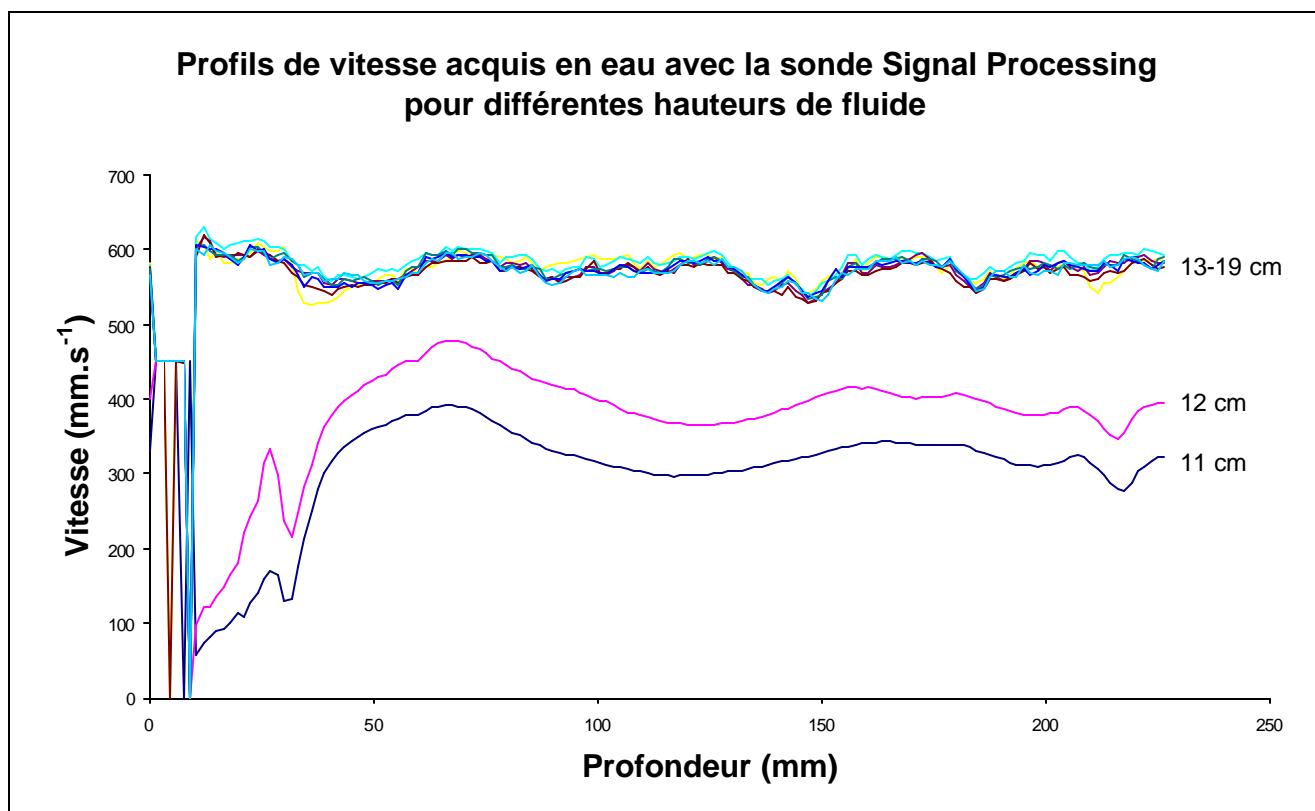


figure 14 : Ecoulement en eau ; profils de vitesse obtenus pour différentes hauteurs de fluide

La création de la zone de cavitation fait baisser la valeur moyenne de la vitesse. En traçant cette valeur en fonction de la hauteur d'eau, la détermination de la hauteur optimale à la disparition de ce phénomène est plus facile. La figure 15 représente la vitesse moyenne des profils précédents en fonction de la hauteur d'eau.

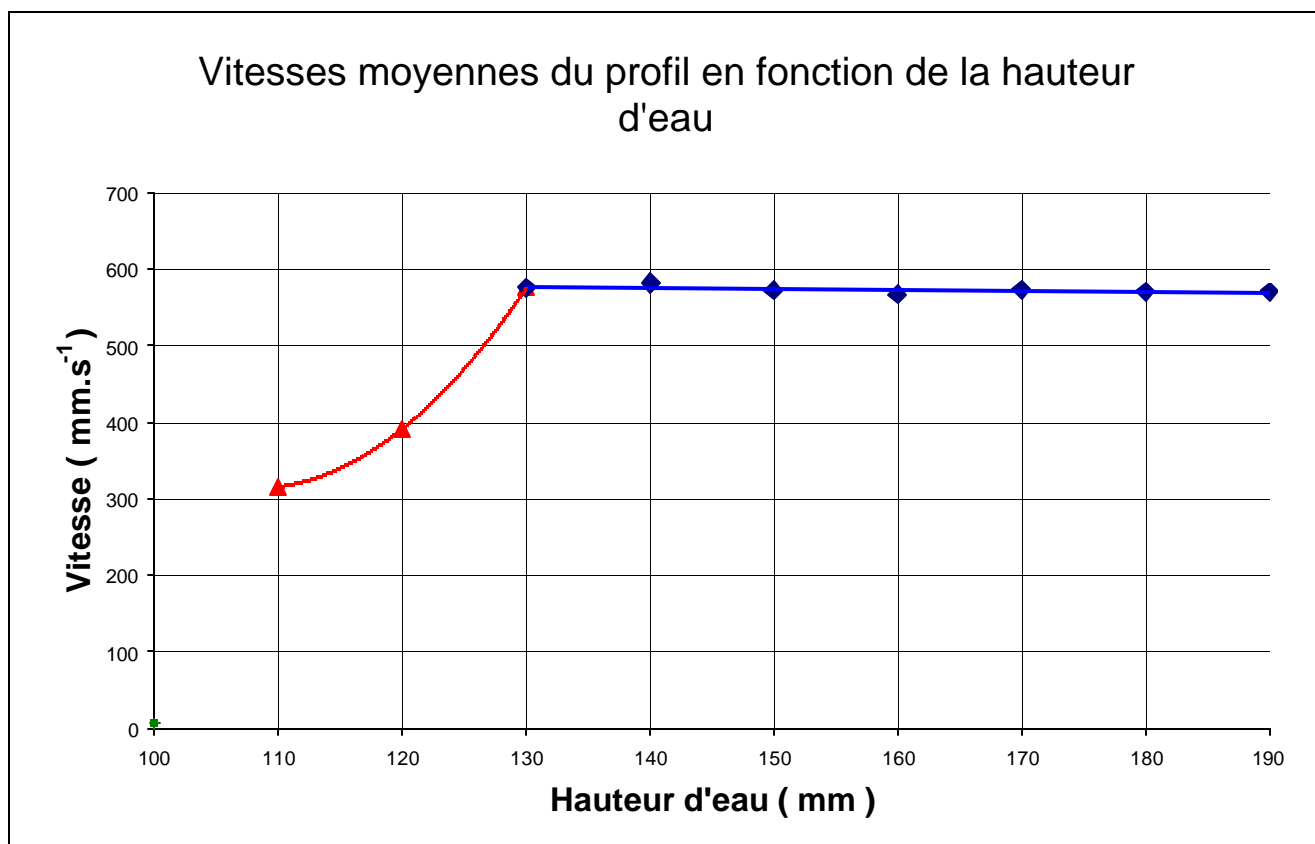


figure 15 : Ecoulement en eau ; détermination de la hauteur minimale de fluide nécessaire pour éviter une zone de cavitation

Pour être sûr de ne pas être gêné par le phénomène de cavitation lors des mesures de vitesse, la hauteur de fluide est fixée à 3 cm au dessus de la limite obtenue expérimentalement soit 16 cm. Cette hauteur correspond à un volume de fluide de 5 litres.

3-2-2- Profils de vitesse avec une sonde commerciale Signal Processing

Une série de mesures a été réalisée avec une sonde commerciale Signal Processing. Les courbes de la figure 16 montrent l'ensemble des profils acquis pour différentes vitesses de rotation de la turbine. Cette série permet d'obtenir des mesures quantitatives de profils de vitesse qui serviront de référence.

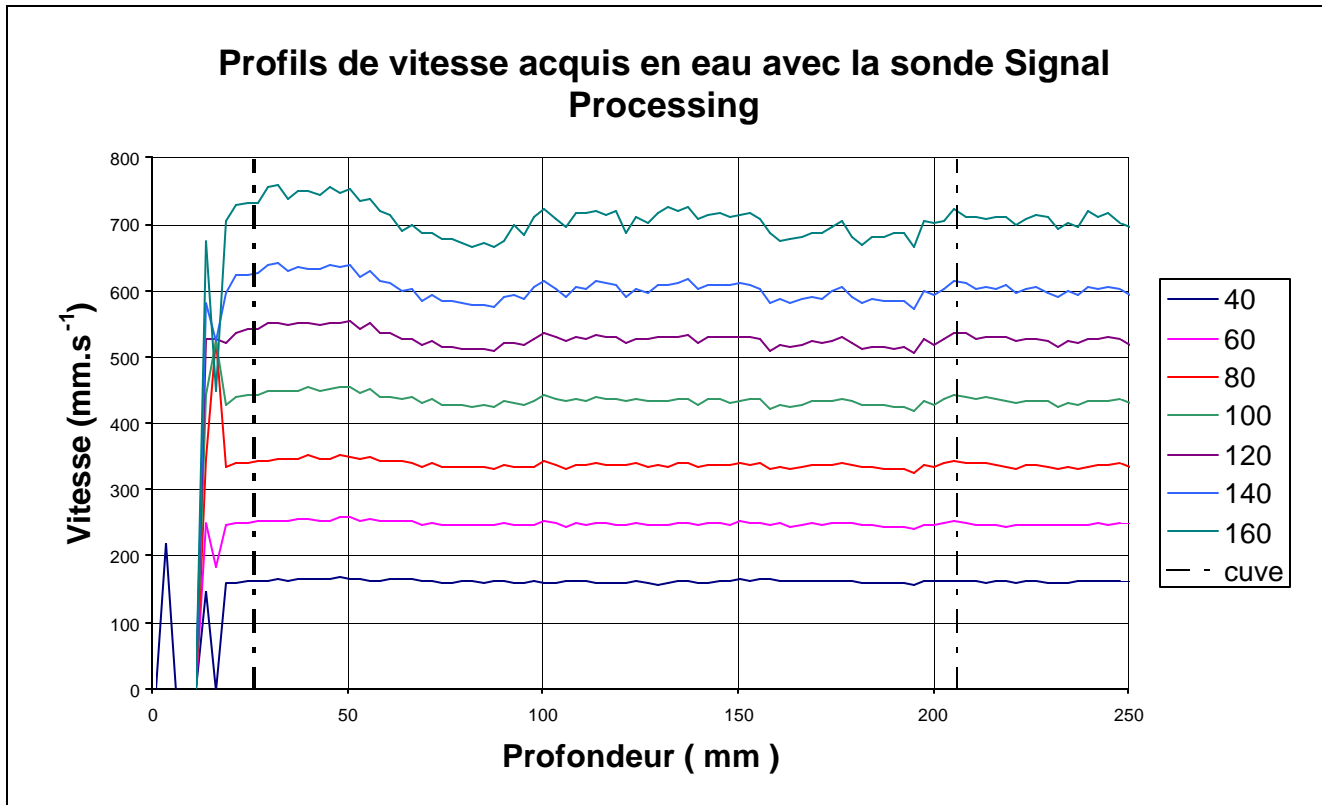


figure 16 : Ecoulement en eau ; profils de vitesse acquis pour des vitesses allant de 40 à 160 tr.mn^{-1} (de 0.67 à 2.67 Hz) avec une sonde Signal Processing

