

**ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ
À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE**

**COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M. Ing**

**PAR
VINCENT NICOLAS**

**DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE DE CALIBRATION DES DÉBIMÈTRES
DE VAPEUR BASÉE SUR LA MESURE DU POIDS DE CONDENSÂT**

MONTREAL, 18 JUIN 2002

© droits réservés Vincent Nicolas

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

**M. Louis Lamarche, professeur, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de Technologie Supérieure**

**M. Stanislaw Kajl, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de Technologie Supérieure**

**M. Christian Masson, co-directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de Technologie Supérieure**

**M. Réal Olivier, ingénieur
ECO Energie Conseil Olivier**

IL A FAIT L'OBJET D'UNE PRÉSENTATION DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 12 JUIN 2002

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE DE CALIBRATION DES DÉBITMÈTRES DE VAPEUR BASÉE SUR LA MESURE DU POIDS DE CONDENSÂT

Vincent Nicolas

SOMMAIRE

Ce projet consiste à développer une méthode de calibration des débitmètres de vapeur en utilisant la vapeur comme fluide de calibration, au lieu de l'air ou l'eau habituellement utilisé, pour améliorer la précision de calibration.

Le banc d'essai utilisé est composé d'un échangeur de chaleur, un système de pesée, un débitmètre à calibrer et une tuyère à vitesse critique.

Le principe de la méthode consiste à maintenir le régime permanent et mesurer la variation de masse de condensât pendant une période de temps pour obtenir une valeur de débit qu'on compare à la mesure du débitmètre à calibrer.

Voici les étapes du projet : analyse du comportement thermique du banc d'essai, étude de la précision de la méthode proposée et vérification de la calibration d'un débitmètre.

Les résultats obtenus ont permis de prouver que ce banc d'essai permettait de réaliser des calibrations de débitmètres de vapeur avec une bonne précision.

DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE DE CALIBRATION DES DÉBITMÈTRES DE VAPEUR BASÉE SUR LA MESURE DU POIDS DE CONDENSÂT

Vincent Nicolas

SOMMAIRE

Ce projet de maîtrise consiste à développer une méthode de calibration des débitmètres de vapeur en utilisant la vapeur comme fluide de calibration. En effet, jusqu'à maintenant, de tels débitmètres sont calibrés en utilisant l'air ou l'eau comme fluide de calibration. La norme ASME/ANSI MFC-6M-1987, portant sur la mesure de débit par des débitmètres de type Vortex, stipule que la précision de ces débitmètres pourrait être améliorée par leur calibration sur place, en utilisant donc la vapeur comme fluide de travail. D'autre part, cette même norme suggère d'effectuer cette calibration en comparant la mesure du débitmètre à calibrer avec celle d'une tuyère à vitesse critique. Le banc d'essai utilisé se trouve au Centre de Technologie Thermique (CTT) de l'École de Technologie Supérieure (ETS) et est composé d'un échangeur de chaleur permettant de condenser la vapeur, une balance pour mesurer la masse de condensât obtenu, un débitmètre à calibrer et une tuyère à vitesse critique. Un système d'acquisition de données permet d'enregistrer les résultats des essais.

Le principe de la mesure consiste à maintenir un régime permanent et mesurer la variation de masse de condensât pendant une période de temps donnée pour obtenir une valeur moyenne de débit sur cette période et la comparer à la valeur lue sur le débitmètre à calibrer.

Le projet est composé de différentes étapes : l'analyse du comportement thermique du banc d'essai, dans le but d'ajuster le design de celui-ci afin de permettre la calibration et l'étude de la précision de la méthode de mesure utilisée dans la procédure de calibration. De plus, une vérification de calibration d'un débitmètre sera réalisée.

Les résultats obtenus nous ont permis de prouver que ce banc d'essai permettait de réaliser des calibrations de débitmètres de vapeur en utilisant la vapeur comme fluide de calibration avec une bonne précision.

DEVELOPMENT OF A STEAM FLOW METER CALIBRATION BASED ON MEASUREMENT OF THE MASS OF CONDENSATE

Vincent Nicolas

ABSTRACT

This master project consists in developing a method of calibration of steam flow meters by using steam as the working fluid. Indeed, until now, such flow meters are calibrated by using air or water as the working fluid. The ASME/ANSI MFC-6M-1987 standard, dealing with the measurement of flow rate with Vortex flowmeters, stipulate that the accuracy of these flowmeters can be improved by in situ calibration, using thus steam as the working fluid. In addition, this same standard suggest to do the calibration by comparing the measures of the calibrated flowmeter with those from a critical flow nozzle.

The testing bench used is located in the Centre of Thermal Technology (CTT) of ETS and is composed of a heat exchanger allowing to condensate the steam, a scale with a weigh tank, a calibrated flowmeter and a critical flow nozzle. An acquisition data system allows to record the tests results.

The principle of the measure consists in maintaining a steady-state regime and in measuring the variation of the mass of condensate during a period of time to obtain an average value of the flow rate on this period and comparing it to the reading value on the calibrated flow meter.

The project is composed of different steps : the analyse of the thermal behaviour of the testing bench, with an aim of adjusting this design to allow the calibration and the study of the accuracy of the measurement method used in the calibration procedure. Moreover, one checking of a flow meter calibration will be carried out.

The results obtained allowed us to prove the the testing bench can be used to calibrate steam flowmeters using steam as the working fluid with a good accuracy.

REMERCIEMENTS

Je voudrais exprimer ma vive reconnaissance à mon directeur de mémoire M. Stanislaw Kajl pour son soutien et sa grande disponibilité tout au long de ce travail. Sans lui, ce mémoire n'existerait pas. Je remercie également mon co-directeur de mémoire M. Christian Masson pour toute l'aide qu'il m'a apportée.

Je voudrais aussi remercier M. Louis Lamarche, professeur au département de génie mécanique, pour ses conseils avisés qui m'ont été fort utiles.

La bonne humeur des étudiants de maîtrise et doctorat et des stagiaires du local 2802 m'ont permis également de travailler dans une ambiance très agréable tout au long de ce séjour ici. Pour cela, je les remercie également.

Et pour finir, je tiens à adresser des remerciements chaleureux à mes parents, ma famille et tous mes amis d'ici et de là-bas pour leur soutien moral.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE	i
ABSTRACT.....	ii
REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES ABREVIATIONS ET SIGLES	viii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	3
1.1 Centres de calibration.....	3
1.2 Calibration des débitmètres de vapeur	4
1.3 Titre en vapeur	5
CHAPITRE 2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES DÉBITMÈTRES	7
2.1 Principaux types de débitmètres	7
2.1.1 Débitmètres à mesure de différentielle de pression	7
2.1.2 Débitmètres à tube de Pitot	8
2.1.3 Débitmètres à section variable – rotamètres	9
2.1.4 Débitmètres électromagnétiques	10
2.1.5 Débitmètres à vortex	11
2.1.6 Débitmètres à turbine	12
2.2 Théorie du débitmètre à vortex	13
2.3 Théorie de la tuyère à vitesse critique.....	15
CHAPITRE 3 MÉTHODE DE CALIBRATION PROPOSÉE	17
3.1 Description du banc d’essai	17
3.1.1 Présentation du banc d’essai et méthode de calibration.....	17
3.1.2 Procédure d’opération et principe de contrôle	19
3.1.3 Traitement des résultats.....	19
3.2 Comportement du banc d’essai	23
3.2.1 Première série d’essais	23

3.2.2	Augmentation de la hauteur de condensât	24
3.2.2.1	Sortie de condensât à l'air libre.....	25
3.2.2.2	Augmentation de hauteur de condensât et baisse de pression.....	26
3.2.2.3	Contournement du purgeur	28
3.2.2.4	Sommaire sur l'augmentation de hauteur du condensât	29
3.2.3	Calcul de la qualité de la vapeur	32
3.2.4	Débit d'eau de refroidissement	32
3.2.5	Sommaire du comportement du banc d'essai	34
3.3	Méthode de calibration proposée	34
CHAPITRE 4 ÉTUDE DE LA PRÉCISION.....		35
4.1	Généralités.....	35
4.2	Analyse des sources d'erreur	36
4.2.1	Niveau de condensât dans l'échangeur de chaleur.....	36
4.2.2	Erreur sur la correction due à l'accumulation	38
4.2.3	Précision de la balance	39
4.2.4	Re-vaporisation	40
4.2.5	Vaporisation	40
4.2.6	Erreur aléatoire.....	41
4.2.7	Fuites.....	45
4.3	Synthèse	45
CHAPITRE 5 RÉSULTATS ET DISCUSSION		49
5.1	Tests avec le débitmètre vortex de 1.5 in.....	49
5.1.1	Facteur de proportionnalité	50
5.2	Essai avec la tuyère à vitesse critique et débitmètre de 2 in	53
5.2.1	Résultats	53
5.2.2	Synthèse	56
CONCLUSION.....		58
ANNEXE 1 Courbes des différents tests		60
ANNEXE 2 Programmes Matlab.....		68
ANNEXE 3 Rapport de calibration de la balance.....		93
ANNEXE 4 Publication		94
BIBLIOGRAPHIE		105

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau I	Tableau des écart-types moyens pour chaque intervalle de temps22
Tableau II	Variation de l'écart-type du débit pour chaque quart d'une période stabilisée de 20 min.....22
Tableau III	Masse correspondant à la variation de hauteur dans l'échangeur.....31
Tableau IV	Erreurs aléatoires pour chaque mesure42
Tableau V	Erreur aléatoire sur la moyenne44
Tableau VI	Résumé des différentes erreurs46
Tableau VII	Résultats des erreurs sur chacune des plages choisies47
Tableau VIII	Erreurs sur le débit volumique, corrigé sur la pression ou sur la température.....48
Tableau IX	Facteur K.....51
Tableau X	Résultats pour le débitmètre de 2 in et la tuyère à vitesse critique57

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1	Schéma du banc d'essai2
Figure 2	Principe du tube de Pitot8
Figure 3	Comparaison de la température mesurée par rapport à la température de saturation à la pression mesurée (ANNEXE 1, Test 1)..... 14
Figure 4	Comparaison du débit moyen obtenu par mesure du poids de condensât et par un débitmètre vortex sur 1 min, 3 min et 5 min (voir ANNEXE 1, Test 2)... 20
Figure 5	Augmentation de la hauteur de condensât après stabilisation.....24
Figure 6	Différentes sorties du condensât25
Figure 7	Pression et variation de la hauteur avec sortie de condensât à l'air libre (voir ANNEXE 1, Test 1)26
Figure 8	Variation de la pression équivalente à l'accumulation de condensât dans l'échangeur, pour deux plages de valeurs (voir ANNEXE 1, Test 3)27
Figure 9	Débit obtenu d'après la mesure de la masse de condensât et augmentation de la hauteur de condensât (voir ANNEXE 1, Test 4).....29
Figure 10	Schéma de l'échangeur de chaleur30
Figure 11	Variation de la masse de condensât en fonction de la variation de hauteur de condensât dans l'échangeur de chaleur (ANNEXE 1, Test 6).....31
Figure 12	Correction du débit en tenant compte de l'accumulation de condensât dans l'échangeur (voir ANNEXE 1, Test 1)32
Figure 13	Débit de l'eau de refroidissement dans l'échangeur de chaleur.....33
Figure 14	Erreur aléatoire et erreur systématique36
Figure 15	Ecart relatif entre le débit calculé avec la mesure du poids de condensât, avec et sans la correction sur la hauteur (voir ANNEXE 1, Test 5).....37
Figure 16	Comparaison entre le débit obtenu par la masse de condensât avec et sans correction du niveau de condensât (voir ANNEXE 1, Test 5).....37
Figure 17	Sélection des plages pour le calcul de l'erreur aléatoire.....43
Figure 18	Comparaison des différents débits pour deux séances d'essai49
Figure 19	Agrandissement pour une plage de débit50
Figure 20	Application et détermination du facteur de correction (voir ANNEXE 1, Test 2)52
Figure 21	Application du même facteur K sur le test 1 (voir ANNEXE 1, Test 1)52
Figure 22	Résultats obtenus avec la tuyère à vitesse critique (voir ANNEXE 1, Test 6)54
Figure 23	Détails d'une période de mesure (voir ANNEXE 1, Test 6)55
Figure 24	Calibration du débitmètre à vortex (voir ANNEXE 1, Test 6 et Test 7)56

LISTE DES ABREVIATIONS ET SIGLES

A	Section de l'échangeur de chaleur, m ²
C_p	Chaleur spécifique à pression constante, kJ/kg.K
g	Accélération de la pesanteur, m/s ²
h_{vap}	Enthalpie de la vapeur, kJ/kg
h_{cond}	Enthalpie du condensât, kJ/kg
k	Rapport des chaleurs spécifiques
K	Facteur de proportionnalité du débitmètre à vortex
\dot{m}_{masse}	Débit massique obtenu par mesure de la masse de condensât, kg/s
\dot{m}_{acc}	Débit massique obtenu d'après l'accumulation de condensât dans l'échangeur, kg/s
\dot{m}_{total}	Débit massique total, kg/s
$\Delta\dot{m}_{masse}$	Erreur sur le débit massique obtenu par mesure de la masse de condensât, kg/s
$\Delta\dot{m}_{acc}$	Erreur sur le débit massique obtenu d'après l'accumulation de condensât dans l'échangeur, kg/s
$\Delta\dot{m}_{total}$	Erreur sur le débit massique total, kg/s
\dot{m}_T	Débit massique obtenu par le débitmètre à vortex et corrigé en température, kg/s
\dot{m}_p	Débit massique obtenu par le débitmètre à vortex et corrigé en pression, kg/s
\dot{m}_{ref}	Débit massique de référence du débitmètre à vortex, kg/s
\dot{m}_{vap}	Débit massique de vapeur, kg/s
\dot{m}_{eau}	Débit massique d'eau de refroidissement, kg/s
P₂	Pression en amont de la tuyère, Pa