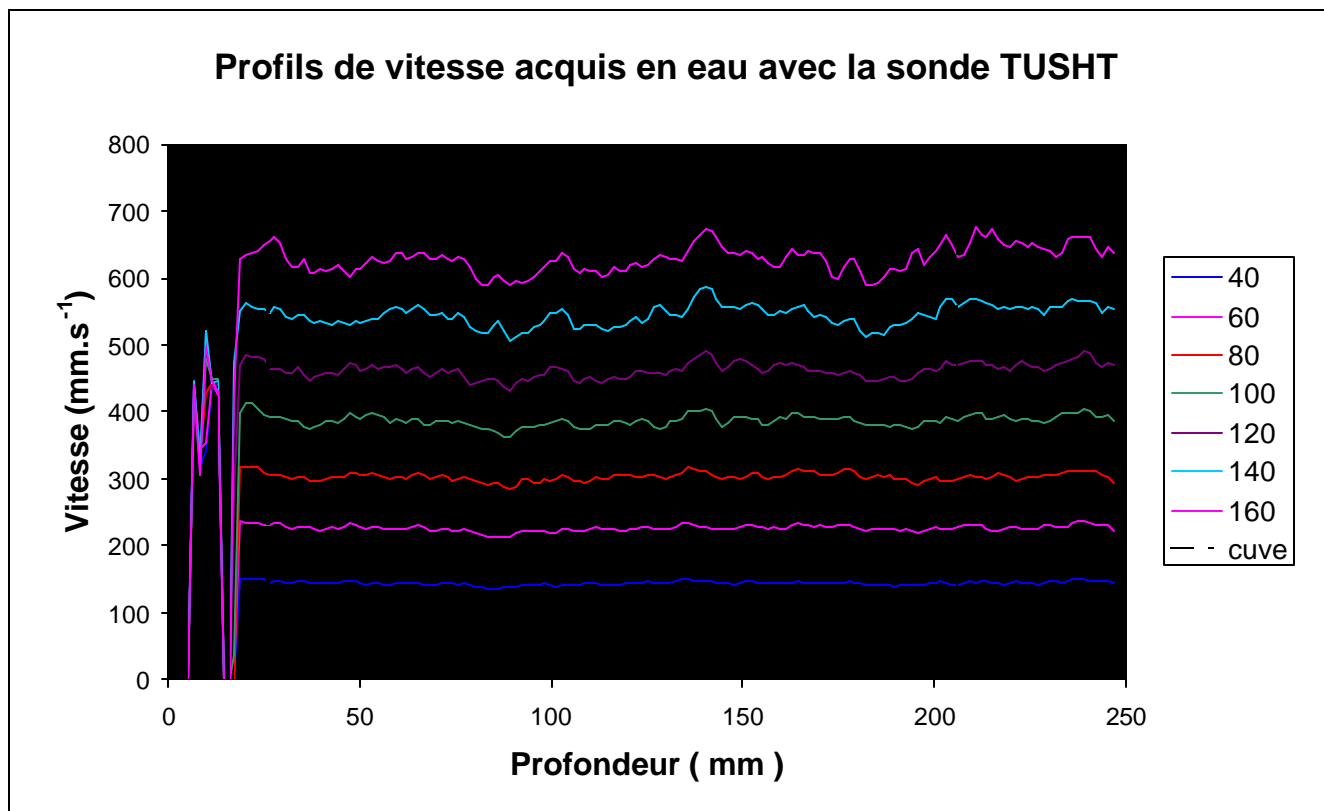


figure 17 : Ecoulement en eau ; profils de vitesse acquis pour des vitesses allant de 40 à 160 tr /mn (de 0.67 à 2.67 Hz) avec la sonde TUSHT

3-2-3- Profils de vitesse avec la sonde TUSHT

Une série de mesures avec la sonde TUSHT permet de comparer les résultats avec les acquisitions faites avec une sonde commerciale afin de vérifier que le TUSHT peut acquérir des profils de vitesse. La figure 17 présente les profils acquis en eau pour différentes vitesses de rotation de la turbine. Les vitesses sont exprimées en tours par minute (40 à 160 tr.mn⁻¹ ω de 0.67 à 2.67 Hz).

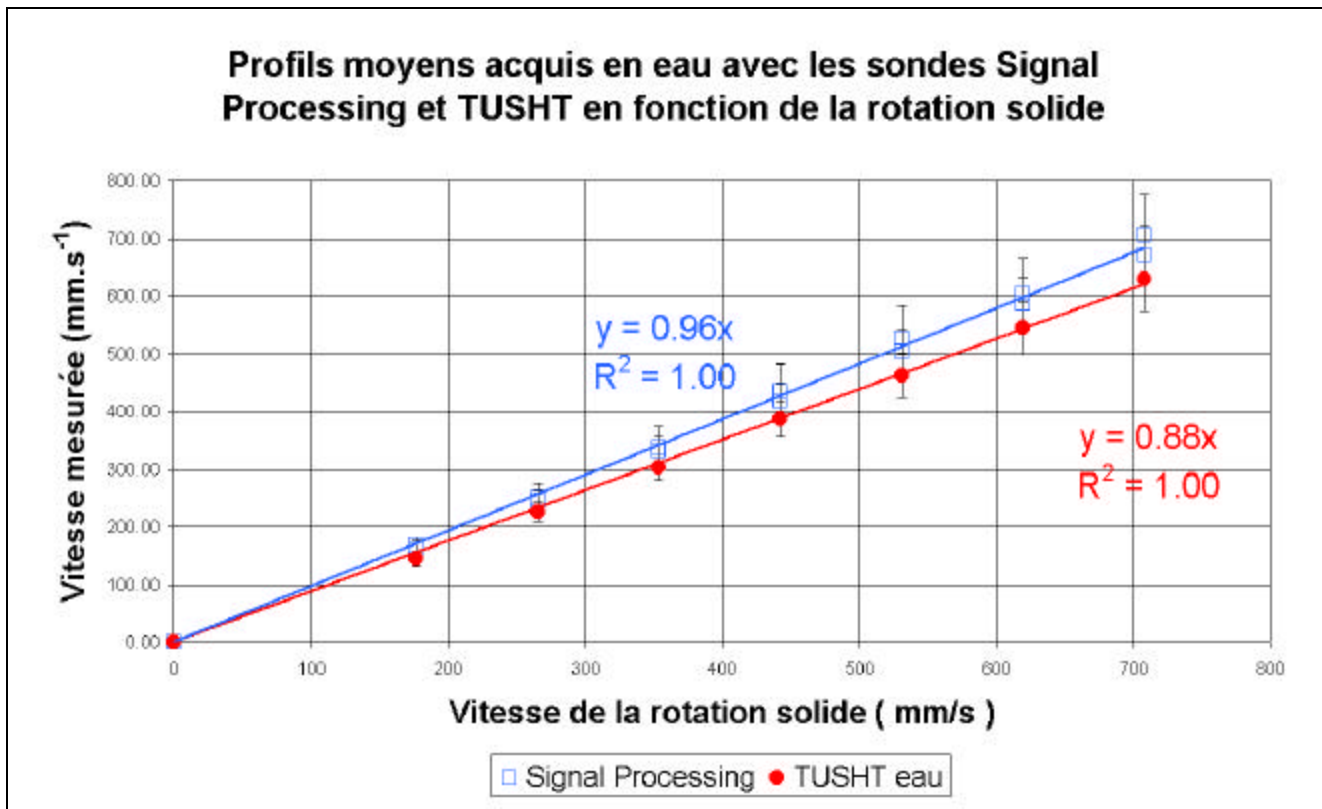


figure 18 : Ecoulement en eau ; vitesses moyennes pour chaque vitesse du moteur en fonction de la rotation solide équivalente

La figure 18 représente sur le même graphe les vitesses moyennes mesurées avec la sonde Signal Processing et le TUSHT en fonction de la vitesse de la rotation solide correspondante. L'hypothèse de la rotation solide, exposée dans le chapitre précédent, est confirmée par les points suivants :

- Sur les figures 16 et 17, les vitesses restent constantes sur toute la profondeur de tir des ultrasons pour les mesures faites avec la sonde Signal Processing et le TUSHT.
- La figure 18 permet de comparer la vitesse moyenne mesurée pour chaque profil en fonction de la vitesse de la rotation solide correspondante. Avec la sonde commerciale, l'hypothèse de la rotation solide est parfaitement confirmée ($V/\Omega = 0.96 \pm 0.05$) ; où Ω est la vitesse de la rotation solide).
- Avec la sonde TUSHT, la vitesse moyenne du profil mesuré est légèrement inférieure à la vitesse de la rotation solide correspondante ($V/\Omega = 0.88 \pm 0.08$). Ce décalage peut s'expliquer par la différence des diamètres des sondes (8 mm pour la sonde Signal Processing contre 50 mm pour le TUSHT). Le TUSHT capte donc plus de signaux ultrasonores que la sonde Signal Processing ce qui le rend plus sensible aux réflexions. De plus, le fluide n'est probablement pas en rotation solide sur toute la hauteur et la mesure est réalisée à une hauteur fixe assez basse par rapport à la turbine d'entraînement (60 mm du fond de la cuve).

Le tableau suivant donne la valeur du nombre de Reynolds correspondant pour la plage de vitesses étudiée :

$$Re = \frac{\Omega R^2}{u}$$

avec

Re : le nombre de Reynolds
 Ω : la vitesse de rotation ($= 2\pi f$)

ν ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$) : la viscosité du fluide (= $6 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ pour le sodium)
 R (m) : le rayon de la cuve

f (tr.mn ⁻¹)	f (Hz)	Re
40	0.67	$7.0 \cdot 10^4$
230	3.83	$4.0 \cdot 10^5$

3-3- Essais préparatoires en sodium

3-3-1- Le Sodium et son utilisation

Le sodium est un métal mou, blanc argenté, avec une légère teinte rosée lorsqu'il est fraîchement coupé. C'est un bon conducteur de la chaleur et de l'électricité d'où son utilisation initiale comme refroidisseur dans les Réacteurs à Neutrons Rapides (RNR). Solide à température ambiante, il se liquéfie dès 98 °C et son point d'ébullition se situe à 883 °C à pression atmosphérique. Sa viscosité (0.55 mPa.s) et sa masse volumique (0.923 kg.m^{-3}) à 150°C sont proches de celles de l'eau à 50 °C (respectivement 0.55 mPa.s et 1 kg.m^{-3}).

Néanmoins, l'emploi du sodium comporte certains risques. En effet, le sodium fait partie de la famille des alcalins, c'est donc un puissant réducteur. Il forme avec l'oxygène des oxydes basiques. De plus, le sodium et l'eau forment un couple explosif lorsqu'ils sont en contact. A cause du dégagement d'hydrogène, la réaction est violente et immédiate. La manipulation du sodium doit donc se faire en atmosphère neutre (argon ou azote purs) pour éviter toute réaction de celui-ci avec l'atmosphère ambiante.

L'utilisation du sodium impose de garder à l'esprit trois impératifs : la sécurité, la propreté du sodium et le maintien de l'expérience en état de fonctionner. C'est pourquoi, l'ensemble des essais ultrasonores dans le sodium est réalisé dans une boîte à gants prénommée Pénélope située au CEA Cadarache, au STR/LTTS (Service de Technologie des Réacteurs / Laboratoire des Techniques du Traitement du Sodium) dans le même hall d'exploitation que VKS. Cette boîte à gants permet de maintenir une atmosphère régulée d'azote non corrosive pour les charbons du moteur d'entraînement de la turbine contrairement à l'argon (cf figure 19).



figure 19 : Photo de la boîte à gants Pénélope

3-3-2- Dispositif expérimental

Pour réaliser les essais sodium, un premier dispositif expérimental a été créé. Ces essais préparatoires ont pour but de vérifier que le dispositif est adapté au sodium et à l'azote et de vérifier que le vélocimètre ultrasonore DOP 2000 et la sonde TUSHT peuvent être associés pour acquérir des profils de vitesse. Les particules, traceurs des ultrasons, utilisées dans l'eau ne pouvant être introduites dans le sodium pour des raisons de sécurité, un système de bulleurs a été créé pour introduire des bulles d'azote dans la cuve.

Caractéristiques du dispositif :

- cuve cylindrique : en inox
- quantité de sodium utilisée : 4 litres
- étanchéité sonde / sodium : joint viton
- traceurs des ultrasons : des bulles d'azote
- chauffage : un collier chauffant électrique tout autour de la cuve + une plaque chauffante
- températures du sodium : de 98°C à 350 °C

3-3-3- Protocole expérimental

L'ensemble des éléments constituant l'expérience ainsi que des outils sont introduits dans Pénélope en passant par le sas de décompression. La durée totale d'exploitation est de quelques jours.

Pour que les ultrasons puissent se propager, le TUSHT doit être mouillé par le sodium. Pour cela, le sodium est porté quelques minutes à 350 °C puis la température est fixée à 100°C.

Un système de huit bulleurs d'azote est installé afin que les bulles arrivent dans le fond de la cuve. Ces bulles sont introduites dans le sodium et étant entraînées par le fluide, elles servent de traceurs des ultrasons.

Dès que le sodium est liquide ($T = 98^{\circ}\text{C}$), le couvercle soutenant la turbine est installé et des profils de vitesse peuvent être acquis.

3-3-4- Problèmes rencontrés

La pression d'azote dans les bulleurs n'ayant pas été maintenue, le sodium est remonté par capillarité et a bouché les tuyaux des bulleurs.

Le câble branché à la sonde, défectueux, a dû être remplacé et des outils oubliés ont été introduits dans Pénélope. Tous ces problèmes ont pollué l'atmosphère de Pénélope et donc le sodium et a entraîné la formation importante d'oxydes.

A cause du système de chauffage, la sonde a constitué un point froid de température favorisant l'agglomération des oxydes à sa surface. Le couvercle a dû être enlevé afin que la surface de la sonde puisse être grattée. Cette manipulation a permis d'obtenir un signal ultrasonore sur le DOP 2000 pendant 15 minutes. La seule solution pour retrouver ensuite un signal est de gratter la surface de la sonde. Les démontages successifs du couvercle pendant une heure diminuent à chaque fois le temps de signal exploitable (de 2 à 30 secondes).

3-3-5- Vitesse du son

Pour vérifier la vitesse du son dans le sodium, la turbine d'entraînement et le couvercle sont enlevés et un obstacle métallique est placé manuellement dans l'axe de la sonde à une position connue. Le

vélocimètre DOP 2000 permet d'afficher, en plus du profil de vitesse, un profil d'écho. Exprimé en unité arbitraire, l'écho informe de la présence de fortes réflexions dues à une paroi ou un obstacle aux ultrasons. Connaissant la position exacte de l'obstacle et le temps nécessaire aux ultrasons pour parcourir la distance entre la sonde et l'obstacle, la vitesse de propagation des ultrasons dans le sodium peut être vérifiée.

L'obstacle métallique d'une largeur d'environ 10 mm est placé perpendiculairement à l'axe de propagation des ultrasons en contact avec la cuve. La distance entre la sonde et l'obstacle est de 206 mm. Sur le profil d'écho, un pic apparaît. La figure 20 montre les profils d'écho obtenus avec et sans obstacle.

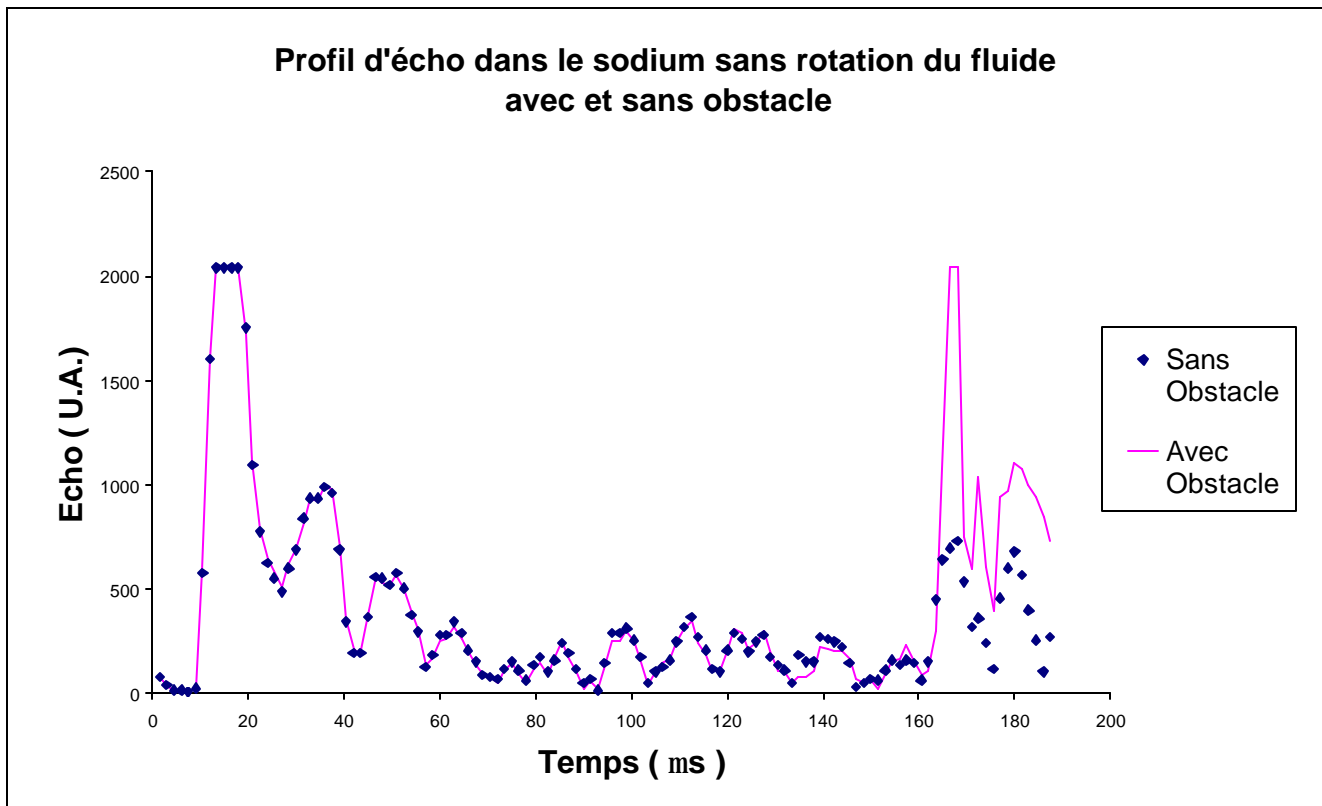


figure 20 : Ecoulement en sodium ; Profils d'écho obtenu fluide au repos, turbine d'entraînement et couvercle enlevés avec et sans obstacle

Quelque soit la sonde utilisée, des interférences liées à la nature de la sonde, perturbent le signal dans les trois premiers centimètres. Ceci explique la présence systématique d'un large pic sur l'ensemble des graphes d'écho entre 10 et 30 mm de profondeur. Un deuxième pic apparaît lié à la présence de l'obstacle.

Deux paramètres du vélocimètre sont importants : le nombre de point par profil et la résolution temporelle. Ils peuvent être ajustés dans la configuration de l'appareil pour chaque type de mesure. Dans ce cas précis, le nombre de point est de 125 et la résolution est fixée à 1500 ns.

La procédure pour calculer la vitesse du son dans le sodium est la suivante :

- déterminer le point le plus proche de la mi-hauteur du pic créé par l'obstacle
- connaissant la résolution, en déduire le temps nécessaire aux ultrasons pour parcourir la distance entre la sonde et l'obstacle
- la distance entre la sonde et l'obstacle étant connue, calculer la vitesse du son

La vitesse du son est calculée sur six profils d'écho différents afin de moyenner les mesures et d'en diminuer les incertitudes. Le tableau de la figure 21 récapitule l'ensemble des résultats obtenus.

Temps pour parcourir la distance entre la sonde et l'obstacle (ns)	Vitesse du son (m.s^{-1})	Incertitude sur la mesure (m.s^{-1})
82500	2497	83.31
83250	2474	82.35
81750	2520	84.28
82500	2497	83.31
81750	2520	84.28
82500	2497	83.31

figure 21 : Ecoulement en sodium ; Tableau récapitulatif des calculs de vitesse de propagation des ultrasons dans le sodium

Par cette méthode, la vitesse du son dans le sodium est estimée à $2501 \pm 34 \text{ m.s}^{-1}$ à 100°C . Le détail des calculs d'incertitudes est reporté en Annexe A.

D'après le document de l'Ecole du Sodium, « Technologie et physico-chimie du sodium », cette vitesse est de 2524 m.s^{-1} à 100°C .

La vitesse du son dans le sodium a donc été vérifiée avec le DOP 2000 et le TUSHT.

3-3-6- Effet Doppler : réponse à un obstacle mobile

Pour étudier la réponse en énergie de la sonde, une spatule, initialement prévue dans Pénélope pour recueillir des oxydes, a été déplacée à la main dans l'axe de tir du transducteur. Pendant les aller-retour successifs de l'outil servant d'obstacles aux ultrasons, les profils d'énergie ont pu être enregistrés pendant quatre secondes. Cette acquisition a permis de vérifier les valeurs quantitatives de vitesses mesurées par le DOP 2000. Le graphe de la figure 22 représente la position de l'obstacle déterminée par le DOP 2000 et la position calculée en intégrant la vitesse moyenne mesurée.

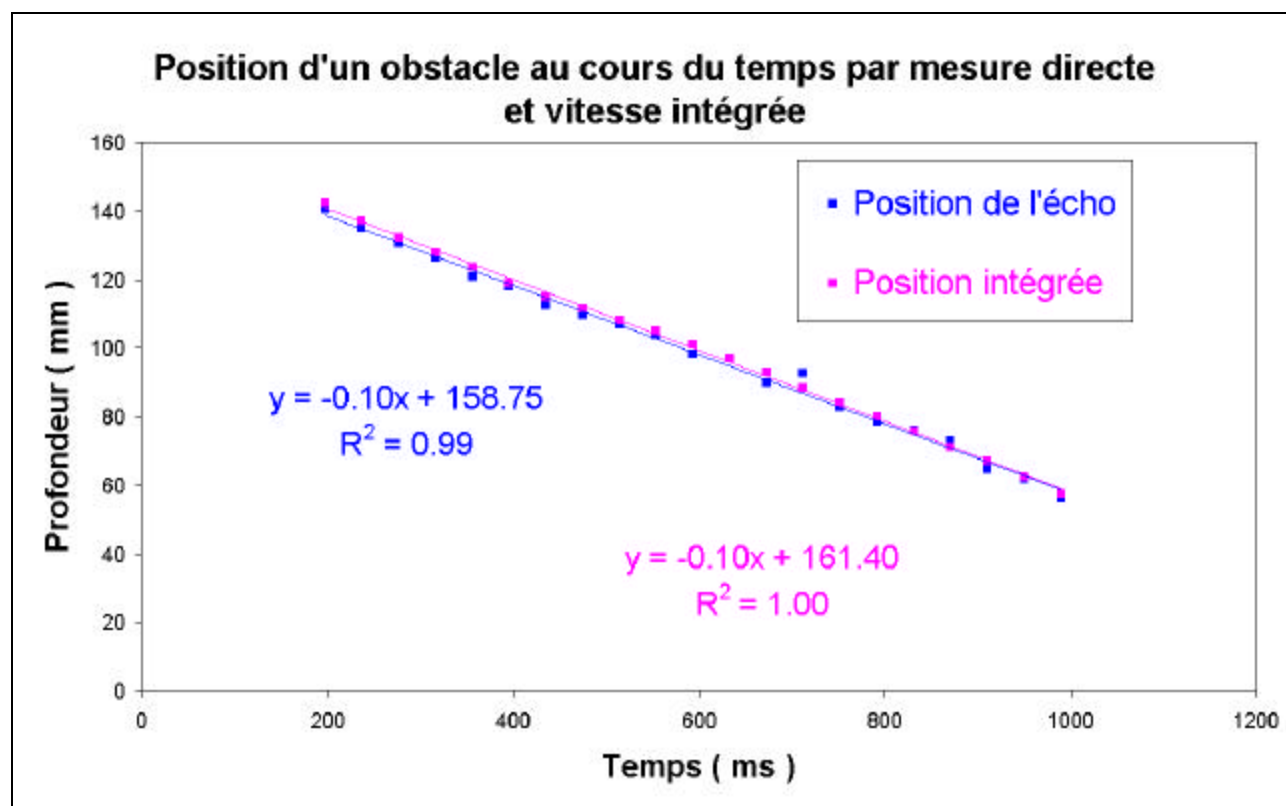


figure 22 : Ecoulement en sodium ; Position de l'écho d'un obstacle déplacé dans l'axe de la sonde et Position intégrée déduite de la vitesse moyenne mesurée par effet Doppler

3-3-7- Profil de vitesse

La seule acquisition de profil de vitesse avec l'entraînement de la turbine par le moteur a été réalisée pendant la brève période de quinze minutes de signal. Les paramètres du DOP 2000 n'ont pu être optimisés avant la perte du signal (vitesse du son, fréquence d'émission, gain...). La figure 23 présente le profil moyen obtenu.