\dot{Q}_{vap}	Quantité de chaleur fournie par la vapeur, kW
\dot{Q}_{eau}	Quantité de chaleur absorbée par l'eau, kW
R	Constante des gaz parfaits, 8.135 kJ/kmol.K
S	Surface d'eau du réservoir en contact avec l'air, m ²
T ₂	Température en amont de la tuyère, °C
Δt	Intervalle de temps pour le calcul du débit, min
ΔT	Variation de température de l'eau de refroidissement entre l'entrée et la sortie de l'échangeur de chaleur, °C
v _{ref}	Volume spécifique de la vapeur à la température et la pression de référence, m ³ /kg
v _T	Volume spécifique de la vapeur à la température mesurée, m ³ /kg
v _p	Volume spécifique de la vapeur à la pression mesurée, m ³ /kg
W	Quantité d'eau évaporée, kg/h
x	Teneur en eau de l'air, kg d'eau/kg d'air sec
x''	Teneur en eau de l'air saturé à la température de la surface de l'eau, kg d'eau/kg d'air sec
\bar{x}	Moyenne des valeurs mesurées du débit, kg/s
Z	Facteur de compressibilité
ρ	Masse volumique du condensât, kg/m ³
σ	Coefficient d'évaporation, kg/m ² h
σ _x	Écart-type de la moyenne des mesures de débit, kg/s
μ	Valeur moyenne du débit, kg/s

INTRODUCTION

Actuellement, l'utilisation de la vapeur est très répandue, que ce soit dans l'industrie ou dans le bâtiment, par exemple pour le chauffage urbain. Être capable de mesurer avec précision la quantité de vapeur utilisée présente donc un véritable intérêt économique. À Montréal comme dans beaucoup de grandes villes se sont développés des réseaux de vapeur. La vapeur est produite par des centrales puis acheminée par un système de canalisation jusqu'aux utilisateurs.

Le Centre de Technologie Thermique (CTT) de l'École de Technologie Supérieure (ETS) est un laboratoire thermique de taille industrielle unique en Amérique du Nord. Il a été développé conjointement par la Corporation de Chauffage Urbain de Montréal (CCUM), l'Agence de Développement Economique du Canada et l'ETS. Un banc d'essai présent au CTT a été mis au point pour permettre de calibrer des débitmètres de vapeur avec la vapeur comme fluide de calibration au lieu de l'air ou l'eau qui sont les fluides habituellement utilisés.

Ce banc d'essai est relié au réseau de vapeur de la CCUM. Le débitmètre à calibrer est placé sur la ligne de vapeur. Ensuite, la vapeur est condensée dans un échangeur de chaleur vertical, et le condensât envoyé dans un réservoir sur une balance pour être pesé (Figure 1). En maintenant un régime d'écoulement permanent, on obtient un débit stabilisé dont on peut mesurer la valeur moyenne sur un intervalle de temps donné permettant ainsi de calibrer le débitmètre. Plusieurs paramètres contrôlent le régime permanent : la pression et la température de la vapeur, le niveau de condensât dans l'échangeur de chaleur, la variation de température de l'eau de refroidissement dans l'échangeur de chaleur. Une première partie du travail consistera donc à analyser le comportement du banc d'essai pour caractériser le régime permanent.

La constitution du banc d'essai présente un certain nombre d'éléments de mesure (transmetteurs de pression, capteurs de température, balance, valves ...). Il faudra donc également évaluer la précision que l'on peut obtenir avec cet appareillage.

Enfin, on sera en mesure de calibrer des débitmètres avec ce système. Une tuyère à vitesse critique sera installée sur la ligne de vapeur, en aval du débitmètre pour comparer les valeurs de débit obtenues. On aura donc pour un même débit soit trois mesures (débitmètre à tester, tuyère et celle obtenue par pesée du condensât) si l'on choisit de tester un débitmètre, ou alors deux mesures (tuyère et celle obtenue par pesée du condensât) si l'on calibre un débitmètre.

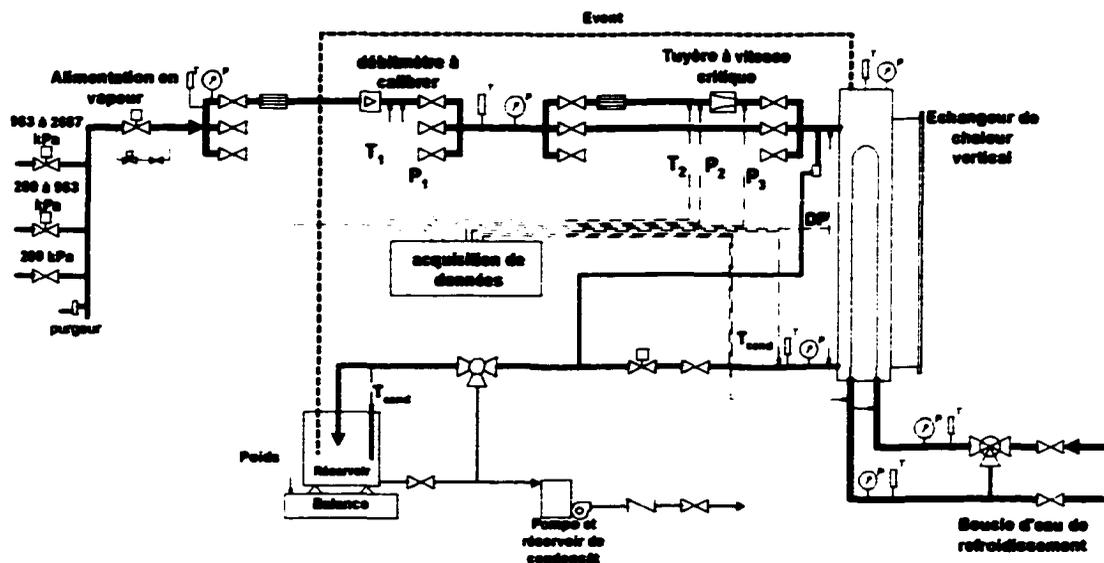


Figure 1 Schéma du banc d'essai

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTERATURE

La vapeur d'eau utilisée dans les différentes applications industrielles est la plupart du temps de la vapeur saturée, ou bien avec un titre en vapeur très proche de 1. Rappelons succinctement que la vapeur dite saturée est composée uniquement de vapeur sèche, son titre vaut un (le titre en vapeur est le rapport entre la masse de vapeur sèche et la masse totale du fluide). La vapeur surchauffée est obtenue en chauffant un peu plus la vapeur à partir de son point de saturation. Ainsi on est certain que la vapeur obtenue est purement sèche et éloignée du point de saturation, c'est-à-dire du début de condensation. La mesure du débit va donc dépendre du titre en vapeur, et de là toute la précision du système de mesure va en découler. La calibration des débitmètres de vapeur doit donc tenir compte de cette fraction d'eau. Ce chapitre présente dans un premier temps quelques grands centres de calibration ainsi que les différents travaux qui ont été réalisés dans le domaine de la calibration des débitmètres de vapeur, puis les moyens pour déterminer le titre en vapeur d'eau.

1.1 Centres de calibration

Parmi les grands centres de calibration, citons-en deux : le laboratoire de calibration de débitmètre ABB Kent-Taylor près de Sydney [1] et le Colorado Engineering Experiment Station (CEES) à Nunn dans le Colorado [2].

Le premier centre possède des installations permettant de calibrer une grande variété de débitmètres (électromagnétique, à turbine, à vortex, à différentielle de pression...) et est situé sur le site d'une usine du manufacturier. Les tailles de débitmètres pouvant être calibrés à cet endroit varient des plus petits diamètres jusqu'à un maximum de 750 mm de diamètre.

Le second centre situé au Colorado a développé une expertise au niveau de la calibration des débitmètres pour le gaz naturel. Il respecte également les critères de traçabilité imposés par le National Institute of Standard and Technology (NIST) avec notamment une étude des incertitudes dans les procédés de calibration des débitmètres [3].

1.2 Calibration des débitmètres de vapeur

La plupart du temps, les débitmètres de vapeur sont calibrés en utilisant de l'eau ou de l'air comme fluide de calibration. La norme ASME/ANSI MFC-6M-1987 «Measurement of Fluid Flow in Pipes Using Vortex Flow Meters»[4] stipule que la précision de ce type de débitmètre pourrait être améliorée en calibrant directement avec de la vapeur. Owen et Hussein ([5,6]) ont déjà travaillé sur des calibrations avec de la vapeur. La précision obtenue lors de la mesure d'un débit de vapeur dépend pour beaucoup du titre en vapeur. Les essais qu'ils ont réalisés consistaient à calibrer les débitmètres avec de la vapeur surchauffée (vapeur sèche) dans un premier temps, puis avec de la vapeur saturée de haute qualité (dont le titre en vapeur est supérieur à 90%) dans le but de déterminer des facteurs de corrections permettant d'améliorer la précision des débitmètres de vapeur. Ils ont développé cette méthode et étudié l'influence des différents facteurs de correction possibles. A l'aide d'un séparateur et d'un surchauffeur, ils obtiennent de la vapeur surchauffée (sèche) qu'ils utilisent pour calibrer le débitmètre par une méthode de mesure du poids de condensât, c'est-à-dire qu'en utilisant un condenseur, ils condensent la vapeur et pèsent le condensât. Puis ils recommencent la calibration en injectant cette fois-ci une certaine quantité bien déterminée d'eau dans la vapeur sèche et remesurent le débit correspondant. Ils peuvent ainsi connaître pour chaque pourcentage d'humidité (c'est-à-dire pour différentes valeurs du titre en vapeur), le facteur de correction applicable. Selon leurs résultats, ce facteur de correction augmente lorsque la fraction d'humidité augmente et est indépendant de la pression et du débit. Ils ont notamment mis en évidence que pour une vapeur contenant moins de 2%

d'humidité, la correction à apporter est très faible (multiplication par un facteur compris entre 1 et 1.01) , et ceci pour différents types de débitmètres.

D'autre part, la présence d'eau dans les canalisations de vapeur peut créer des coups de bélier et endommager l'installation. En effet, lorsque la vapeur se refroidit, elle se condense et de l'eau s'accumule. Lorsqu'on remet l'installation en marche, la vitesse de la vapeur est relativement élevée : sa vitesse peut atteindre 10 fois la vitesse de l'eau dans la tuyauterie à cause de sa faible densité et viscosité. De plus, lors du réchauffement de l'installation, la vapeur se condense au contact des parois plus froides de la tuyauterie, ce qui implique une présence encore plus importante d'eau dans la canalisation. Lorsque la vapeur entre en contact avec une accumulation d'eau dans la canalisation, elle pousse celle-ci à grande vitesse et lorsque cette accumulation arrive au niveau d'un appareil de mesure ou d'un coude, la force engendrée est très importante ce qui peut endommager l'équipement ou même le détruire dans certains cas. Owen, Hussein et Amini ont étudié l'impact de cette accumulation d'eau sur la mesure de débit de vapeur ([7]). Certaines précautions sont donc à prendre lors de la mise en pression. En fonctionnement, l'impact sur la précision est nul.

1.3 Titre en vapeur

Nous venons de voir que pour connaître le titre de la vapeur qu'ils utilisent, les deux auteurs cités précédemment (Owen et Hussein) réalisaient leurs essais avec de la vapeur surchauffée à laquelle ils rajoutaient une fraction d'eau bien connue. En effet, déterminer le titre en vapeur est une tâche importante pour arriver à mesurer un débit de vapeur avec précision. Le « British Coal Utilisation Research Association » ([8]) dresse le bilan des différentes méthodes existantes. Ces méthodes se divisent en deux groupes : celles qui consistent à séparer l'eau de la vapeur et ensuite à mesurer chacun des constituants, et celles dont le principe est de convertir le mélange vapeur-eau en un fluide de phase homogène par condensation de la vapeur ou évaporation de l'eau. Cependant, le

problème de ces deux types de méthode est que l'on ne peut les appliquer qu'à un échantillon du mélange vapeur-eau, et que cet échantillon doit être représentatif de l'ensemble. C'est là qu'est la difficulté. Même si la mesure de la quantité d'eau est précise, le doute persiste quant à la représentativité de l'échantillon prélevé. D'autre part, entre le moment où l'échantillon est prélevé et le moment où il est testé, la température a le temps de diminuer légèrement et donc la qualité de la vapeur peut être modifiée. Il est en effet impossible d'isoler thermiquement l'échantillon de façon parfaite. On aura obligatoirement des pertes de chaleur même si les plus grandes précautions sont prises.

La précision globale de la mesure de débit est censée être améliorée grâce à la détermination du titre en vapeur. Cependant, le gain de précision global n'est pas tellement important, compte tenu du manque total de précision de la détermination du titre.

Pour palier à ce problème, Hussein, Owen et Amini [9] ont mis au point un procédé permettant de mesurer le titre d'une vapeur d'eau. A l'aide d'un séparateur, ils enlèvent toute l'eau de l'écoulement de vapeur, puis ils mesurent cette quantité d'eau récupérée avec un débitmètre de condensât. La vapeur alors sèche passe dans un débitmètre de vapeur. Ainsi, ils connaissent le débit de vapeur sèche et la quantité de condensât. Ils sont donc en mesure d'avoir le titre d'humidité de la vapeur. Cette méthode est bien plus précise car elle ne nécessite pas l'extraction d'un échantillon et est de plus bien plus pratique car elle permet de mesurer en continu la fraction d'eau présente dans la vapeur. Cependant, elle reste difficile à mettre en œuvre et nécessite des appareillages supplémentaires pour mesurer la quantité de condensât extraite. Il est donc plus simple d'utiliser de la vapeur saturée, ou avec un titre en vapeur légèrement inférieure à 100 % en plaçant un séparateur en amont du débitmètre. Ainsi, on évite le problème de la détermination du titre en vapeur.

CHAPITRE 2

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES DÉBITMÈTRES

Une calibration consiste à donner la relation qui relie une grandeur physique mesurée à la valeur de la quantité que l'on souhaite mesurer. Avec notre banc d'essai, nous allons pouvoir calibrer des débitmètres, c'est-à-dire donner une relation entre une quantité physique mesurée dépendant du type de débitmètre et la valeur du débit correspondant.

La relation obtenue dépend donc du type de débitmètre utilisé. Une rapide présentation des différents débitmètres existants va donc être faite, puis une analyse plus détaillée des deux débitmètres utilisés actuellement avec notre banc d'essai (débitmètre de type vortex et tuyère à vitesse critique) sera effectuée.

2.1 Principaux types de débitmètres

Les débitmètres sont traditionnellement répertoriés en fonction du principe physique sur lequel repose leur fonctionnement. Cette classification est utilisée dans la plupart des ouvrages de références [10, 11 et 12]. Ces différentes catégories sont présentées par la suite.

2.1.1 Débitmètres à mesure de différentielle de pression

Dans cette catégorie, on trouve :

- les tubes Venturi,
- les plaque à orifice, et
- les tuyères.

Ces débitmètres entraînent une chute de pression statique du fluide en écoulement et la pression différentielle mesurée est fonction de la vitesse du fluide et donc de son débit volumique.

Les caractéristiques de ces débitmètres sont les suivantes :

- s'emploient aussi bien pour les liquides que pour les gaz
- précision globale de ce type de débitmètre pouvant atteindre $\pm 3\%$ à $\pm 5\%$
- rangeabilité 3 : 1 et plus

Les limites sont :

- pertes de charges relativement importantes

Nous reviendrons par la suite plus en détail sur la théorie de la tuyère.

2.1.2 Débitmètres à tube de Pitot

Un débitmètre à tube de Pitot permet de déterminer le débit à partir de la vitesse d'écoulement du fluide. Celle-ci est directement liée à la différence entre la pression totale (P_t) et la pression statique (P_s) mesurées à l'aide du tube de Pitot. (Figure 2)

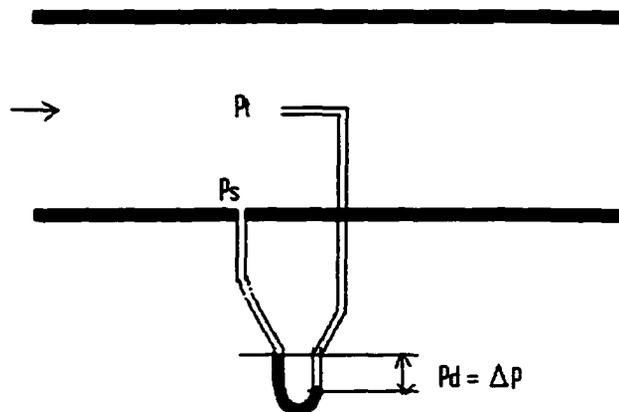


Figure 2 Principe du tube de Pitot

La vitesse de l'écoulement est alors donnée par l'équation suivante :

$$v = \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}} \quad (2.1)$$

Où ρ désigne la masse volumique du fluide.

Les caractéristiques de ce type de débitmètres sont les suivantes :

- s'emploie aussi bien pour les liquides que pour les gaz
- simple d'utilisation et coût peu élevé
- pertes de charges résiduelles faibles et l'on peut mesurer des débits dans des conduites de grand diamètre en supposant un profil de vitesse complètement développé
- précision bonne de $\pm 0.5\%$ à $\pm 5\%$
- rangeabilité 4 : 1

2.1.3 Débitmètres à section variable – rotamètres

Le rotamètre est destiné aux mesures de débits instantanés des gaz et des liquides et est composé d'un tube tronconique vertical, souvent en verre, évasé vers le haut, dans l'axe duquel se déplace un flotteur modifiant ainsi la section annulaire où s'écoule le fluide dont on veut mesurer le débit, toujours de bas en haut. Le débit est relié à la position du flotteur : ce dernier est en bas lorsque le débit est nul. La pression différentielle pousse le flotteur qui monte lorsque le débit augmente, jusqu'à une position d'équilibre.

Les caractéristiques des rotamètres sont les suivantes :

- lecture directe sans aucune énergie d'alimentation
- mesure des débits des liquides et des gaz
- simplicité d'utilisation et d'installation, encombrement réduit
- perte de charge résiduelle faible

- précision de l'ordre de $\pm 0.5 \%$ et rangeabilité 10 : 1

Ses limites sont :

- graduations de l'échelle spécifiques à un fluide donné
- sensibilité aux variations de masse volumique du fluide
- pression maximale limitée et fragilité des tubes de verre

2.1.4 Débitmètres électromagnétiques

Les débitmètres électromagnétiques ne comportent aucune pièce mobile et permettent de mesurer la vitesse instantanée avec une bonne précision des liquides corrosifs, visqueux, difficilement manipulables ou très pollués.

Leur fonctionnement repose sur la loi de Faraday sur l'induction électromagnétique. Le déplacement d'un conducteur électrique perpendiculairement aux lignes de force d'un champ magnétique engendre une tension induite E qui dépend de la vitesse de déplacement de ce conducteur. Dans le cas d'un liquide en écoulement, tout se passe comme si ce liquide était constitué de tranches circulaires conductrices se déplaçant dans un champ magnétique constant.

Le capteur du débitmètre est constitué d'un tube magnétique qui forme le corps de l'appareil et dans lequel circule le liquide à mesurer, d'un bobinage fournissant le champ magnétique appliqué et de deux électrodes pour recueillir la tension induite E engendrée par l'écoulement du liquide. La tension induite est donc reliée à la vitesse de l'écoulement. On obtient ainsi le débit.

Caractéristiques et avantages de ce type de débitmètres :

- linéarité de l'échelle
- précision excellente de l'ordre de $\pm 1 \%$ du débit mesuré
- rangeabilité 20 :1

- possibilité de mesurer le débit dans les deux sens
- installation possible des conduites de tailles très variées

Limites de ces débitmètres :

- ils ne mesurent que les débits des liquides conducteurs et sont donc inutilisables pour les gaz, vapeurs et les liquides non-électrolytes comme les produits pétroliers
- la pression et la température sont limitées

2.1.5 Débitmètres à vortex

Le principe de ces débitmètres est de créer des vortex dans l'écoulement du fluide en y plaçant un obstacle. Lorsque le fluide passe sur cet obstacle, il se crée des tourbillons qui se détachent sous l'effet de l'écoulement. Les variations de pression générées par ces tourbillons sont détectées par un capteur qui les convertit en impulsions électriques. Les tourbillons se forment de façon régulière et leur fréquence de détachement est alors reliée au débit. Nous reviendrons plus en détail sur le fonctionnement de ce type de débitmètre dans la section 2.2.

Les principales caractéristiques sont :

- précision de l'ordre de $\pm 0.5\%$ du débit
- bonne fidélité et échelle linéaire
- rangeabilité 30 : 1 et plus
- simplicité et robustesse (pas d'élément mobile)
- temps de réponse excellent

Ses limites sont :

- pertes de charge importantes
- sensibilité aux variations de viscosité, pression, température, masse volumique
- nécessité d'une conduite rectiligne

- difficultés à ne détecter que le passage des vortex et à filtrer les vibrations, les turbulences...

2.1.6 Débitmètres à turbine

Ces débitmètres font partie des débitmètres industriels les plus précis et conviennent pour une utilisation continue en régime stable.

Une turbine (hélice) est montée coaxialement à la conduite : le passage du fluide entraîne la rotation de cette hélice à une vitesse angulaire proportionnelle à la vitesse moyenne du liquide à travers la section de la conduite, et donc proportionnelle à son débit volumique. Chaque rotation correspond à un volume défini que l'on peut déterminer expérimentalement. Il n'y a ensuite qu'à mesurer la vitesse de rotation de l'hélice.

Caractéristiques et avantages de ce type de débitmètres :

- grande plage de débit mesurable et de taille de canalisation
- pression et température élevées
- précision variant de $\pm 0.1\%$ à $\pm 0.5\%$ du débit mesuré
- rangeabilité 10 : 1 à plus
- temps de réponse excellent

Les limites sont :

- la viscosité doit être basse pour avoir une bonne précision
- utilisation non recommandée avec des liquides chargés ou corrosifs susceptibles d'endommager l'hélice
- non linéarité de l'échelle pour les faibles débits

2.2 Théorie du débitmètre à vortex

Le principe du débitmètre à vortex est, tel qu'on l'a vu précédemment (2.1.5), de créer des tourbillons dans l'écoulement du fluide en y plaçant un obstacle. Puis, par un système piézo-électrique, le nombre de vortex est relié à la vitesse de l'écoulement. Connaissant les caractéristiques dimensionnelles du tuyau, on obtient le débit volumique. Puis en mesurant au niveau de la section du débitmètre, la température et la pression, on peut connaître le volume spécifique du fluide et ensuite le débit massique.

Il existe donc un certain facteur de proportionnalité K fourni par le constructeur qui donne le nombre de pulsations obtenues (vortex) par m^3 (ou ft^3). Dans le cas du débitmètre utilisé, nous avons $K=18\ 716.7$ pulsations/ m^3 ($K=530$ pulsations/ ft^3). Nous vérifierons par la suite si cette valeur correspond bien à la calibration qu'il faudrait avoir pour notre débitmètre.

En fait, le dénombrement des tourbillons génère un signal électrique compris en 4 mA et 20 mA qui correspondent respectivement au débit le plus faible et au débit le plus élevé mesurables par le débitmètre.

Le débit massique mesuré par le débitmètre vortex peut être enregistré en étant corrigé par rapport à la température, c'est-à-dire que le débit volumique obtenu avec la mesure du nombre de vortex est ensuite divisé par le volume spécifique de la vapeur saturée à la température mesurée, ou alors à la pression mesurée. En effet, ce débit qui nous intéresse est déterminé à partir du débit de référence pour lequel a été établi le facteur de proportionnalité. La Figure 3 montre la température mesurée de la vapeur et la température de saturation à la pression de vapeur mesurée. Il y a une légère différence entre les deux, ce qui justifie les deux types de correction proposés (un écart de 0.67 %). Par exemple, pour le débit corrigé par rapport à la température, on a :

$$\dot{m}_T = \dot{m}_{ref} * \frac{V_{ref}}{V_T} \quad (2.2)$$

Une équation semblable peut être écrite pour le débit corrigé par rapport à la pression.

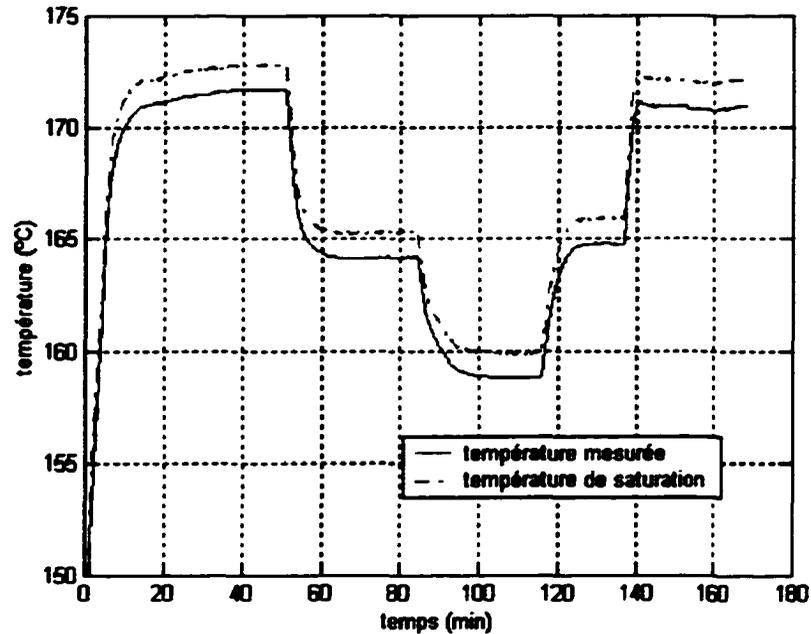


Figure 3 Comparaison de la température mesurée par rapport à la température de saturation à la pression mesurée (ANNEXE 1, Test 1)

Lors des premiers tests effectués, le système n'enregistrait les valeurs qu'avec une correction sur la température. On pouvait alors obtenir la mesure du débit corrigé par rapport à la pression par l'équation suivante :

$$\dot{m}_p = \dot{m}_T * \frac{V_T}{V_p} \quad (2.3)$$

Dans nos essais, nous allons pouvoir alors comparer la valeur du débit obtenu par notre méthode basée sur la mesure du poids de condensât aux valeurs obtenues par le

débitmètre à vortex, que ce soit avec une correction sur la température ou avec une correction sur la pression.