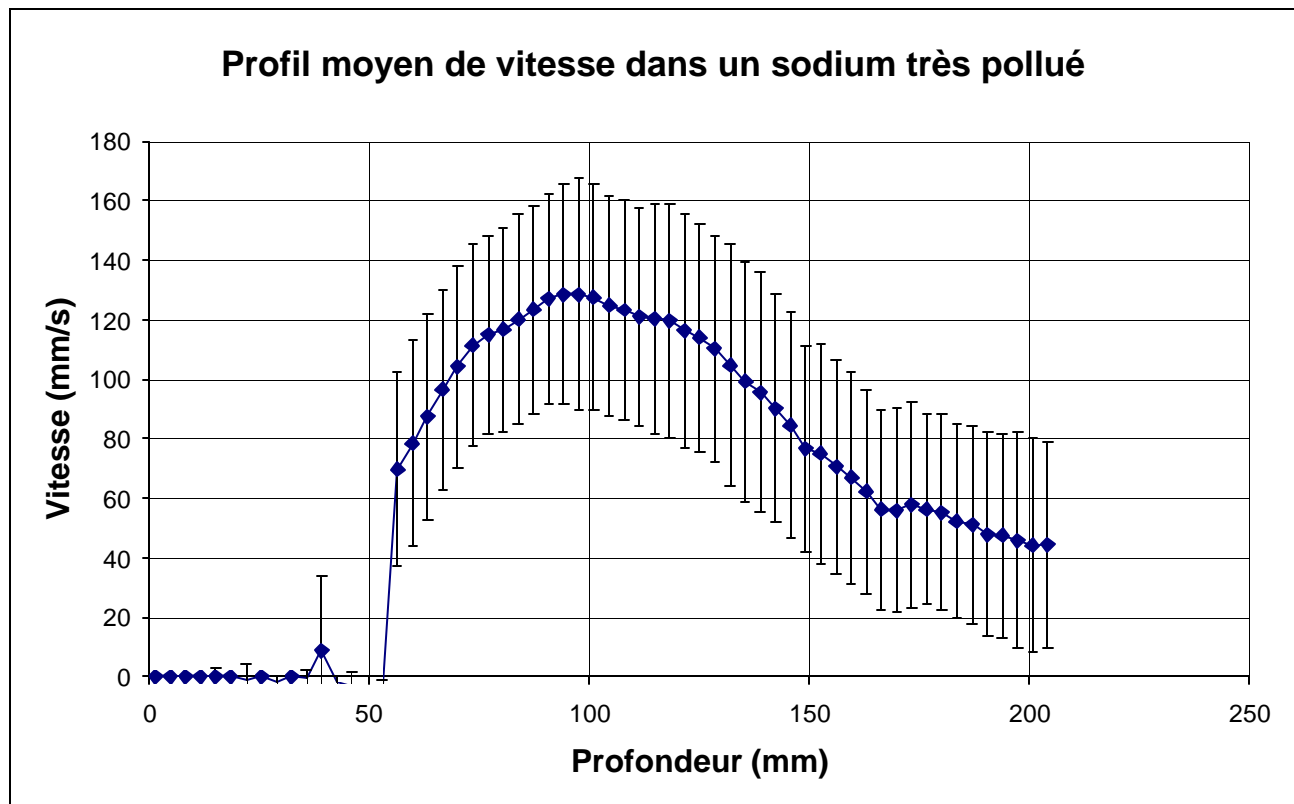


figure 23 : Ecoulement en sodium ; Profil de vitesse moyenné sur 512 profils, Vitesse du moteur : 160 tr.mn^{-1} (2.67 Hz)

Ce profil de vitesse est très approximatif, n'ayant pu être optimisé et reproduit en raison de la durée d'exploitation. Il reste néanmoins très encourageant. Par comparaison, la figure 24 montre sur le même graphe, les profils de vitesse acquis en eau et en sodium pour une vitesse de rotation de la turbine de 160 tr/mn soit 2.67 Hz.

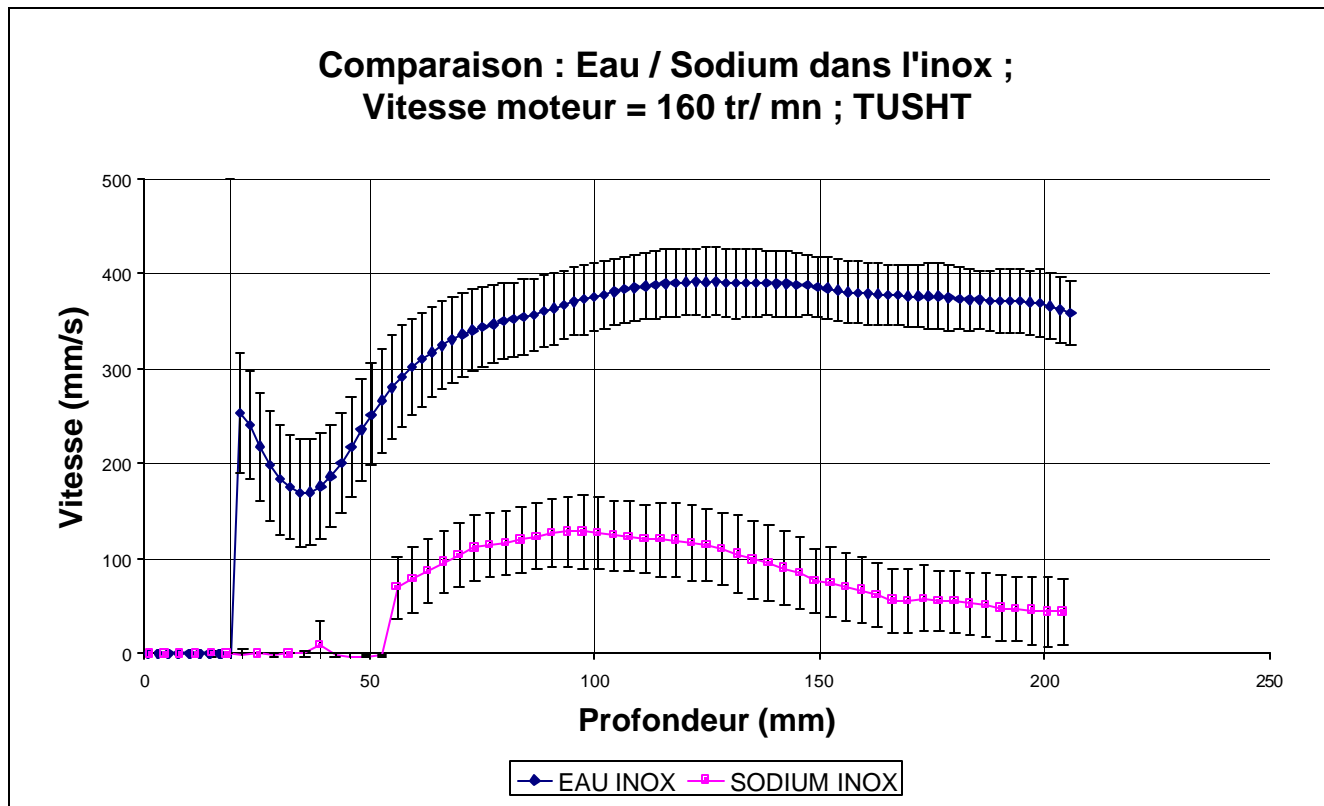


figure 24 : Ecoulement en sodium et en eau ; Profils de vitesse acquis à 160 tr.mn^{-1} (2.67 Hz)

En plus de l'optimisation imparfaite du DOP 2000 pour l'acquisition en sodium, la différence d'amplitude des signaux peut s'expliquer par la nature différente des particules servant de traceurs des ultrasons (densité, volume). En effet, dans la configuration en eau, les traceurs sont des particules de verres parfaitement calibrées et homogènes. Dans le sodium, le système de bulleurs s'étant bouché, et le sodium s'étant oxydé, seules ces particules d'oxydes ont pu tenir ce rôle. Bien que le DOP 2000 repère ces particules d'oxydes, elles ne sont pas forcément entraînées à la vitesse exacte du fluide.

Ces essais préparatoires ont permis de conclure que :

- Le système d'entraînement (turbine et moteur) supporte l'environnement d'exploitation (sodium et azote).
- Le système de bulleurs n'est pas nécessaire pour obtenir un profil de vitesse sur le DOP 2000, des particules d'oxydes de sodium ayant servi de traceurs des ultrasons.
- Le DOP 2000 acquiert des mesures quantitatives de vitesse dans le sodium avec le TUSHT.

Bien que la période d'exploitation soit très courte, les essais préparatoires sont encourageants pour préparer une campagne de mesures plus répétitives.

3-4- Protocole de la campagne de mesure en sodium

3-4-1- Conditions expérimentales

- Pour s'assurer du mouillage de la sonde par le sodium, une fine couche d'or est déposée sur la surface de la sonde. Cette couche est dissoute dès la liquéfaction du sodium et assure le

mouillage à froid de la sonde par le fluide. Cette procédure permet d'éviter la phase de mouillage à chaud favorisant la formation d'oxydes donc la pollution du sodium.

- Une cuve en cuivre est construite pour remplacer celle en inox. Le cuivre réfléchit moins les ultrasons que l'inox (coefficient de réflectivité de l'interface sodium/inox/air : 0.76 contre 0.63 pour l'interface sodium/cuivre/air) et il est également un très bon conducteur de chaleur. De plus, une deuxième expérience VKS avec une cuve en cuivre doit prochainement être réalisée. Il est donc important de connaître le comportement des ultrasons dans une configuration en cuivre.
- Pour éviter que la sonde ne soit un point froid et ne devienne par conséquent un piège à oxydes empêchant les ultrasons de passer, il faut qu'elle soit toujours plus chaude que le sodium. La sonde est donc chauffée par un collier chauffant électrique régulé en température. Ce système permet en plus, grâce à la bonne conductivité du cuivre, de réguler la température du sodium jusqu'à 130 °C.
- Pour empêcher le sodium d'être pollué par l'atmosphère de Pénélope (100 ppm suffisent à oxyder le métal liquide), la zone confinée entre le sodium liquide et le couvercle de la cuve est constamment balayée par de l'azote plus pur (0.6 ppm). La pression d'azote est constamment maintenue pour éviter le bouchage du capillaire par le sodium.
- Le système de bulleurs est supprimé, l'hypothèse étant que le peu d'oxydes de sodium inévitablement présents servent de traceurs des ultrasons.
- L'étanchéité entre la sonde et le sodium est assurée par un joint argent recuit de diamètre 1.8 mm reposant sur la surface extérieure de la sonde.

3-4-2- Dispositif expérimental

La figure 25 schématise le dispositif expérimental réalisé pour effectuer des mesures de vélocimétrie ultrasonore dans le sodium.

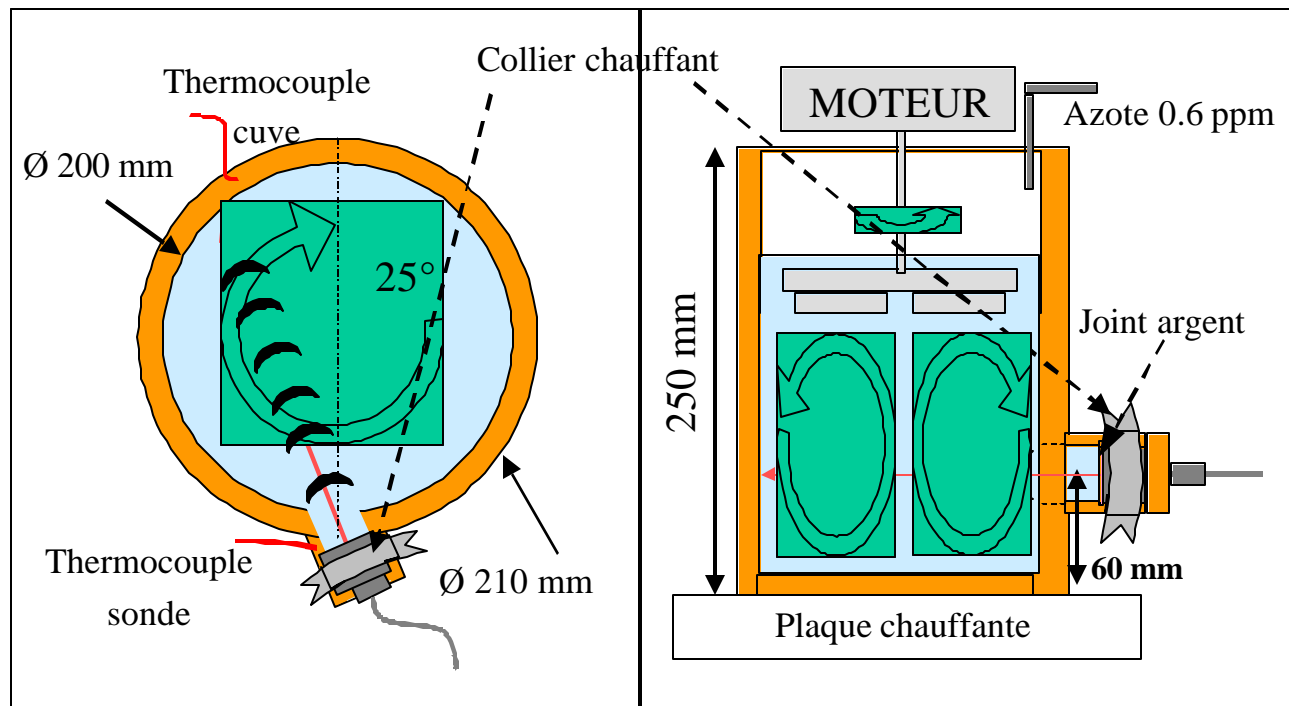


figure 25 : Ecoulement en sodium : Schéma du dispositif de la campagne de mesure

Caractéristiques :