2.3 Théorie de la tuyère à vitesse critique

La vitesse d'écoulement de la vapeur au niveau du col est considérée comme sonique. Le calcul réalisé est conforme à la norme ASME/ANSI MFC-7M-1987 [13]. Il est basé sur l'hypothèse que l'écoulement est adiabatique et isentropique. Dans le cas où le fluide est un gaz parfait, le débit est donné par :

$$\dot{m} = \frac{ACP_2}{\sqrt{RT_2}} \quad \text{où} \quad C_i = \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (2.4) \text{ et } (2.5)$$

La vapeur d'eau ne se comporte cependant pas comme un gaz parfait, et on doit en tenir compte pour faire le calcul du débit. Amini et Owen [14] ont proposé une correction basée sur le facteur de compressibilité. Cette correction est classique bien qu'ils traitent du cas de la vapeur saturée où des problèmes particuliers liés à la condensation possible de la vapeur lors de l'expansion dans la tuyère peuvent être rencontrés. Essentiellement ils proposent une correction de type

$$\dot{m} = C \frac{AC_R P_2}{\sqrt{RT_2}} \quad \text{où} \quad C_R = \sqrt{\frac{k}{Z} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (2.6) \text{ et } (2.7)$$

Dans cette expression, le facteur de compressibilité Z et le rapport des chaleurs massiques k varient avec l'état thermodynamique.

Dans ce travail, le bilan d'énergie tel que proposé par Sullivan [15] a été utilisé. Il s'agit d'évaluer les propriétés au col de la tuyère (T^* , P^* , h^* , s^* , c^*) à partir des propriétés en amont (T_2 , P_2 , h_2 , s_2 , V_2). Le calcul démarre en supposant une pression critique P^* supposée, par exemple celle donnée par les relations de gaz parfait. A partir de cette pression critique supposée et de l'entropie ($s^* = s_2$), il est possible de déduire l'enthalpie

au col h^* ainsi que la vitesse du son c^* . Cette dernière donnée par l'équation de Maxwell ainsi que la vérification de la conservation de l'énergie sont présentées ci-dessous

$$c^{*2} = - \left(\frac{\partial h}{\partial P} \right)_s \left(\frac{\partial^2 h}{\partial P^2} \right)_s^{-1} \quad \frac{c^{*2}}{2} + h = h_0 \quad (2.8) \text{ et } (2.9)$$

Cette dernière équation a été obtenue en faisant l'hypothèse d'un écoulement adiabatique et en négligeant l'énergie cinétique en amont de la tuyère. Si la conservation de l'énergie est satisfaite, le calcul est terminé, sinon on répète les calculs avec une nouvelle pression au col. Une fois la pression au col connue, les autres propriétés thermodynamiques peuvent être déterminées. Le débit est alors donné par

$$\dot{m} = C \rho c^* A^* \quad (2.10)$$

où A^* est la section au col de la tuyère. Le coefficient de débit C dépend de la géométrie du type de section de la tuyère et du nombre de Reynolds de l'écoulement. Son expression est présentée dans la norme ASME/ANSI MFC-7M-1987 [13].

CHAPITRE 3

MÉTHODE DE CALIBRATION PROPOSÉE

La première étape du développement de cette méthode de calibration des débitmètres de vapeur est de connaître le comportement du banc d'essai. Ce dernier était déjà présent au CTT au début de l'étude. Cependant, relativement peu de test avait été effectué. Les essais réalisés ont permis de mettre en évidence la procédure d'opération, le principe de la mesure ainsi que les différentes modifications à apporter.

L'échangeur de chaleur vertical, composant principal du banc d'essai, a une hauteur de 3.35 m et un diamètre de 0.45 m alors que l'entrée et la sortie de l'eau de refroidissement sont situées au bas de l'échangeur. La pression de vapeur peut varier de 200 à 2687 kPa et le débit de vapeur de 0 à 0.63 kg/s. Les capteurs de températures sont des RTD.

Les données complètes pour chaque essai sont fournies en annexe 1, et les différents programmes réalisés avec Matlab qui ont permis d'obtenir les résultats en annexe 2.

3.1 Description du banc d'essai

3.1.1 Présentation du banc d'essai et méthode de calibration

Ainsi qu'il a déjà été présenté dans l'introduction, le banc d'essai se compose principalement d'un débitmètre à calibrer, d'un échangeur de chaleur vertical et d'un réservoir placé sur une balance. L'échangeur de chaleur permet de refroidir et de condenser la vapeur avec de l'eau de refroidissement. La méthode consiste à établir un régime permanent. Pour réaliser ceci, différentes valves contrôlent le système : une valve de réduction de pression située en amont du débitmètre, une valve de contrôle du

débit de condensât à la sortie de l'échangeur de chaleur et une valve à trois voies permettant une re-circulation de l'eau de refroidissement provenant de l'accumulateur. Ces trois valves permettent de régler la pression dans la ligne de vapeur, ainsi que la hauteur de condensât dans l'échangeur de chaleur. En imposant de cette manière différentes combinaisons pression de vapeur / niveau de condensât, on définit un certain débit de vapeur. Ainsi, en faisant plusieurs mesures de débit aux températures et pressions désirées, on est capable d'obtenir une courbe de calibration du débitmètre calibré.

Les mesures se font à l'aide de différents capteurs reliés à un système d'acquisition de données puis enregistrées dans un ordinateur.

Notre banc d'essai comporte également un transmetteur de pression et un capteur de température en amont du débitmètre à calibrer, comme prescrit par le constructeur. Ces mesures permettront de déterminer si la vapeur est surchauffée ou si elle peut être considérée comme étant saturée et ainsi d'avoir le volume spécifique pour obtenir le débit massique basé sur la pression ou sur la température. Les détails quant à ce calcul sont donnés à la section 2.2.

Une tuyère est également installée sur la canalisation de vapeur, pour pouvoir comparer cette mesure de débit avec la mesure obtenue par la masse de condensât. Les pressions en amont et en aval de celle-ci sont mesurées, ainsi que la température en amont. On peut ainsi connaître le saut de pression pour en déduire si le régime critique est atteint ou pas. Avec la pression et la température mesurées en amont, on peut déterminer le débit massique.

Les températures de l'eau de refroidissement à l'entrée et à la sortie de l'échangeur sont également mesurées, permettant ainsi d'avoir la variation de température et par là-même l'évolution du transfert d'énergie. On mesure également la température du condensât.

Toutes ces données sont enregistrées dans un fichier texte que l'on peut ensuite traiter avec différents logiciels.

3.1.2 Procédure d'opération et principe de contrôle

Le banc de mesure utilisé ne comporte pas encore de système de contrôle. Il n'est donc pas possible de fixer une pression et d'attendre que le système lui-même atteigne cette consigne.

Pour palier à ce manque de système de contrôle, on va supposer que :

- la pression de vapeur provenant de la CCUM est constante en amont de la valve de régulation de pression, et que
- le débit d'eau de refroidissement dans l'échangeur de chaleur est constant, et ce car l'eau circule grâce à une pompe à débit constant et qu'il n'y a aucun changement au niveau de l'écoulement une fois la température de consigne atteinte.

Le principe consiste alors à fixer des ouvertures pour chacune des trois valves de contrôle et d'attendre la stabilisation du système. On peut alors commencer les mesures.

3.1.3 Traitement des résultats

Les mesures enregistrées permettent de tracer des courbes temporelles de l'évolution des différentes grandeurs. On peut alors déterminer les plages de valeurs où l'on a obtenu un régime permanent. Les courbes complètes (comprenant tous les paramètres) des tests réalisés sont présentées en ANNEXE 1. On va également calculer et tracer le débit obtenu à partir de la mesure de la masse de condensât. Ce débit est une moyenne sur une période de temps donnée. On choisit cet intervalle de temps de façon à ce que les variations autour de la moyenne ne soient pas trop importantes. La figure suivante

montre un test pour lequel on a tracé le débit sur différents intervalles de temps (1, 3 et 5 minutes).(Figure 4)

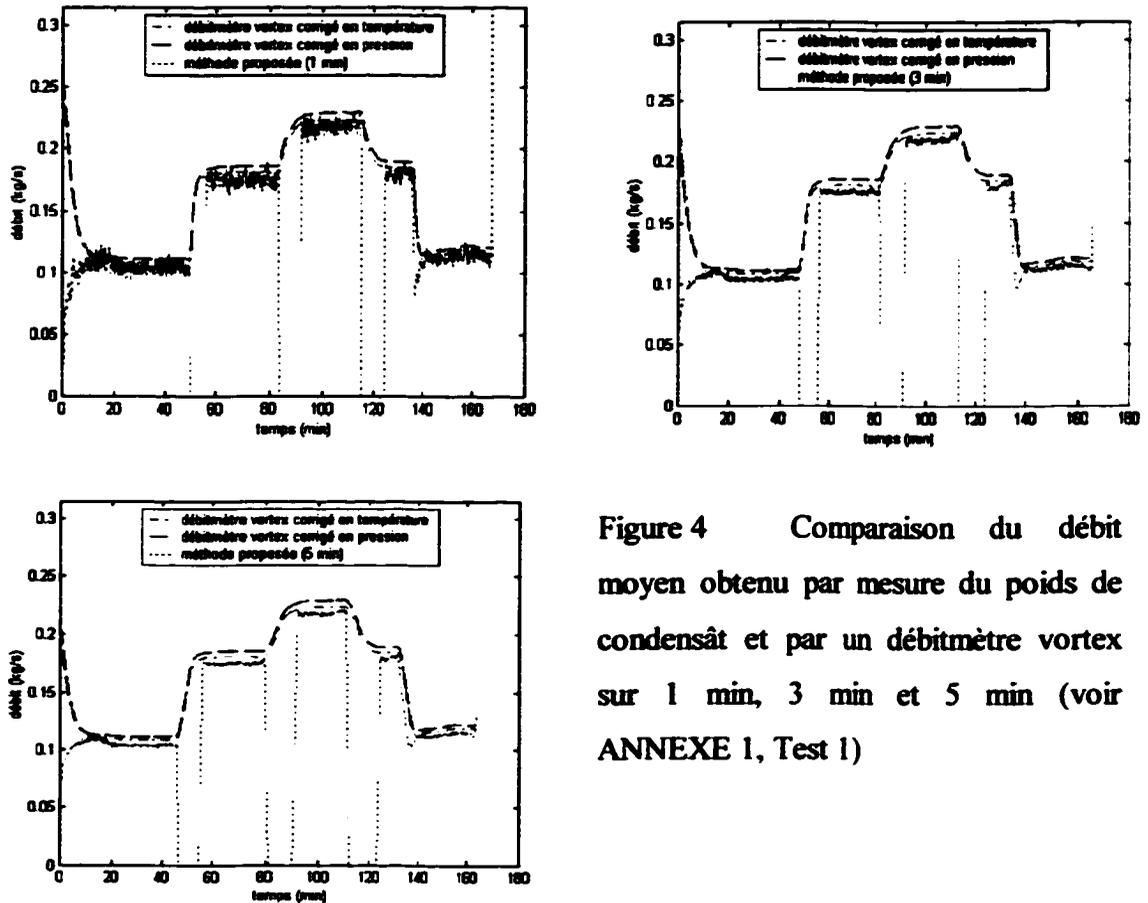


Figure 4 Comparaison du débit moyen obtenu par mesure du poids de condensât et par un débitmètre vortex sur 1 min, 3 min et 5 min (voir ANNEXE 1, Test 1)

Le système d'acquisition de données enregistre les valeurs mesurées toutes les 5 secondes. Puis, lors du calcul du débit, on détermine le débit moyen selon l'intervalle de temps considéré. L'axe des abscisses de la figure précédente correspond donc au nombre de calculs effectués.

Les courbes précédentes représentent le débit massique de vapeur obtenu par mesure de la masse de condensât (« méthode proposée ») et par le débitmètre vortex avec volume

spécifique de la vapeur déterminé par rapport à la pression et par rapport à la température.

Le débit massique calculé d'après la masse de condensât est obtenu en faisant le rapport de la variation de masse sur Δt minutes par le temps Δt minutes. (Δt est le nombre de minutes que l'on choisit pour obtenir le débit moyen, c'est-à-dire 1, 3 ou 5 minutes).

(équation 3.1)

$$\dot{m}_{masse}(t+\Delta t) = \frac{masse(t+\Delta t) - masse(t)}{\Delta t} \quad (3.1)$$

C'est de cette manière que sont obtenues les courbes présentées à la Figure 4. On peut remarquer que pour un calcul du débit sur un intervalle de temps faible (1 min ou 3 min), les points de calcul obtenus ont de grandes variations autour de la moyenne (voir Tableau I Tableau des écart-types moyens pour chaque intervalle de temps). Ceci est dû au fait que le condensât ne s'écoule pas régulièrement dans la balance. En effet, une partie du condensât pesé provient du purgeur qui se trouve en amont de l'échangeur de chaleur et donc se trouve à une pression beaucoup plus élevée. Ceci explique les à-coups créés par le jet d'eau qui font que la masse n'augmente pas régulièrement. Pour cette raison, nous avons choisi de faire les calculs avec un intervalle de temps de 5 minutes.

Tableau I

Tableau des écart-types moyens pour chaque intervalle de temps

Intervalle de temps	Ecart type
1 min	2.5 %
3 min	1 %
5 min	0.67 %

Pour chaque plage stabilisée, on va attendre environ 20 minutes de façon à avoir un temps de mesure suffisamment long. Ainsi on a un nombre de points assez important pour le calcul du débit et de sa valeur moyenne. On remarque en effet que l'écart-type ne varie pas beaucoup avec le temps. Si on calcule cet écart-type sur chacun des quatre quarts d'une plage stabilisée de 5min du Test 1, on obtient les résultats du tableau suivant :

Tableau II

Variation de l'écart-type du débit pour chaque quart d'une période stabilisée de 20 min

Quart n°	1	2	3	4
Ecart type	± 1.65289 %	± 1.11195 %	± 1.26835 %	± 1.31645 %

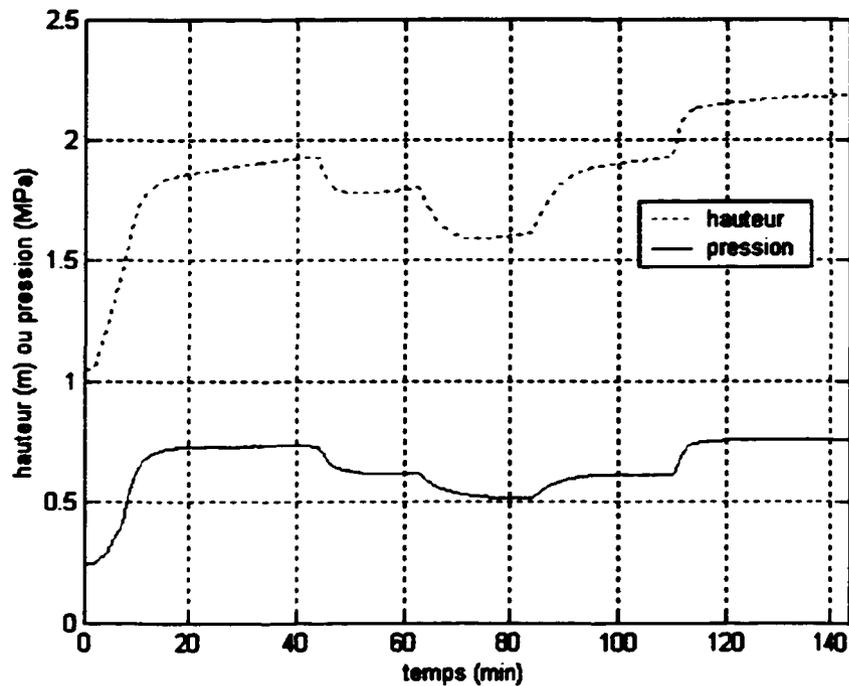
3.2 Comportement du banc d'essai

3.2.1 Première série d'essais

Ces premiers tests nous ont permis d'améliorer notre connaissance du comportement du banc d'essai. Leur but était de connaître les valeurs de stabilisation de la pression, de la hauteur de condensât dans l'échangeur, de la température et de tous les paramètres, pour chaque ouverture de la valve de vapeur (c'est-à-dire de la valve de régulation de la pression de vapeur, placée en amont de l'échangeur, qu'on nommera par la suite « valve 125 » car elle est située sur l'alimentation de vapeur à 963.2 kPa, soit 125 psig) et de la valve de condensât. Également, on cherche les limites : quelles sont les ouvertures minimales et maximales des valves de vapeur et de condensât pour que le système fonctionne correctement.

A chaque fois, la procédure consiste à régler une ouverture de valve de vapeur et une ouverture de valve de condensât et attendre la stabilisation.

Trois tests ont été réalisés dans ce but. Ceux-ci nous ont permis d'observer un point important relatif au comportement du banc d'essai : le niveau de condensât dans l'échangeur de chaleur ne se stabilise pas parfaitement, alors que tous les autres paramètres ont atteint une valeur constante. En effet, ce phénomène est remarquable sur la Figure 5 qui suit : Soit la hauteur augmente continuellement, soit elle diminue jusqu'à une certaine valeur pour ré-augmenter par la suite.



**Figure 5 Augmentation de la hauteur de condensât après stabilisation
(voir ANNEXE 1, Test 3)**

Cette augmentation est d'environ 2.5 cm/10 min. La question que l'on se pose est de savoir pourquoi le niveau de condensât ne se stabilise pas, et quelle est l'influence de cette non-stabilisation sur la mesure de débit. Nous allons étudier différentes sources possibles, à savoir :

- type de sortie du condensât dans l'échangeur
- variation de la pression de vapeur
- fonctionnement du purgeur en aval de l'échangeur
- correction tenant compte de l'accumulation de condensât dans l'échangeur

3.2.2 Augmentation de la hauteur de condensât

3.2.2.1 Sortie de condensât à l'air libre

On s'interroge sur l'effet que peut avoir la sortie de condensât dans le réservoir. En effet, celle-ci se fait par un diffuseur qui laisse l'eau sortir dans la quantité de condensât déjà accumulée dans le réservoir. Il y a donc peut-être un effet de contre pression variant avec la masse accumulée qui ferait augmenter le niveau de condensât dans l'échangeur.

Pour cette raison, dans les tests suivants on a supprimé cette sortie « diffuseur » de manière à ce que le condensât s'échappe toujours au-dessus du niveau d'eau déjà accumulé dans le réservoir. (Figure 6)

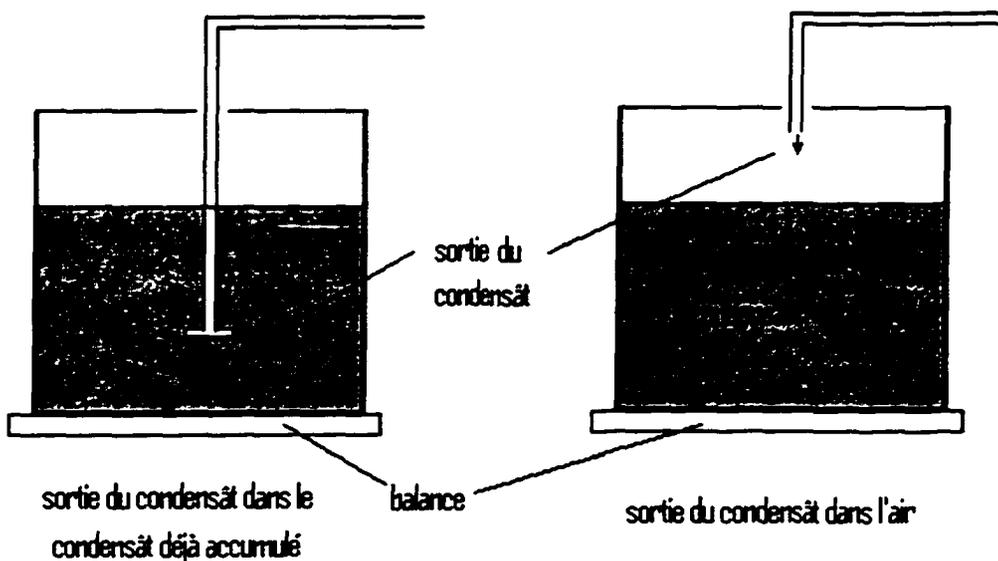


Figure 6 Différentes sorties du condensât

Nous avons donc réalisé des nouveaux essais après avoir modifié la sortie de condensât tel qu'indiqué précédemment. Apparemment, on constate le même phénomène d'augmentation du niveau de condensât (Figure 7) alors que cet essai a été réalisé dans

les mêmes conditions que celui présenté à la Figure 5, c'est-à-dire avec les mêmes ouvertures de valves.

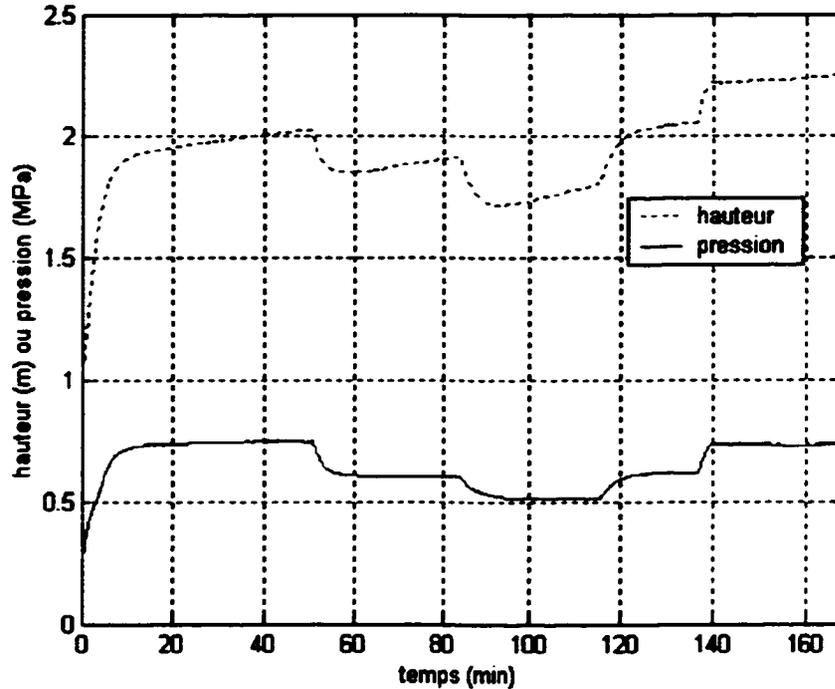


Figure 7 Pression et variation de la hauteur avec sortie de condensât à l'air libre
(voir ANNEXE 1, Test 1)

3.2.2.2 Augmentation de hauteur de condensât et baisse de pression

Toujours dans le but d'essayer de trouver une solution au problème de non-stabilisation du niveau de condensât dans l'échangeur, on s'est demandé si cette augmentation de niveau de condensât dans l'échangeur ne correspondait pas à une baisse de la pression dans la ligne de vapeur. En effet, une fois le régime permanent atteint, tous les paramètres sont stabilisés. Il est donc logique de supposer que la pression totale dans le réseau en amont de la valve de sortie de condensât est constante. Ceci supposerait que, lorsque la hauteur augmente dans l'échangeur, la pression diminue dans la canalisation

de vapeur. Ainsi, la variation de pression correspondant à une augmentation du niveau de condensât de 2.54 cm (=1 pouce) a été calculée en supposant que :

« pression de vapeur + pression équivalente hauteur condensât = constant »

Par l'équation $p = \rho * g * h$, il a été calculé qu'une variation de 2.54 cm d'eau à la température moyenne du condensât équivaut à une variation de 245.0397 Pa (=0.03554 psi). Donc si la hauteur augmente, la pression de vapeur doit diminuer en conséquence. Par rapport à un point de départ que l'on choisit au moment où la hauteur semble se stabiliser, on calcule l'augmentation de hauteur d'eau, la variation de pression correspondante mesurée ainsi que la variation de pression équivalente que l'on devrait obtenir selon les hypothèses précédentes ($\Delta h = 2.54$ cm d'eau équivaut à $\Delta p = -245.0397$ Pa).

On remarque alors, qu'effectivement, la pression diminue mais pas toujours de la manière qu'on s'attendait à observer. L'idée d'avoir une diminution de pression lorsque la hauteur augmente pourrait se vérifier. On pourra alors dire que le régime permanent est atteint lorsque la pression est constante. (voir Figure 8)

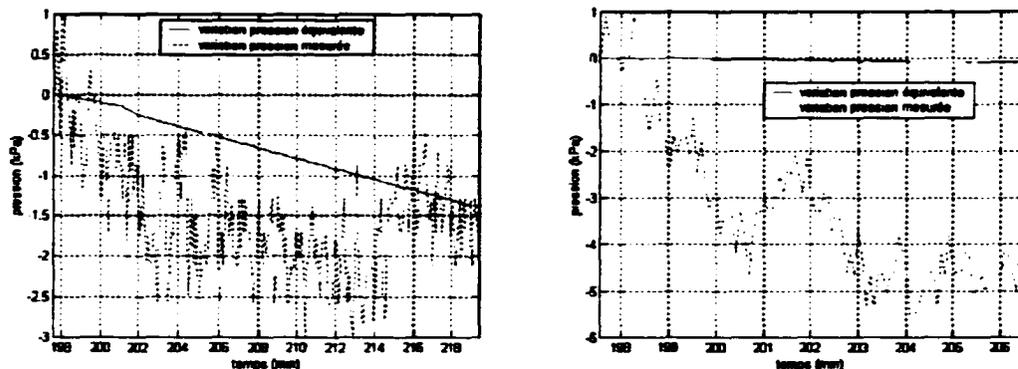


Figure 8 Variation de la pression équivalente à l'accumulation de condensât dans l'échangeur, pour deux plages de valeurs (voir ANNEXE 1, Test 3)

Ici, les variations des valeurs lues de la pression sont très faibles ($<5 \text{ kPa} = 0.73 \text{ psi}$), on est sous la limite de précision du transmetteur de pression (qui est de 0.7 psi , soit environ 4.8 kPa), ce qui expliquerait qu'on n'ait pas les mêmes valeurs qu'en théorie. Il est donc difficile de conclure que la pression globale (pression de vapeur + niveau de condensât) est constante, car la variation de pression n'est pas mesurée suffisamment précisément.