- sodium liquide : 5 litres

- températures d'exploitation : de 100 à 150 °C
- atmosphère : azote (0.6 ppm à la surface du sodium ; 100 ppm dans Pénélope)
- chauffage : collier chauffant de 200 W disposé autour du support de la sonde TUSHT + une plaque chauffante placée sous la cuve en complément à faible puissance. Le cuivre étant également un bon conducteur de chaleur, le collier chauffant suffit à réguler la température de la cuve jusqu'à 130 °C.
- cuve :
 - cuivre
 - hauteur : 250 mm
 - diamètre intérieur : 200 mm
- thermocouples : fixés près de la sonde et sur la paroi extérieure de la cuve
- vitesse de rotation du moteur : jusqu'à 240 tr.mn⁻¹ (4 Hz)
- turbine en inox :
 - disque plat de 180 mm de diamètre
 - 4 pales droites :
 - hauteur : 20 mm
 - longueur : 75 mm
 - épaisseur : 5.5 mm
- sonde ultrason :
 - diamètre 55 mm (partie active : 50 mm)
 - angle du TUSHT par rapport à la sonde : 25 °
- étanchéité : joint argent recuit de 1.8 mm de diamètre

4- RESULTATS EN SODIUM

La campagne de mesures en sodium a duré quatre jours pendant lesquels un nombre important de profils de vitesse a pu être acquis. Cette campagne a permis d'étudier la stabilité dans le temps des résultats acquis et de les comparer avec ceux obtenus en eau.

4-1- Mesures de l'écoulement

4-1-1- Profils de vitesse

Plus de deux cents profils de vitesses ont été acquis pendant cette campagne. L'ensemble de ces mesures se regroupe en séries de profils acquises pour des vitesses de rotation de la turbine de 40 à 230 tr.mn^{-1} soit de 0.67 à 3.83 Hz. La figure 26 montre l'une de ces séries (appelée SérieA dans la suite de ce chapitre) obtenue dans des conditions optimales.

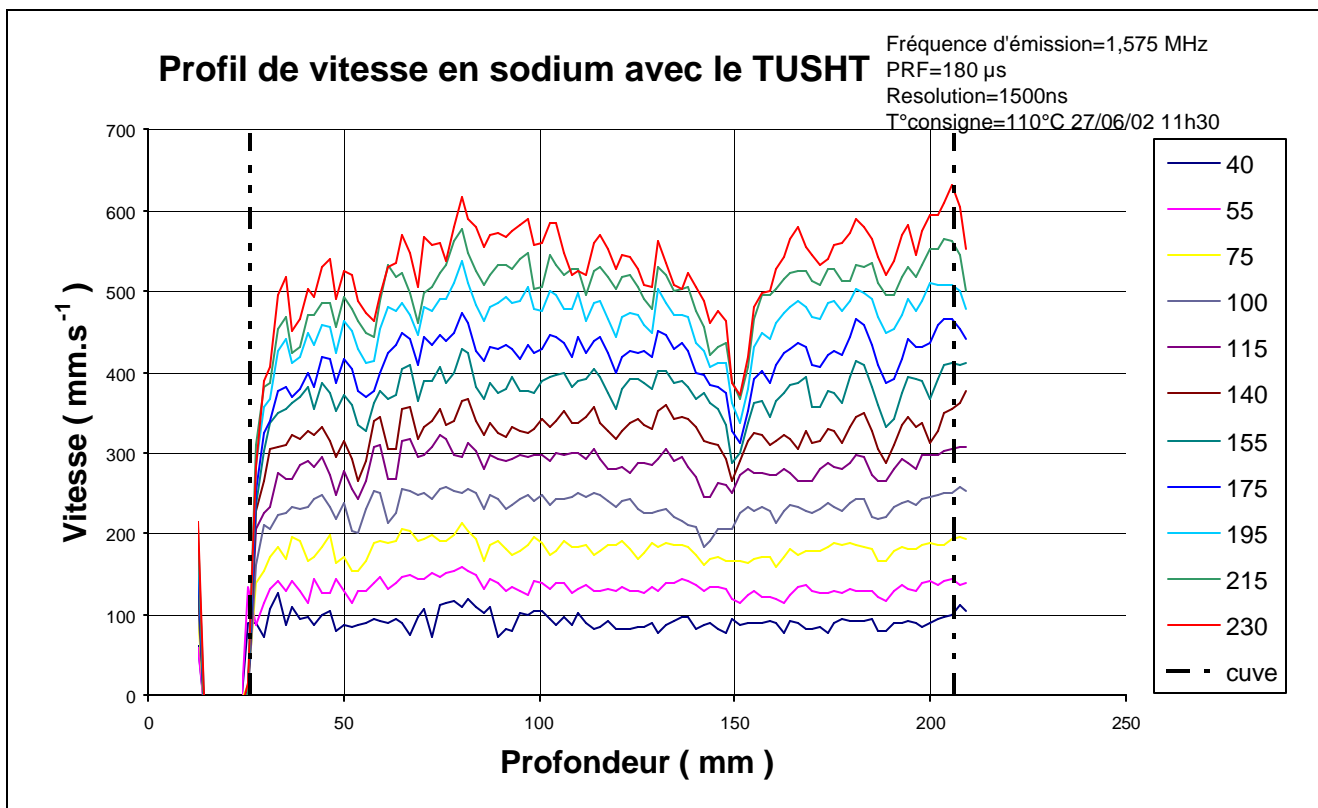


figure 26 : Ecoulement en sodium : profils de vitesse acquis pour des vitesses allant de 40 à 230 tr.mn^{-1} (de 0.67 à 3.83 Hz) avec la sonde TUSHT pour une PRF de 180 μs

Pour chaque profil, les vitesses restent constantes sur toute la profondeur de tir des ultrasons. Ces profils ont une forme équivalente à ceux mesurés dans l'eau en rotation solide. Cependant, pour les vitesses de rotation de la turbine supérieures à 140 tr.mn^{-1} (2.33 Hz), un creux apparaît à une profondeur de 150 mm. Plusieurs hypothèses peuvent l'expliquer : des interférences dues aux ultrasons ou des oxydes de sodium plus gros formant un obstacle piégé dans les pales des turbines. Sur d'autres séries réalisées plus tard dans les mêmes conditions, ce creux existe toujours mais se déplace.

4-1-2- Vers une plus grande profondeur de mesures

Afin d'étudier l'influence des paramètres du vélocimètre DOP 2000 sur les mesures, les profils de vitesse sont également acquis avec une deuxième valeur de PRF (430 μs) permettant de faire la mesure à des profondeurs plus grandes (500 mm). La figure 27 montre une série de profils acquise dans cette configuration.

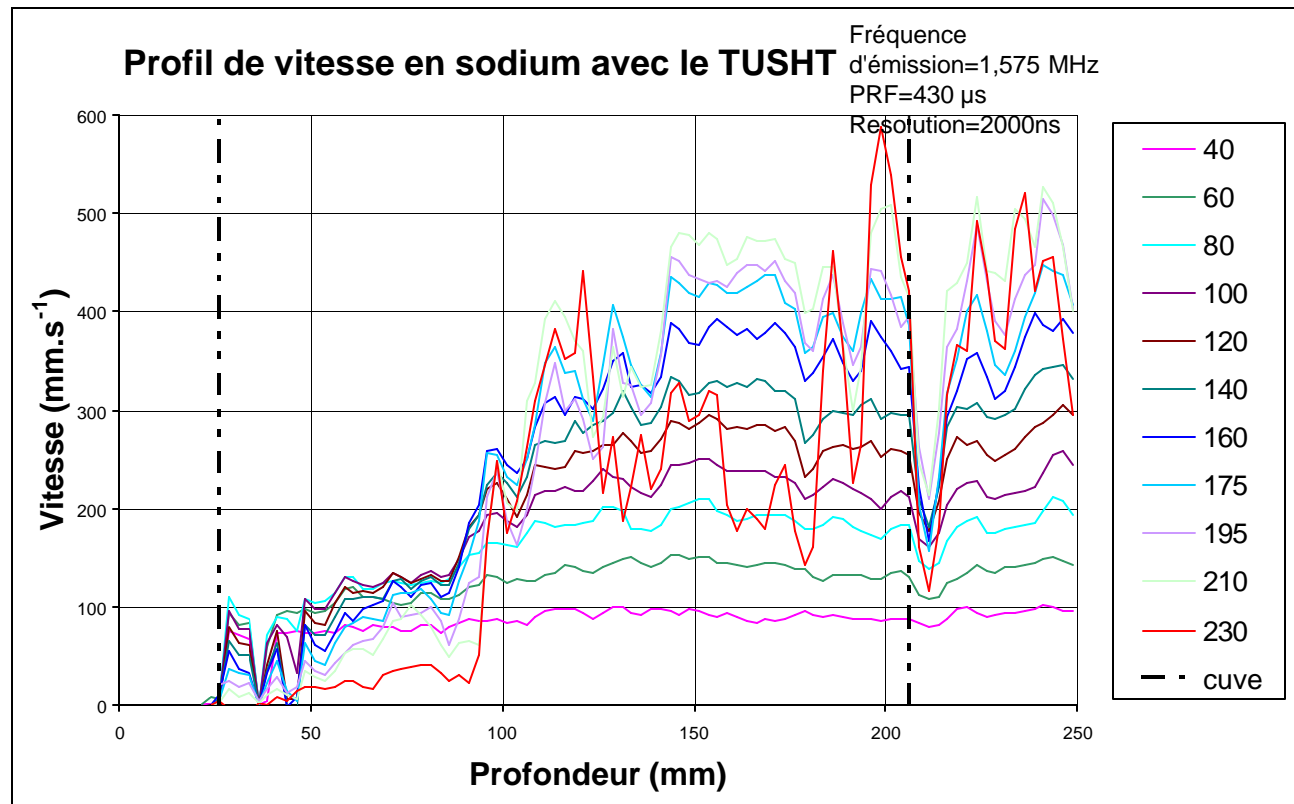


figure 27 : Ecoulement en sodium : profils de vitesse acquis pour des vitesses allant de 40 à 230 tr.mn^{-1} (de 0.67 à 3.83 Hz) avec la sonde TUSHT pour une PRF de 430 μs

Cette configuration du vélocimètre n'est pas adaptée à la géométrie de l'écoulement étudié. Les profils de vitesse sont écrasés sur la première moitié de la profondeur d'analyse. Néanmoins, à partir de 120 mm, les profils sont équivalents à ceux obtenus avec la PRF fixée à 180 μs . De plus, la paroi de la cuve est parfaitement visible avec l'apparition d'un creux vers 211 mm de la sonde caractéristique d'un écho fixe. Cette paroi n'est pas visible sur les profils acquis avec la PRF fixée à 180 μs . Enfin, une plus grande profondeur d'analyse peut être étudiée (500 mm contre 206 mm avec une PRF de 180 μs). Ce dernier point s'avère important pour l'adaptation de cette méthode de mesures sur l'expérience VKS dont la géométrie est nettement plus grande.

4-2- Qualités des mesures

L'ensemble des profils de vitesse acquis pendant la campagne de mesure est une moyenne de 1024 profils acquis par le vélocimètre. Deux paramètres importants du dépouillement des résultats permettent de quantifier la qualité des mesures de vitesse enregistrées : le nombre de zéros et l'écart-type des vitesses à chaque profondeur.

4-2-1- Nombre de zéros de vitesse

Lors de l'enregistrement, le vélocimètre ne reçoit pas toujours une information sur toutes les profondeurs pour les 1024 mesures acquises. Dans ce cas, il inscrit une valeur nulle de la vitesse pour cette profondeur. Lors du calcul du profil moyen, le nombre de zéros pour une profondeur donnée n'est pas toujours négligeable surtout dans les trois premiers centimètres de la sonde. La figure 28 montre le nombre de zéros moyen enregistré par le vélocimètre en fonction de la profondeur d'analyse pour la SérieA pour trois vitesses de rotation de la turbine (40, 155 et 230 tr.mn^{-1}).