3.2.2.3 Contournement du purgeur

Pour des fins de sécurité, c'est-à-dire afin de s'assurer qu'uniquement du condensât sort de l'échangeur et est pesé, un purgeur a été installé à la sortie de l'échangeur de chaleur. En réalité, on n'en a pas réellement besoin compte tenu qu'un certain niveau de condensât s'accumule dans l'échangeur de chaleur. Il n'y a donc pas de raison que de la vapeur passe à cet endroit. On réalise donc un essai en contournant ce purgeur de vapeur avec un système de by-pass de façon à vérifier que celui-ci n'a pas une influence négative sur la variation de hauteur. Les résultats nous montrent que le comportement du banc d'essai n'est pas particulièrement modifié (Figure 9). En effet, le débit semble toujours se stabiliser, alors que la hauteur continue d'augmenter au cours de chacune des plages de régime permanent.

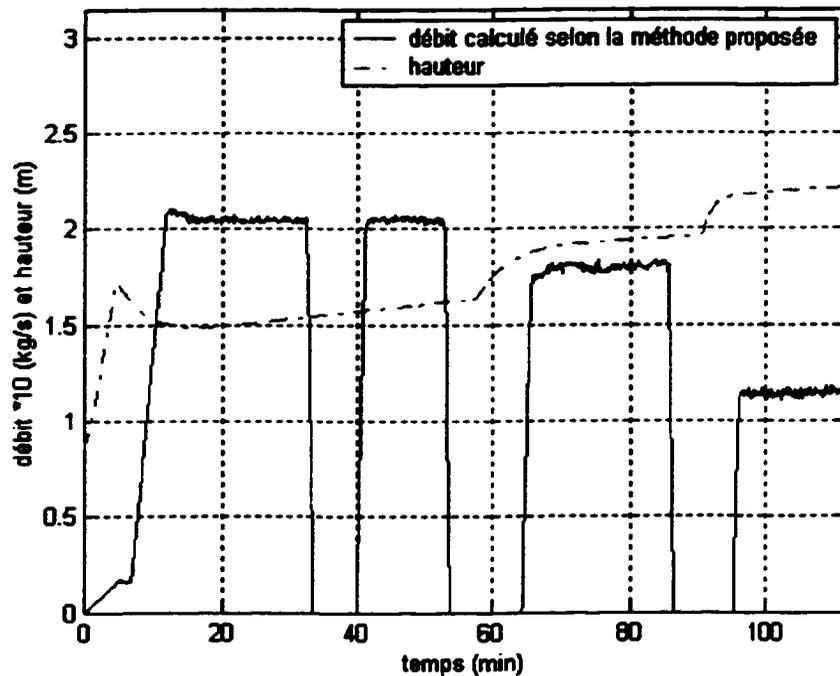


Figure 9 Débit obtenu d'après la mesure de la masse de condensât et augmentation de la hauteur de condensât (voir ANNEXE 1, Test 4)

3.2.2.4 Sommaire sur l'augmentation de hauteur du condensât

Etant donnés les résultats précédents, on décide de calculer le débit d'après la mesure de la masse de condensât, en tenant compte de l'accumulation de celui-ci dans l'échangeur. En effet, comme on a remarqué que le niveau de condensât augmentait constamment, on a décidé d'ajouter cette accumulation à la masse de condensât, comme si cette eau ne restait pas dans l'échangeur mais s'écoulait. Ainsi, la variation de masse pendant une période donnée n'est plus uniquement la variation de masse dans le réservoir, mais cette variation à laquelle on ajoute la masse correspondant à l'accumulation. Les caractéristiques dimensionnelles de l'échangeur sont connues.(Figure 10)

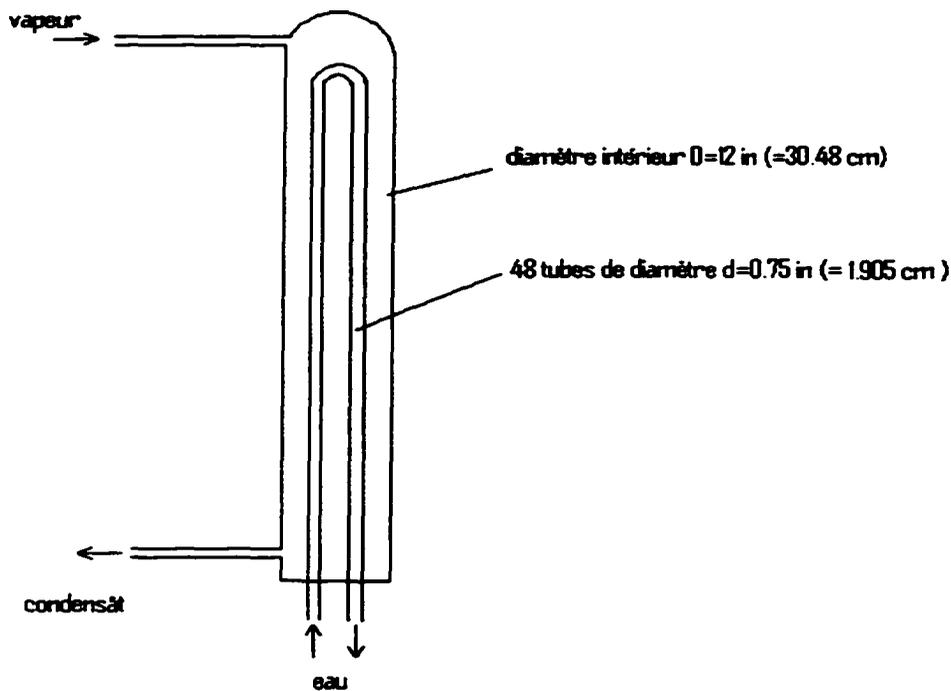


Figure 10 Schéma de l'échangeur de chaleur

D'autre part, lors d'un essai (Test 6), nous avons voulu comparer la masse correspondant à une variation de 1 cm du niveau de condensât dans l'échangeur obtenue expérimentalement avec celle obtenue théoriquement d'après les dimensions de l'échangeur. Pour cela, nous avons augmenté le niveau dans l'échangeur jusqu'à son maximum, puis coupé l'arrivée de vapeur et mesuré la masse qui s'échappait de l'échangeur. En prenant une période pendant laquelle le débit de vapeur est nul et la variation de masse en fonction de la hauteur dans l'échangeur linéaire (voir Figure 11), nous avons pu obtenir les résultats suivants :

Tableau III

Masse correspondant à la variation de hauteur dans l'échangeur

	théorique	expérimentale
Masse pour 1 cm dans l'échangeur	0.58544 kg	0.55672 kg

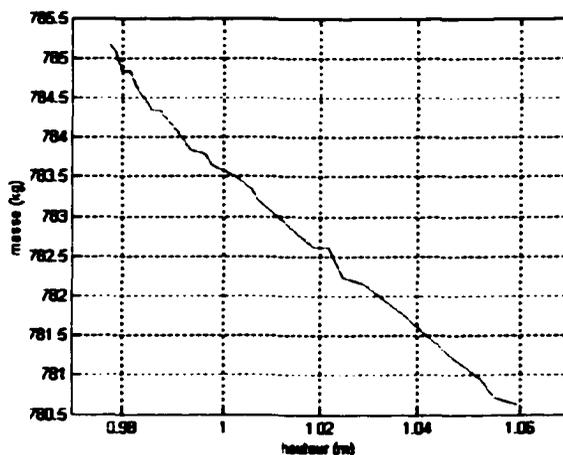


Figure 11 Variation de la masse de condensât en fonction de la variation de hauteur de condensât dans l'échangeur de chaleur (ANNEXE 1, Test 6)

La Figure 12 montre le débit obtenu par la mesure de la masse de condensât, le débit corrigé tel qu'expliqué précédemment ainsi que le débit obtenu par le débitmètre à vortex (actuellement installé sur le banc d'essai). La différence entre les deux est relativement faible avec un écart relatif de l'ordre de 2%. Cette figure montre un seul test, on obtiendrait des résultats similaires avec les données des autres essais.

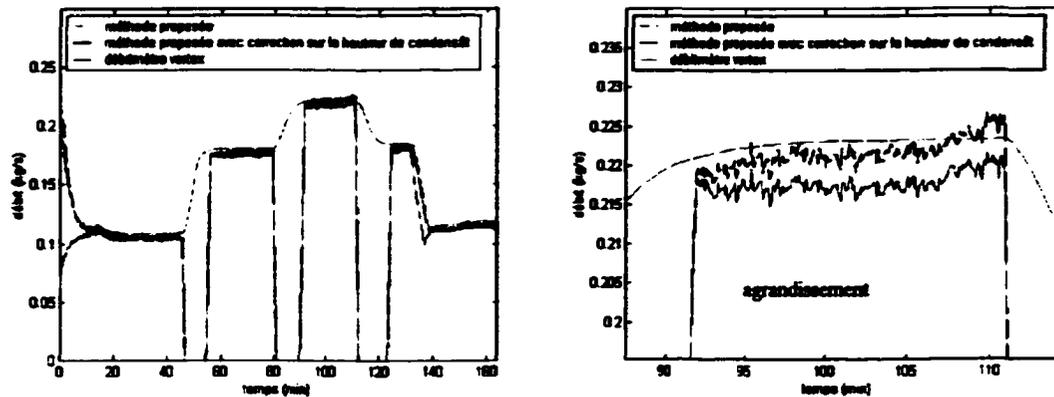


Figure 12 Correction du débit en tenant compte de l'accumulation de condensât dans l'échangeur (voir ANNEXE 1, Test 1)

3.2.3 Calcul de la qualité de la vapeur

Les pertes de chaleur dans la ligne de vapeur ont été calculées. Le banc d'essai comporte une colonne verticale à la sortie de la station de réduction de pression. Cette colonne est considérée comme un séparateur, ce qui fait que la vapeur en haut de celle-ci peut-être supposée comme étant à saturation ($x=1$) ou surchauffée. Partant de là et connaissant les caractéristiques dimensionnelles de l'installation ainsi que la température de la vapeur, on peut déterminer le titre en vapeur au niveau de la section du débitmètre testé. On obtient un titre supérieur à 99 %. La vapeur peut donc être considérée comme saturée.

3.2.4 Débit d'eau de refroidissement

Dans le but de vérifier l'hypothèse posée (établissement du régime permanent), on calcule le débit d'eau de refroidissement dans l'échangeur. D'après la conservation de l'énergie, on peut considérer que dans l'échangeur de chaleur, toute la quantité d'énergie fournie par la vapeur est égale à toute la quantité d'énergie absorbée par l'eau de refroidissement. Celles-ci sont calculées par :

$$\dot{Q}_{vap} = \dot{m}_{vap} * (h_{vap} - h_{cond}) \quad (3.2)$$

et :

$$\dot{Q}_{con} = \dot{m}_{con} * C_p * \Delta T \quad (3.3)$$

En mettant $\dot{Q}_{vap} = \dot{Q}_{con}$, on peut déterminer le débit d'eau de refroidissement. Celui-ci est constant, ce qui est tout à fait normal et prouve que l'on est bien en régime permanent. (voir Figure 13) En effet, après chaque modification des ouvertures de valves, le débit se stabilise toujours au niveau de la même valeur. A noter que les pics sur la figure sont probablement dus à l'inertie thermique : si le débit de vapeur change, il faut que la température de l'eau de refroidissement s'adapte pour garder un débit d'eau constant, ce qui n'est pas immédiat.

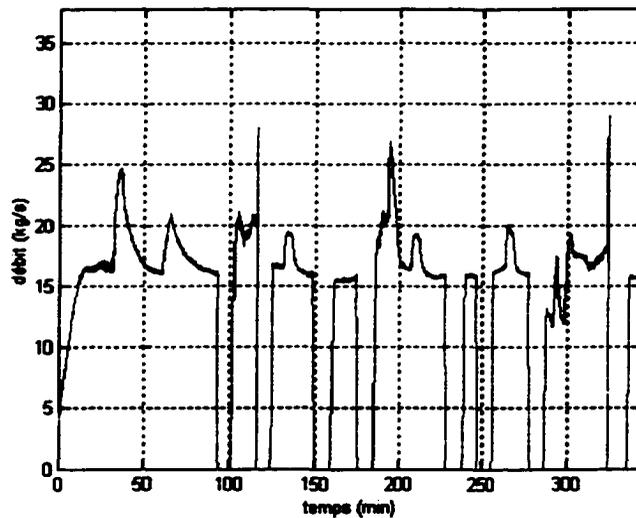


Figure 13 Débit de l'eau de refroidissement dans l'échangeur de chaleur

(voir ANNEXE 1, Test 2)

Le calcul a été réalisé pour tous les essais mais n'est présenté que pour un seul. Les résultats obtenus amènent toujours à la même conclusion.

3.2.5 Sommaire du comportement du banc d'essai

Il a été montré que le niveau de condensât dans l'échangeur de chaleur ne se stabilisait pas. Aucune raison significative n'a pu prouver ce comportement. Pourtant, à chaque fois, les autres paramètres sont stabilisés. Le régime permanent est atteint, ceci est remarquable notamment au débit d'eau de refroidissement qui est constant. D'autre part, le titre en vapeur a été calculé au niveau de la section de mesure du débitmètre à calibrer, et la vapeur peut être considérée comme de la vapeur saturée. En ce qui concerne la variation de hauteur, sachant que cette augmentation de niveau représente une quantité de condensât que l'on ne pèse pas, on va par la suite toujours corriger le débit obtenu par la mesure de la masse de condensât avec cette variation de niveau dans l'échangeur.

3.3 Méthode de calibration proposée

La méthode de calibration se résume donc à :

- régler les ouvertures de vannes
- attendre l'établissement du régime permanent
- peser le condensât
- calculer le débit obtenu d'après le fichier de données enregistrées
- corriger le débit calculé précédemment en tenant compte des variations du niveau de condensât dans l'échangeur de chaleur
- utiliser la mesure de débit ainsi obtenue pour la calibration du débitmètre à calibrer

CHAPITRE 4

ÉTUDE DE LA PRÉCISION

La précision pour un système de mesure constitue une part importante de ses performances. Toute valeur expérimentale comporte sa part d'incertitude et celle-ci doit toujours accompagner le résultat. La norme « Test Uncertainty, Instruments and Apparatus » de l'ASME [16] ainsi que celles de l'ISO « Measurement of fluid flow- Evaluation of uncertainties » [17] et « Assessment of uncertainty in the calibration and use of flow measurement devices » [18] vont nous permettre de mener l'étude de la précision de notre banc d'essai.

4.1 Généralités

Les sources d'erreur dans un procédé de mesure peuvent être divisées en deux types : les erreurs systématiques (ou biais) et les erreurs aléatoires. L'erreur systématique est définie comme étant l'écart entre la valeur vraie de la mesure et la moyenne des valeurs mesurées, alors que l'erreur aléatoire est l'écart par rapport à la moyenne (voir Figure 14). Une erreur systématique peut être estimée et corrigée, une erreur aléatoire doit être évaluée et un encadrement de celle-ci donné.

Afin de déterminer la précision de notre système de mesure, il faut commencer par identifier et analyser les différentes sources d'erreur possibles. Celles-ci peuvent provenir par exemple d'une fuite de vapeur qui entraînerait un débit mesuré inférieur au débit réel, de la précision de la balance, ou encore de la re-vaporisation du condensât.

Une fois les différentes sources d'erreur analysées, on sera en mesure de connaître la précision globale du banc d'essai.

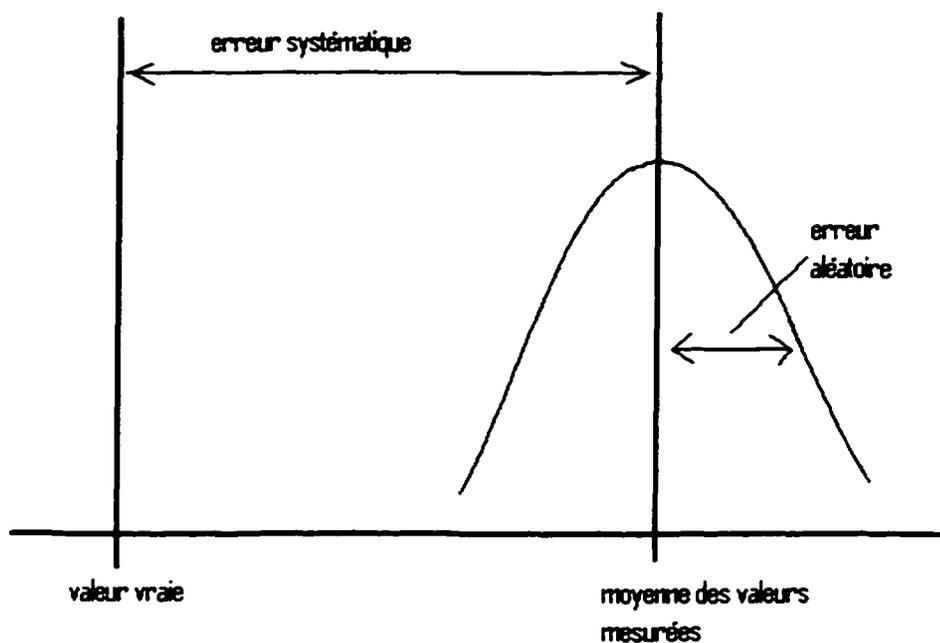


Figure 14 Erreur aléatoire et erreur systématique

4.2 Analyse des sources d'erreur

4.2.1 Niveau de condensât dans l'échangeur de chaleur

On a constaté que la hauteur de condensât dans l'échangeur de chaleur ne restait pas constante et ne se stabilisait pas réellement. On a donc pensé que cette quantité d'eau pourrait s'écouler dans le réservoir pour être pesée plutôt que de rester dans l'échangeur. Pour cela, connaissant les dimensions de l'échangeur de chaleur, on a calculé la variation de débit sur 5 minutes que cela engendrerait. (voir 3.2.2.4) Sur les essais réalisés, la variation de débit occasionnée par cette correction est d'environ 2.5 % (voir Figure 15). Avec cette correction, le débit obtenu par la méthode de mesure de la masse de condensât et celui obtenu avec le débitmètre vortex sont légèrement plus proches l'un de l'autre. (voir Figure 16)

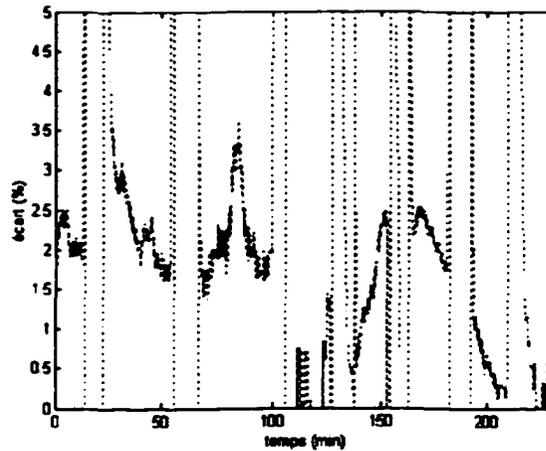


Figure 15 Ecart relatif entre le débit calculé avec la mesure du poids de condensât, avec et sans la correction sur la hauteur (voir ANNEXE 1, Test 5)

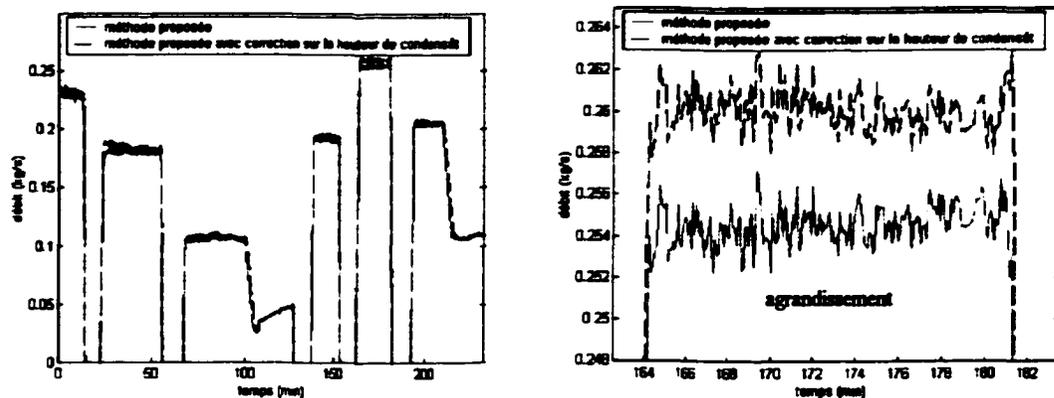


Figure 16 Comparaison entre le débit obtenu par la masse de condensât avec et sans correction du niveau de condensât (voir ANNEXE 1, Test 5)

Ceci est une erreur systématique, mais elle peut être corrigée. Nous avons vu dans le paragraphe 3.2 que cette correction allait être appliquée tout le temps.

Cependant, il y a une certaine erreur sur cette correction due à l'imprécision de la détermination de la hauteur de condensât dans l'échangeur de chaleur et par la suite de la masse correspondante. En effet, le débit total est donné comme étant la somme du débit obtenu directement par la variation de masse de condensât et de la correction due à l'accumulation de condensât dans l'échangeur de chaleur :

$$\dot{m}_{total} = \dot{m}_{masse} + \dot{m}_{acc} \quad (4.1)$$

La précision totale sera donc obtenue par :

$$\Delta \dot{m}_{total} = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{m}_{total}}{\partial \dot{m}_{masse}} \Delta \dot{m}_{masse} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}_{total}}{\partial \dot{m}_{acc}} \Delta \dot{m}_{acc} \right)^2} = \sqrt{\Delta \dot{m}_{masse}^2 + \Delta \dot{m}_{acc}^2} \quad (4.2)$$

Nous devons donc déterminer les erreurs sur chacune de ces quantités. La précision de la correction sur l'accumulation de condensât dans l'échangeur va dépendre de la sonde de température (qui influence la masse volumique) et du capteur différentiel de pression (qui permet de mesurer le niveau dans l'échangeur).

4.2.2 Erreur sur la correction due à l'accumulation

La correction due à l'accumulation peut s'exprimer par :

$$\dot{m}_{acc} = \rho A \frac{dh}{dt} \quad (4.3)$$

où dh/dt est la variation du niveau de condensât en fonction du temps.

L'erreur relative s'exprime alors par :

$$\frac{\dot{\Delta m}_{acc}}{\dot{m}_{acc}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\Delta dh}{dh} \frac{dt}{dt}\right)^2} \quad (4.4)$$

L'erreur relative sur la section est supposée négligeable ($\Delta A/A \approx 0$) (cf. 3.2.2.4.)

L'erreur relative sur la masse volumique dépend de la précision de la sonde de température employée pour mesurer la température du condensât, puisque la masse volumique est choisie comme étant la masse volumique du liquide saturé à la température mesurée. La précision de la sonde est de 0.1 % de la valeur réelle.

L'erreur relative sur la variation de niveau dépend du transmetteur de pression différentiel qui permet de connaître la hauteur. La précision de celui-ci est de 0.08 % de l'échelle totale. Connaissant la différentielle de pression, la variation de hauteur est donnée par :

$$dh = \frac{dp}{\rho^* g} \quad (4.5)$$

où dp est la différentielle de pression mesurée.

En considérant ici qu'il n'y a pas d'erreur réalisée sur la valeur de la masse volumique ni sur celle de l'accélération de la pesanteur, la précision de la hauteur est directement celle de la pression.

4.2.3 Précision de la balance

La balance a été étalonnée à l'extérieur de l'école par une compagnie privée. Le rapport d'étalonnage fourni en annexe indique une précision de $\pm 0.1\%$ de la lecture.

4.2.4 Re-vaporisation

Un purgeur est présent à l'entrée de l'échangeur de chaleur afin d'évacuer toute quantité de condensât présent dans la tuyauterie à ce niveau. La quantité de condensât récupérée à ce niveau est ensuite ré-injectée dans le condensât à la sortie de l'échangeur de chaleur. La différence de pression produit donc une re-vaporisation à ce niveau. Cependant, le fait de mélanger cette quantité au condensât dont la température est plus faible ($\approx 50\text{ °C}$) à la sortie de l'échangeur permet d'éviter la re-vaporisation. Celle-ci est donc négligeable, et la quantité de condensât ainsi récupérée est pesée avec l'ensemble du condensât.

4.2.5 Vaporisation

Le condensât qui se trouve dans le réservoir sur la balance est chaud et il va donc y avoir une vaporisation de cette eau chaude. La vapeur qui se crée constitue une perte de masse car elle n'est pas pesée avec le reste de condensât. Cependant, il est vrai que le réservoir utilisé comporte un couvercle et que l'ouverture est relativement petite, donc la quantité de vapeur qui s'échappe sera assez faible.

On peut évaluer la quantité d'eau qui s'évapore en supposant que le réservoir se comporte comme un bassin à l'air libre. La formule suivante donne la quantité d'évaporation :

$$W = \sigma * S * (x'' - x) \quad (4.6)$$

Cette formule provient du livre de génie climatique Le Recknagel [19].