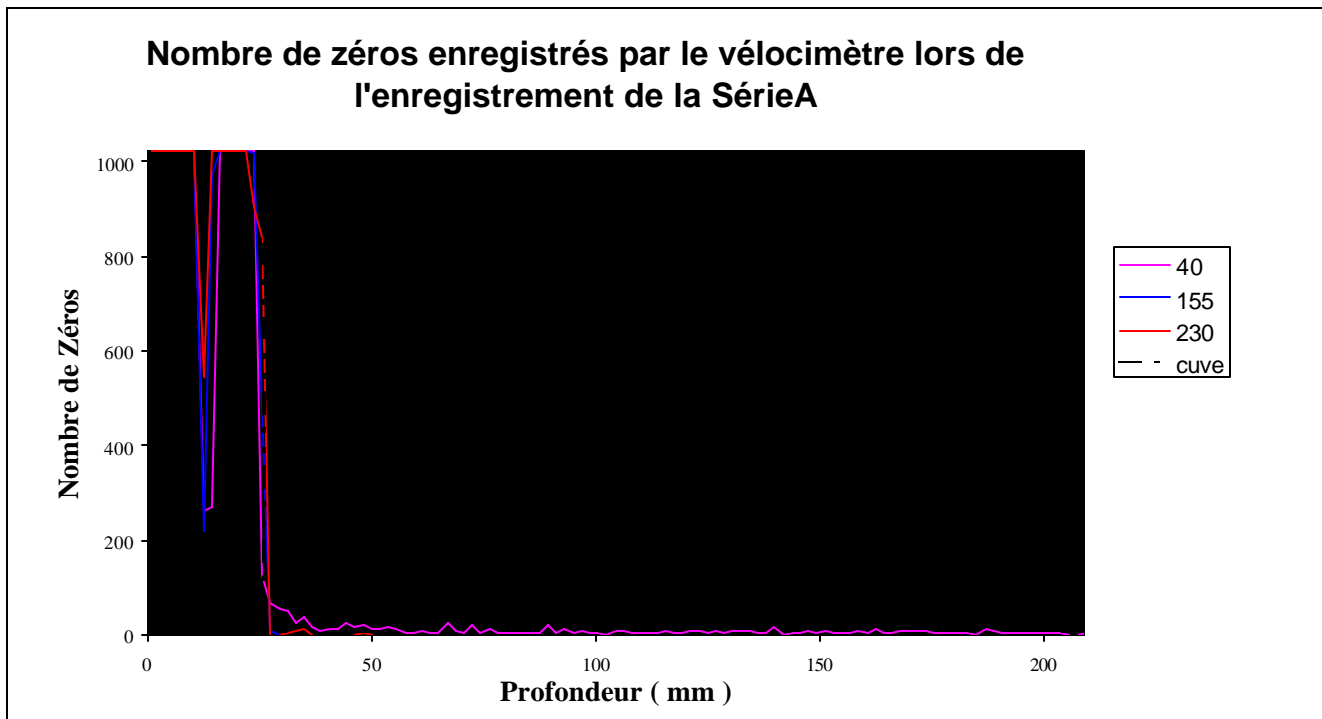


figure 28 : Ecoulement en sodium : Nombre de zéros moyen enregistrés de la SérieA en fonction de la profondeur d'analyse, acquis pour trois vitesses de rotation de la turbine (40, 155 et 230 tr.mn^{-1} soit 0.67, 2.58 et 3.83 Hz) avec la sonde TUSHT

Au delà des trois premiers centimètres, le vélocimètre enregistre un signal non nul. Cette courbe assure que le profil moyen est obtenu à partir de vitesses mesurées par l'appareil. Comme expliqué au chapitre **3-3-5 Vitesse du son**, les trois premiers centimètres sont perturbés par des interférences liées à la nature de la sonde. Comme sur les profils d'écho, le nombre de zéros met bien en évidence cette zone non mesurable. Au delà, les échos sont tous exploitables dans la région de l'écoulement mesuré.

4-2-2- Ecart-Type

Les profils de vitesse obtenus étant une moyenne de 1024 profils, le calcul de l'écart-type permet de calculer la dispersion des mesures de vitesses et de quantifier ainsi la turbulence de l'écoulement. La figure 29 représente l'écart-type du signal de vitesse en fonction de la profondeur d'analyse pour la SérieA pour trois vitesses de rotation de la turbine (40, 155 et 230 tr.mn^{-1}).

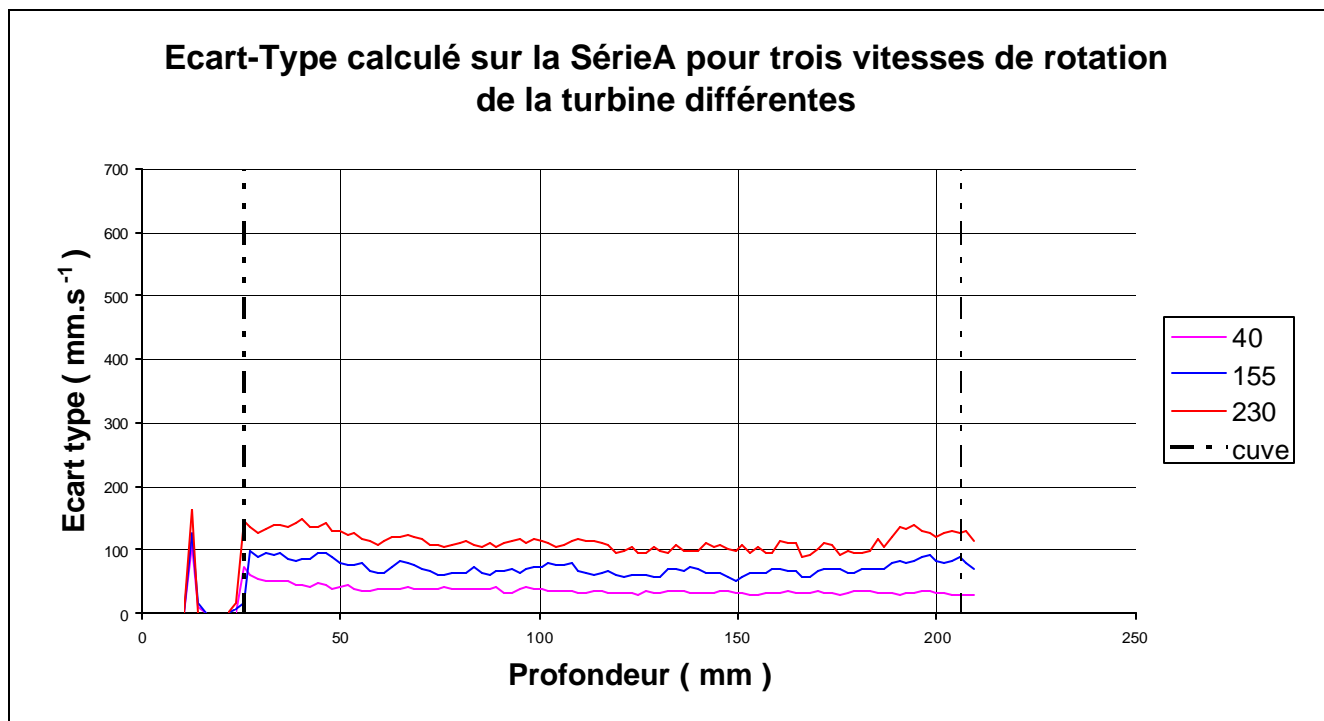


figure 29 : Ecoulement en sodium : Ecart-type de la SérieA en fonction de la profondeur d'analyse, calculés pour trois vitesses de rotation de la turbine (40, 155 et 230 tr.mn^{-1} soit 0.67, 2.58 et 3.83 Hz) avec la sonde TUSHT

Sur l'ensemble des profils de la SérieA, la fluctuation statistique de la vitesse en chaque point est d'environ 20%.

4-3- Vitesse de rotation mesurée

4-3-1- Par rapport à la rotation de la turbine

L'ensemble des séries acquises dans les mêmes conditions que la SérieA permet d'exploiter les résultats avec la même démarche que pour les essais en eau. Les vitesses mesurées restant constantes sur une majeure partie de la profondeur d'analyse, l'étude de la vitesse moyenne mesurée peut être comparée à la vitesse de rotation de la turbine. La figure 30 représente la vitesse moyenne de chaque profil de la SérieA en fonction de la vitesse de rotation de la turbine.

Vitesse moyenne des profils mesurés en sodium en fonction de la rotation de la turbine avec le TUSHT

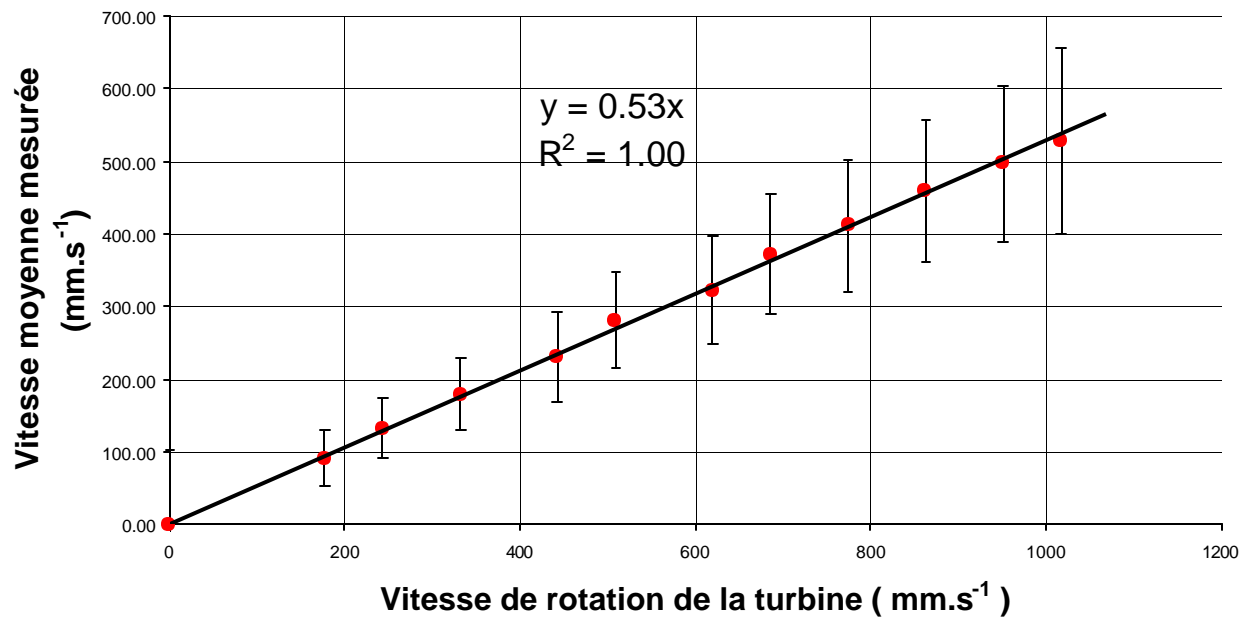


figure 30 : Ecoulement en sodium : Vitesse moyenne des profils acquis de la SérieA en fonction de la vitesse de rotation de la turbine comprise entre 40 et 230 tr.mn^{-1} soit 0.67 et 3.83 Hz) avec la sonde TUSHT

Chaque vitesse est obtenue par moyennage de l'ensemble des mesures en temps et en espace de la profondeur 26 à 206 mm. Pour les acquisitions mesurées avec une grande PRF (430 μs), la linéarité avec la vitesse de rotation de la turbine est également vérifiée. La moyenne est calculée sur une portion du signal, de la profondeur 120 à 206 mm.

La vitesse moyenne mesurée dans l'écoulement est proportionnelle à la vitesse de rotation de la turbine avec un facteur 0.53.

4-3-2- Autres configurations étudiées

Les paramètres de configuration du DOP 2000 ont une influence sur les acquisitions de profil de vitesses. La plupart des résultats présentés jusqu'à présent sont obtenus avec une configuration adaptée à l'écoulement et sa géométrie. Cependant, il apparaît intéressant de comprendre l'influence de ces paramètres sur les mesures.

Lors de la détermination de la fréquence d'émission des ultrasons propres à la sonde, une deuxième valeur a été également retenue (2.92 MHz) bien que la sonde ait réagi mais de façon moindre. Une série de mesures de vitesses acquise avec cette fréquence montre que bien que la forme des profils de vitesse soit identique, les valeurs mesurées sont légèrement inférieures. Il est donc préférable de réaliser les mesures avec la fréquence fondamentale d'émission (1.575 MHz) propre de la sonde pour obtenir des valeurs quantitatives de vitesses correctes.

Le vélocimètre permet également de régler la puissance du signal ultrasonore émis par la sonde (Emitting power). Ce paramètre est lié au degré d'atténuation des ultrasons dans le sodium et au type de particules en solution. Cette puissance émise doit être augmentée si la sonde ne reçoit pas assez de signal Doppler. Le problème est apparu lorsque l'étude de la réponse de la sonde à un obstacle mobile a été tentée. Les signaux d'écho enregistrés sont trop faibles. Pour réaliser cette expérience, le couvercle de la cuve a été ôté et des oxydes de sodium se sont formés très vite car le

sodium s'est retrouvé dans l'atmosphère d'azote de la boîte à gants beaucoup moins régulée. La puissance émise n'ayant pas été ajustée, l'amplitude de l'écho se confond avec le bruit.

4-3-3- Reproductibilité et bilan

La qualité des signaux obtenus pendant la campagne de mesures en sodium permet d'étudier la reproductibilité du facteur de proportionnalité, appelé facteur de réponse K , entre la vitesse moyenne mesurée et la vitesse de rotation de la turbine.

$$V_{\text{mes}} = K \cdot V_{\text{turb}}$$

avec

V_{mes} (mm.s^{-1}) : la vitesse moyenne mesurée par le vélocimètre
 V_{turb} (mm.s^{-1}) : la vitesse de rotation de la turbine
 K : le facteur de réponse

La figure 31 représente le facteur K en fonction du temps depuis le début de la campagne de mesures pour diverses séries de mesures.

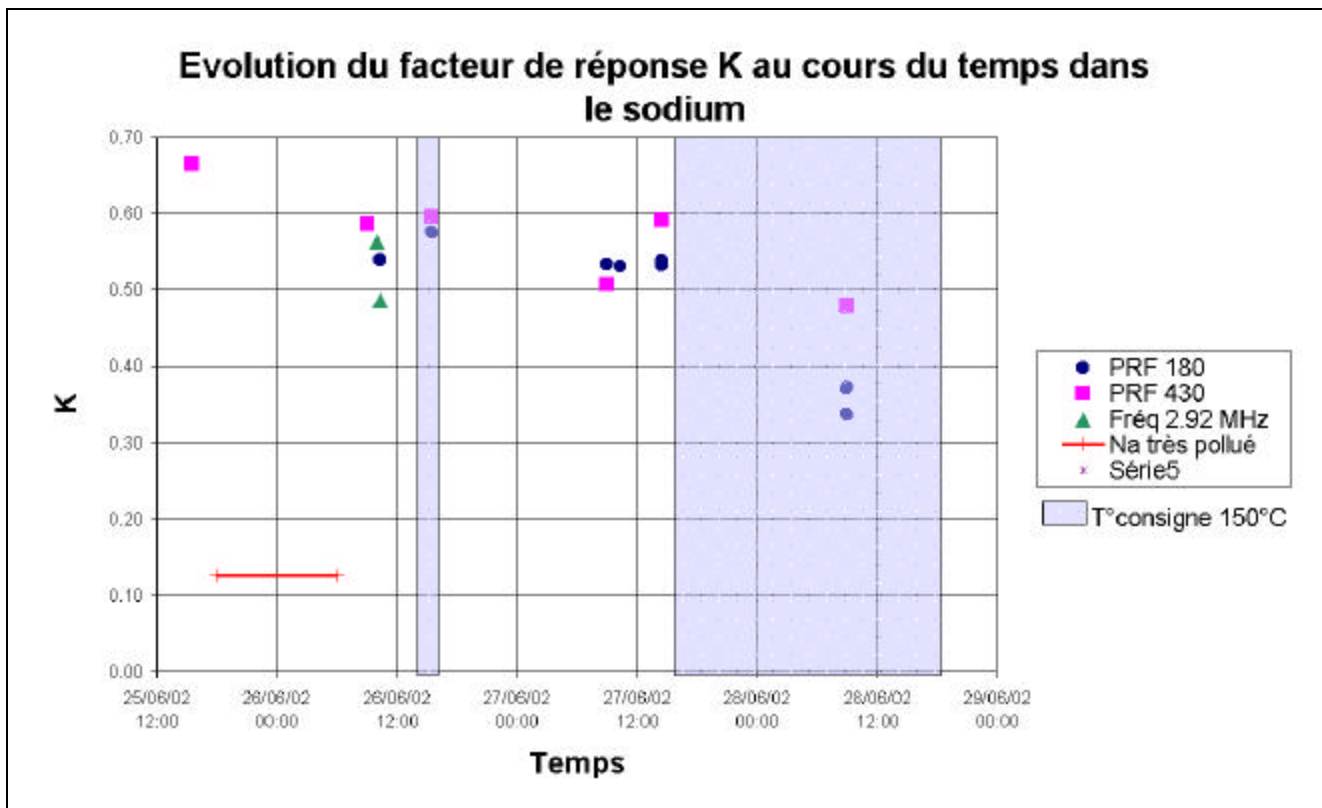


figure 31 : Ecoulement en sodium : Evolution du facteur de réponse K au cours du temps avec la sonde TUSHT

L'ensemble des séries est représentée y compris celles permettant d'atteindre des profondeurs plus grandes (pour les PRF fixée à 430 μs , les données sont traitées sur la partie constante des profils) et celles acquises avec une fréquence d'émission différentes (bien qu'avec une autre fréquence d'émission des ultrasons, les mesures de vitesses ne soient pas quantitatives, elles permettent néanmoins d'obtenir la forme de l'écoulement et donc d'obtenir une évolution linéaire de la vitesse mesurée en fonction de la rotation de la turbine). Le trait rouge représente par comparaison le

facteur de réponse du seul profil acquis pendant la semaine d'essais pendant laquelle le sodium était très pollué par les oxydes, l'atmosphère d'azote étant moins régulée et moins propre. Les zones grises représentent les périodes pendant lesquelles la consigne de chauffage est portée à 150°C. En effet, la montée en température favorise l'apparition d'oxydes dans le sodium. Cette méthode permet d'atteindre des conditions de pollution du sodium plus vite. Dans la cuve, l'atmosphère d'azote est régulée constamment, la formation d'oxydes est donc maîtrisée. Le facteur de réponse K reste quasiment constant pendant ces périodes. Par contre, lorsque la formation d'oxydes est accélérée, le facteur K chute (la vitesse moyenne mesurée baisse).

Le bilan de la campagne de mesures en sodium est le suivant :

- le vélocimètre DOP 2000 acquiert des profils de vitesses dans le sodium avec la sonde TUSHT.
- Dans l'écoulement étudié, les résultats montrent que la vitesse est constante sur toute la profondeur d'analyse.
- Les vitesses moyennes mesurées sur chaque profil sont proportionnelles à la vitesse de rotation de la turbine.
- Le facteur de réponse K est quasiment constant au cours de la campagne d'essais lorsque la formation d'oxydes est maîtrisée. Il chute lorsque la température de consigne est portée à 150 °C pour favoriser la formation d'oxydes. Ces oxydes, jouant le rôle de traceurs de ultrasons, ne sont pas entraînés à la vitesse du fluide car ils sont plus lourds plus nombreux et plus denses.

4-4- Comparaison avec l'eau

Le demi-écoulement de von Kármán a été mesuré en eau avec une sonde commerciale et la sonde TUSHT et en sodium avec la sonde TUSHT. La figure 32 représente l'ensemble des vitesses moyennes mesurées dans les trois conditions.

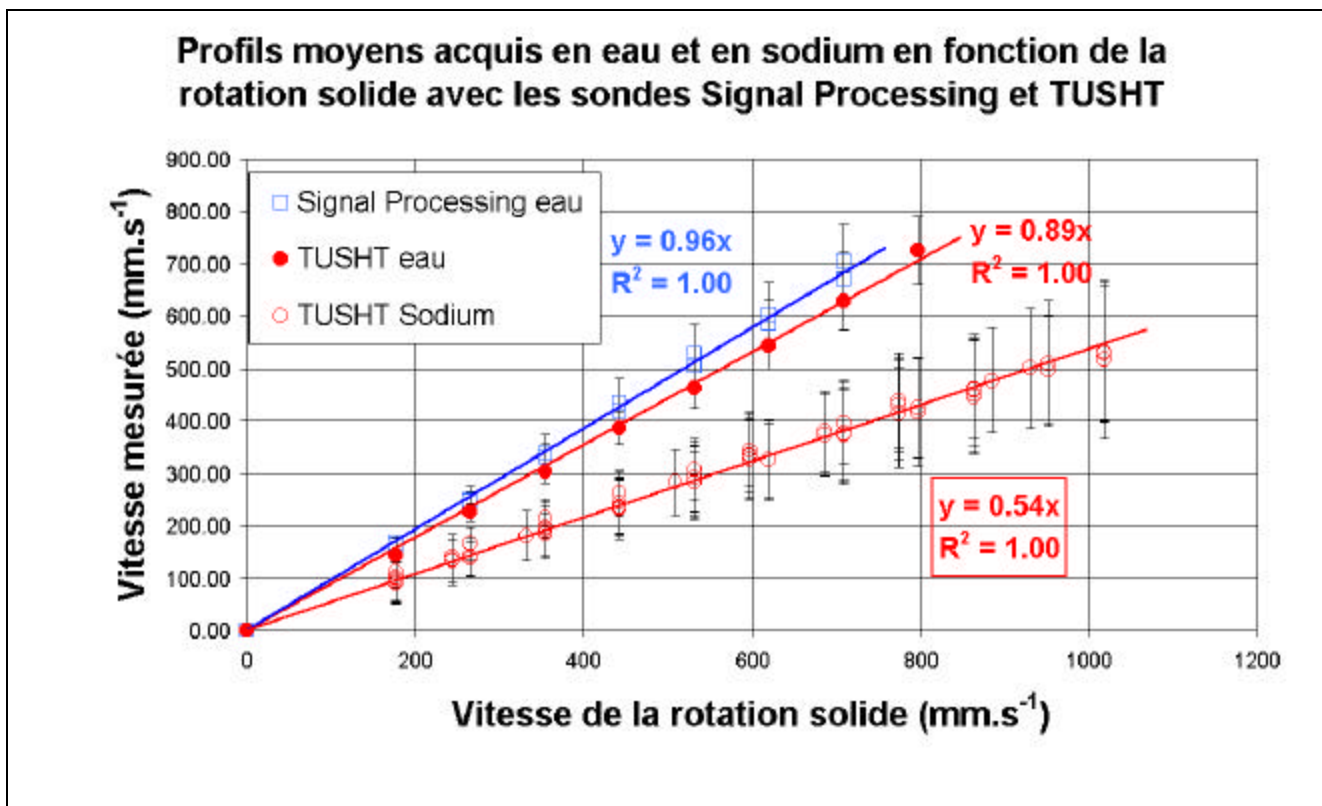


figure 32 : Ecoulement en eau et en sodium : vitesses moyennes mesurées en fonction de la rotation solide correspondante réalisées en eau et en sodium

La forme de l'écoulement mesurée est identique au facteur de réponse K près à celui obtenu en eau : la vitesse moyenne mesurée est proportionnelle à la vitesse de la rotation solide correspondante. Le facteur de réponse vaut :

- en eau avec une sonde commerciale Signal Processing : $K = 0.96 \pm 0.05$
- en eau avec la sonde TUSHT : $K = 0.89 \pm 0.08$
- en sodium avec la sonde TUSHT : $K = 0.54 \pm 0.09$

Dans l'eau avec la sonde commerciale Signal Processing où des particules de verres creusés sont les traceurs d'ultrasons, la vitesse moyenne mesurée est quasiment égale à la rotation de la turbine. Les particules de verres creusés sont entraînées à la vitesse du fluide.

Dans les mêmes conditions mais avec une sonde TUSHT, la vitesse moyenne mesurée est légèrement inférieure à la rotation de la turbine ($K = 0.89 \pm 0.08$). La sonde TUSHT étant plus large, elle capte plus de signaux ultrasonores que la sonde Signal Processing ce qui la rend plus sensibles aux réflexions.

Dans le sodium, les traceurs d'ultrasons sont les oxydes de sodium formés par réaction chimique entre le sodium et l'atmosphère contenus dans la cuve. La vitesse moyenne mesurée est égale à la moitié de la vitesse de la rotation solide ($K = 0.54 \pm 0.09$). La formation de ces oxydes n'a pas évolué pendant la campagne de mesures en sodium (K est constant) sauf pendant les périodes de chauffage à 150°C (baisse de K). Selon leur densité, leur forme et leur taille, les particules ne sont pas entraînées à la vitesse de l'écoulement.

4-5- Perspectives

La technique présentée ici détecte bien un profil de vitesse relatif, mais ne fournit pas de valeur absolue de la vitesse du fluide. A notre connaissance, aucune autre expérience dans du sodium liquide [Brito et al. 2001, Eckert et Gerbeth 2002] ne fournit la mesure absolue de la vitesse, mais seulement un profil relatif. De même, aucune calibration n'est présentée dans le mercure [Takeda et Kikura 2002]. Le facteur de calibration K mesurée dans cet écoulement en rotation en comparant eau et sodium est-il général ou non ? C'est une question à laquelle nous devons répondre. Il est vraisemblable que l'écart de calibration est dû au mouvement des oxydes traceurs qui suivent mal le fluide du fait de leur densité élevée. L'étude de l'entraînement de ces particules est délicate car elle ne peut pas négliger la turbulence qui contrôle certainement de façon dominante leur répartition spatiale.

5- CONCLUSIONS

Cette étude a permis de vérifier la possibilité de mesurer des profils de vitesse dans le sodium dans un écoulement connu contenu dans une cuve en cuivre. La sonde utilisée est un transducteur ultrasonore haute température (TUSHT) plongé directement dans le sodium avec lequel aucune mesure de vitesses n'avait encore été réalisée. Ce type de sonde a l'avantage de s'affranchir des réflexions dues aux parois car elle peut être plongée directement dans le sodium. L'appareil de mesures permettant de recueillir le signal ultrasonore est un vélocimètre commercial DOP 2000 ayant l'avantage de s'adapter à n'importe quelles sondes.

Aspects techniques

Après avoir été étudié en eau avec une sonde commerciale, les mesures de l'écoulement ont pu être réalisées dans le sodium avec le TUSHT.

Pour diminuer les problèmes de réflexions des ultrasons et obtenir une meilleure conductivité de la chaleur, la cuve expérimentale est en cuivre.

Pour éviter une pollution excessive du sodium par la formation d'oxydes, l'atmosphère dans la cuve expérimentale est balayée par sa propre bouteille d'azote pur (0.6 ppm). La pression est maintenue pendant toute la durée de la campagne de mesures pour éviter de boucher le capillaire par capillarité par le sodium.

Pour que la sonde ultrasonore ne soit pas un piège à oxydes de sodium, un système de chauffage est fixé autour de la sonde. Grâce à la bonne conductivité du cuivre, ce système permet de réguler la température des cinq litres de sodium utilisés.

Une fine couche d'or déposée sur la surface de la sonde permet de s'assurer du mouillage de celle-ci par le sodium dès sa liquéfaction. Cette procédure permet d'éviter la phase de mouillage à chaud favorisant la formation d'oxydes donc la pollution du sodium.

Résultats

L'ensemble des mesures réalisées en eau et en sodium sur un écoulement en rotation solide permet de conclure que :

- Des particules d'oxydes de sodium ont servi de traceurs des ultrasons.
- Le DOP 2000 acquiert des mesures quantitatives de vitesse dans le sodium avec le TUSHT. La vitesse du son dans le sodium a été vérifiée ($V_{\text{son/sodium}} = 2501 \pm 34 \text{ m.s}^{-1}$)
- Les vitesses restent constantes sur toute la profondeur de tir des ultrasons pour les mesures faites avec la sonde Signal Processing et le TUSHT.
- Les vitesses moyennes mesurées sont proportionnelles à la vitesse de la rotation solide correspondante à un facteur de réponse K près. Ce facteur vaut :
 - 0.96, en eau avec une sonde commerciale Signal Processing,
 - 0.89, en eau avec la sonde TUSHT,
 - 0.54, en sodium avec la sonde TUSHT.
- Les mesures sont reproductibles sur plusieurs jours, dans le sodium si la formation des oxydes est maîtrisée.

Perspectives

Ces mesures de vitesse permettent d'envisager l'adaptation de ce système sur l'expérience VKS. Bien que la géométrie de la cuve soit plus grande, l'étude des paramètres du vélocimètre suppose que l'ensemble de l'écoulement peut être étudié sur au moins la moitié du diamètre. Le seul problème est que le sodium de l'expérience VKS traversant une purification le nettoyant de tout oxyde polluant est nettement plus propre que celui de cette étude. Le signal Doppler risque d'être très faible si aucun obstacle ne réfléchit les ultrasons. Néanmoins, le système DOP 2000 / TUSHT devrait permettre d'obtenir les premiers profils de vitesse de l'écoulement de l'expérience VKS.

FIGURES

figure 1 : Schéma de l'expérience VKS.....	6
figure 2 : Schéma de VKE avec le système de Vélocimétrie Laser Doppler.....	7
figure 3 : Schéma d'une onde ultrasonore	8
figure 4 : Absorption des ultrasons dans la matière.....	9
figure 5 : Transmission et réflexion des ultrasons perpendiculaires à l'interface.....	10
figure 6 : Transmission et Réfraction des ultrasons non perpendiculaires à l'interface	10
figure 7 : Réfraction des ultrasons	11
figure 8 : Principe de mesure de vitesse par ultrason.....	12
figure 9 : Principe de fonctionnement du vélocimètre ultrasonore.....	14
figure 10 : Schéma du montage permettant de déterminer la fréquence d'émission propre à la sonde à ultrason TUSHT	15
figure 11 : Résultats sous Matlab des courbes de Lissajou obtenues pour différentes fréquences d'excitation.....	16
figure 12 : Schéma de l'écoulement de base étudié : écoulements primaire (rotation d'ensemble) et secondaire (aspiration par la turbine).....	18
figure 13 : Calcul du champ de vitesse dans l'écoulement de base dans l'hypothèse d'une rotation solide	19
figure 14 : Ecoulement en eau ; profils de vitesse obtenus pour différentes hauteurs de fluide.....	20
figure 15 : Ecoulement en eau ; détermination de la hauteur minimale de fluide nécessaire pour éviter une zone de cavitation.....	21
figure 16 : Ecoulement en eau ; profils de vitesse acquis pour des vitesses allant de 40 à 160 tr.mn ⁻¹ (de 0.67 à 2.67 Hz) avec une sonde Signal Processing.....	21
figure 17 : Ecoulement en eau ; profils de vitesse acquis pour des vitesses allant de 40 à 160 tr /mn (de 0.67 à 2.67 Hz) avec la sonde TUSHT.....	22
figure 18 : Ecoulement en eau ; vitesses moyennes pour chaque vitesse du moteur en fonction de la rotation solide équivalente	23
figure 19 : Photo de la boîte à gants Pénélope	25
figure 20 : Ecoulement en sodium ; Profils d'écho obtenu fluide au repos, turbine d'entraînement et couvercle enlevés avec et sans obstacle	27
figure 21 : Ecoulement en sodium ; Tableau récapitulatif des calculs de vitesse de propagation des ultrasons dans le sodium.....	28

figure 22 : Ecoulement en sodium ; Position de l'écho d'un obstacle déplacé dans l'axe de la sonde et Position intégrée déduite de la vitesse moyenne mesurée par effet Doppler	29
figure 23 : Ecoulement en sodium ; Profil de vitesse moyenné sur 512 profils, Vitesse du moteur : 160 tr.mn ⁻¹ (2.67 Hz)	29
figure 24 : Ecoulement en sodium et en eau ; Profils de vitesse acquis à 160 tr.mn ⁻¹ (2.67 Hz)	30
figure 25 : Ecoulement en sodium : Schéma du dispositif de la campagne de mesure	31
figure 26 : Ecoulement en sodium : profils de vitesse acquis pour des vitesses allant de 40 à 230 tr.mn ⁻¹ (de 0.67 à 3.83 Hz) avec la sonde TUSHT pour une PRF de 180 µs.....	33
figure 27 : Ecoulement en sodium : profils de vitesse acquis pour des vitesses allant de 40 à 230 tr.mn ⁻¹ (de 0.67 à 3.83 Hz) avec la sonde TUSHT pour une PRF de 430 µs.....	34
figure 28 : Ecoulement en sodium : Nombre de zéros moyen enregistrés de la SérieA en fonction de la profondeur d'analyse, acquis pour trois vitesses de rotation de la turbine (40, 155 et 230 tr.mn ⁻¹ soit 0.67, 2.58 et 3.83 Hz) avec la sonde TUSHT.....	35
figure 29 : Ecoulement en sodium : Ecart-type de la SérieA en fonction de la profondeur d'analyse, calculés pour trois vitesses de rotation de la turbine (40, 155 et 230 tr.mn ⁻¹ soit 0.67, 2.58 et 3.83 Hz) avec la sonde TUSHT	36
figure 30 : Ecoulement en sodium : Vitesse moyenne des profils acquis de la SérieA en fonction de la vitesse de rotation de la turbine comprise entre 40 et 230 tr.mn ⁻¹ soit 0.67 et 3.83 Hz) avec la sonde TUSHT.....	37
figure 31 : Ecoulement en sodium : Evolution du facteur de réponse K au cours du temps avec la sonde TUSHT.....	38
figure 32 : Ecoulement en eau et en sodium : vitesses moyennes mesurées en fonction de la rotation solide correspondante réalisées en eau et en sodium.....	40

BIBLIOGRAPHIE

D. Brito, H.C. Nataf, P. Cardin, J. Aubert and J.P. Masson, *Ultrasonic Doppler velocimetry in liquid gallium*. Exp. in Fluids **31**, 653-663 (2001).

S. Eckert and G. Gerbeth, *Velocity measurements in liquid sodium by means of ultrasound Doppler velocimetry*. Exp. in Fluids **32**, 542-546 (2002).

N. Takenaka *et al.*, *Liquid metal flow measurement by neutron radiography*. Nucl. Instr. Methods Phys. Res. **A377**, 156-160 (1996).

Y. Takeda, *Velocity profile measurement by ultrasound Doppler shift method*. International Journal Heat & Fluid Flow **7**, 313 (1986).

Y. Takeda, *Measurement of velocity profile of mercury flow by ultrasound Doppler shift method*. Nuclear Technology **79**, 120 (1987).

Y. Takeda, *Development of ultrasound velocity profile monitor*. Nuclear Engineering & Design **126**, 277 (1990).

Y. Takeda, *Velocity Profile Measurement by Ultrasonic Doppler Method*. Experimental Thermal and Fluid Science **10**, 444-453 (1995).

Y. Takeda, *Ultrasonic Doppler method for velocity profile measurement in fluid dynamics and fluid engineering*. Exp. in Fluids **26**, 177-178 (1999).

Y. Takeda and H. Kikura, *Flow mapping of the mercury flow*. Exp. in Fluids **32**, 161-169 (2002).

N. Takenaka *et al.*, *Liquid metal flow measurement by neutron radiography*. Nucl. Instr. Methods Phys. Res. **A377**, 156-160 (1996).

APPENDICE : CALCULS DES INCERTITUDES SUR LES MESURES DE VITESSE DU SON DANS LE SODIUM

Cette annexe détaille le calcul des incertitudes sur la mesure de la vitesse du son dans le sodium. Six profils d'écho ont été utilisés pour réaliser cette mesure. L'incertitude sur la position de l'obstacle est de 5 mm. La résolution temporelle fixée dans la configuration du vélocimètre est de 1500 ns.

L'équation suivante permet de calculer la vitesse du son :

$$V = D / T$$

avec

$V \text{ (m.s}^{-1}\text{)}$: vitesse du son

$D \text{ (m)}$: distance entre la sonde et l'obstacle

$T \text{ (s)}$: temps nécessaire aux ultrasons pour parcourir la distance D

En posant, d l'incertitude sur D et t l'incertitude T , l'équation suivante permet d'obtenir l'incertitude v de V :

$$v = \pm D / T \times (d / D + t / T)$$

Exemple sur la 1^{ère} mesure :

- $D = 206 \text{ mm}$
- $d = 5 \text{ mm}$
- Numéro du point à mi-hauteur : 110
- $t = 1500 \text{ ns}$

on obtient :

- $V = 206 / (110 \times 1500 / 2) = 2497 \text{ m.s}^{-1}$; la résolution étant le temps nécessaire pour faire un aller-retour
- $v = \pm 2497 \times (5 / 206 + 1 / 110) = \pm 83.31 \text{ m.s}^{-1}$

En effectuant ce même calcul sur les six profils d'écho, une valeur moyenne de la vitesse est obtenue. Le calcul suivant donne l'incertitude moyenne correspondante :

$$i = \langle I \rangle / \sqrt{n}$$

avec

i : incertitude moyenne sur l'ensemble des mesures

$\langle I \rangle$: moyenne des incertitudes de l'ensemble des mesures

n : nombre de mesures

Détail du calcul final : $i = ((83.31 + 82.35 + 84.28 + 83.31 + 84.28 + 83.31) / 6) / 2.45 = 34 \text{ m.s}^{-1}$