Supposons la température de surface de l'eau à 50 °C , l'air à ce niveau est saturé en eau, donc en utilisant les données psychométriques de l'air humide, on obtient :

$$x'' = 0.086 \text{ kg d'eau/kg d'air sec}$$

Puis, supposons que la température de l'air dans le réservoir est de 30°C et que l'humidité relative est de 60%, on obtient :

$$x = 0.016 \text{ kg d'eau/kg d'air sec}$$

En considérant que l'eau est calme, le coefficient d'évaporation est $\sigma = 10 \text{ kg/m}^2\text{h}$, et la surface d'eau est de 0.84 m^2 , soit 9 ft^2 . Cette valeur de σ est une valeur approximative fournie par le livre de génie climatique citée précédemment.

On obtient alors une vaporisation moyenne :

$$W = 0.588 \text{ kg/h} = 1.6 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s}$$

Pour un débit de vapeur de 0.126 kg/s ($=1000 \text{ lbm/h}$), cette évaporation représente 0.12% de perte de la masse.

Pour une plus grande précision, on peut se référer à la théorie de transfert de masse [20]. Le coefficient d'évaporation est alors calculé en déterminant le nombre de Sherwood (cf. programme en annexe). Avec ce calcul, on obtient des résultats du même ordre de grandeur, à savoir une évaporation de $2.7 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s}$.

Il est important de noter que cette évaporation a été calculée dans un cas où le réservoir ne serait pas fermé. En effet, ici, l'humidité relative de l'air au-dessus du bassin est plus élevée, ce qui entraînerait une évaporation beaucoup moins importante.

4.2.6 Erreur aléatoire

La dispersion des valeurs par rapport à la moyenne sur période stabilisée est une erreur aléatoire. Elle peut être estimée par une méthode statistique.

Tout d'abord, certains points n'ont aucun sens et faussent complètement le calcul. Ils doivent être éliminés. Pour cela, on applique le critère de Chauvenet : Si on prend n

points de mesure, si la probabilité d'un point de mesure est inférieur à $1/(2n)$, ce point est suspect et devrait être enlevé.[21]

Puis, on calcule le niveau de confiance de nos mesures. Pour cela, à 95% de confiance, on a :

$$\mu = \bar{x} \pm 1.96 \sigma_x \quad (4.7)$$

En utilisant le Test 1 et le Test 2 (Figure 17), on obtient sur les plages de valeurs sélectionnées, les erreurs suivantes :

Tableau IV

Erreurs aléatoires pour chaque mesure

mesure	débit moyen (kg/s)	erreur (kg/s)	erreur (%)
1	0,104	± 1,37E-03	± 1,322
2	0,175	± 1,93E-03	± 1,103
3	0,218	± 2,29E-03	± 1,051
4	0,180	± 2,23E-03	± 1,240
5	0,113	± 2,66E-03	± 2,347
6	0,034	± 8,02E-04	± 2,386
7	0,122	± 1,19E-03	± 0,978
8	0,208	± 2,04E-03	± 0,981
9	0,264	± 1,86E-03	± 0,704
10	0,030	± 9,11E-04	± 3,028
11	0,124	± 1,56E-03	± 1,259
12	0,212	± 2,32E-03	± 1,092
13	0,211	± 1,52E-03	± 0,718
14	0,104	± 9,34E-04	± 0,900
15	0,213	± 1,21E-03	± 0,568

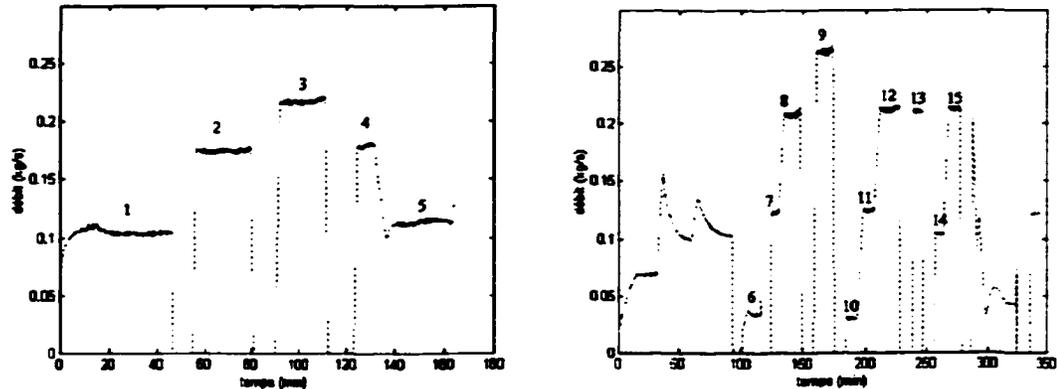


Figure 17 Sélection des plages pour le calcul de l'erreur aléatoire
(Test 1 et Test 2)

On a calculé la précision pour une mesure effectuée sur chaque plage stabilisée sélectionnée sur les graphiques. L'erreur calculée varie entre $\pm 0.568\%$ et $\pm 3.028\%$ selon la plage de valeurs considérée. On remarque que l'erreur maximale est obtenue pour des débits très faibles (moins de 0.05 kg/s).

Afin d'améliorer la précision de notre mesure, on ne va pas considérer simplement une mesure de débit, mais plusieurs, de façon à avoir un échantillon de valeurs de débit. Ainsi l'erreur aléatoire va être diminuée. On va donc choisir une durée de mesure pour le calcul de cette erreur. Choisissons par exemple 5 minutes. Compte tenu de la manière dont le débit est calculé (intervalle de 5 minutes et enregistrement des données toutes les 5 secondes), on va avoir un échantillon de 60 points de mesures.

En statistique, on sait que la valeur moyenne d'un échantillonnage d'une population se rapproche de la vraie moyenne si le nombre d'échantillons augmente [21]. La formule employée est la même (cf. équation 4.7), sauf que l'écart-type est donné par :

$$\sigma_x = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (4.8)$$

On voit donc que plus le nombre d'échantillon augmente, plus l'erreur aléatoire sur la moyenne diminue.

On va pouvoir calculer la précision pour les différentes plages de valeurs de débit, pour une moyenne calculée sur 5 minutes, soit avec 60 mesures. Les résultats sont résumés dans le Tableau V.

Tableau V

Erreur aléatoire sur la moyenne

mesure	erreur (%)
1	0,168
2	0,102
3	0,097
4	0,164
5	0,130
6	0,310
7	0,128
8	0,090
9	0,076
10	0,488
11	0,145
12	0,087
13	0,098
14	0,106
15	0,077

C'est cette erreur aléatoire qui va être considérée dans le calcul de l'erreur totale de notre banc d'essai et de notre méthode. En effet, la procédure choisie ici consiste à maintenir le régime permanent quelques temps, il n'y a donc pas de problème à avoir un échantillon de 60 points de mesures. On va donc obtenir la précision envisageable dans ce cas de figure.

4.2.7 Fuites

Les fuites font parties des erreurs très difficilement estimables.

Un évent est situé juste à l'entrée de l'échangeur de chaleur. Il pourrait donc y avoir des fuites de vapeur à ce niveau. Cependant, la sortie de l'évent est directement envoyée dans le réservoir de condensât, et ce sous le niveau de condensât déjà accumulé, ce qui fait que si une quantité de vapeur passe par là, elle sera mélangée au condensât et pesée avec l'ensemble.

Il pourrait également y avoir des fuites de vapeur dans les canalisations. Une inspection visuelle ne semble pas en révéler, donc s'il y en a quand même, elles sont négligeables.

4.3 Synthèse

Pour résumer, le tableau suivant présente les erreurs déterminées :

Tableau VI

Résumé des différentes erreurs

Erreurs	Valeur	Type
Niveau de condensât	2.5 %	Systematique (corrigée)
Précision de la balance	0.1 %	Aléatoire
Re-vaporisation	négligeable	Systematique
Vaporisation	$1.6 \cdot 10^{-4}$ kg/s	Systematique
Erreur aléatoire	Voir Tableau V	Aléatoire
Fuites	Pesées avec le condensât	Systematique

L'erreur sur la mesure même du débit (« erreur débit ») est donnée par la somme quadratique des différentes erreurs :

$$\Delta \dot{m}_{masse} = \sqrt{\Delta balance^2 + \Delta vaporisation^2 + \Delta aléatoire^2} \quad (4.9)$$

Une fois l'erreur sur le débit mesuré déterminé pour chaque plage, on l'associe à l'erreur sur la correction sur l'accumulation sur chaque plage pour obtenir l'erreur totale de notre mesure de débit. Les résultats sont donnés pour chacune des plages (Figure 17) dans le tableau suivant :

Tableau VII

Résultats des erreurs sur chacune des plages choisies

mesure	débit massique	erreur totale	erreur débit	erreur correction
1	0,104 kg/s	± 0,263 %	± 0,263 %	± 2,13E-03 %
2	0,175 kg/s	± 0,194 %	± 0,194 %	± 1,53E-03 %
3	0,218 kg/s	± 0,183 %	± 0,183 %	± 1,80E-03 %
4	0,180 kg/s	± 0,231 %	± 0,231 %	± 1,33E-03 %
5	0,113 kg/s	± 0,236 %	± 0,236 %	± 1,04E-03 %
6	0,034 kg/s	± 0,554 %	± 0,554 %	± 5,26E-03 %
7	0,122 kg/s	± 0,228 %	± 0,228 %	± 1,41E-03 %
8	0,208 kg/s	± 0,186 %	± 0,186 %	± 7,33E-04 %
9	0,264 kg/s	± 0,167 %	± 0,167 %	± 2,44E-03 %
10	0,030 kg/s	± 0,710 %	± 0,710 %	± 3,47E-03 %
11	0,124 kg/s	± 0,240 %	± 0,240 %	± 1,81E-04 %
12	0,212 kg/s	± 0,180 %	± 0,180 %	± 1,42E-03 %
13	0,211 kg/s	± 0,187 %	± 0,187 %	± 5,91E-04 %
14	0,104 kg/s	± 0,232 %	± 0,232 %	± 8,55E-04 %
15	0,213 kg/s	± 0,180 %	± 0,180 %	± 1,44E-03 %

On obtient donc une erreur totale variant de 0.167 % à 0.710 %, avec une valeur moyenne de 0.264 %. L'erreur sur la correction est très faible et n'a pas d'effet remarquable sur l'erreur totale.

Puis, lors de la calibration, ce qu'on mesure ici avec notre débitmètre vortex est un débit volumique que l'on corrige par la suite sur la température ou la pression. On va donc également cumuler, lors de la calibration, la précision de notre banc d'essai et méthode, à celle du transmetteur de pression ou de la sonde de température. On obtient alors une erreur qui varie de 0.195 % à 0.717 % avec une moyenne de 0.286 % si la correction est faite sur la température et une erreur qui varie de 0.170 % à 0.710 % avec une moyenne de 0.266 % si la correction est faite sur la pression (Tableau VIII).

Tableau VIII

Erreurs sur le débit volumique, corrigé sur la pression ou sur la température

mesure	Correction sur la température	Correction sur la pression
1	2,49E-02 m ³ /s ± 0,281 %	2,43E-02 m ³ /s ± 0,264 %
2	4,94E-02 m ³ /s ± 0,218 %	4,81E-02 m ³ /s ± 0,196 %
3	7,00E-02 m ³ /s ± 0,209 %	6,81E-02 m ³ /s ± 0,187 %
4	4,99E-02 m ³ /s ± 0,252 %	4,86E-02 m ³ /s ± 0,233 %
5	2,73E-02 m ³ /s ± 0,256 %	2,66E-02 m ³ /s ± 0,237 %
6	7,74E-03 m ³ /s ± 0,563 %	7,54E-03 m ³ /s ± 0,555 %
7	2,83E-02 m ³ /s ± 0,249 %	2,76E-02 m ³ /s ± 0,229 %
8	4,94E-02 m ³ /s ± 0,211 %	4,83E-02 m ³ /s ± 0,187 %
9	6,70E-02 m ³ /s ± 0,195 %	6,54E-02 m ³ /s ± 0,170 %
10	6,71E-03 m ³ /s ± 0,717 %	6,55E-03 m ³ /s ± 0,710 %
11	2,80E-02 m ³ /s ± 0,260 %	2,73E-02 m ³ /s ± 0,241 %
12	5,10E-02 m ³ /s ± 0,206 %	4,98E-02 m ³ /s ± 0,182 %
13	5,03E-02 m ³ /s ± 0,212 %	4,91E-02 m ³ /s ± 0,188 %
14	2,37E-02 m ³ /s ± 0,253 %	2,30E-02 m ³ /s ± 0,234 %
15	4,96E-02 m ³ /s ± 0,206 %	4,84E-02 m ³ /s ± 0,182 %

CHAPITRE 5

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Un débitmètre à vortex est installé sur la ligne de vapeur. Ce débitmètre a déjà été calibré par une méthode traditionnelle et il va nous permettre de comparer la mesure du débit obtenu avec notre méthode à la lecture du débitmètre. Nous allons donc pouvoir le tester. Les résultats de deux débitmètres différents sont présentés ici : un débitmètre de diamètre 3.81 cm (1.5 in) et un autre de diamètre 5.08 cm (2 in).

D'autre part, une tuyère a également été installée de manière à pouvoir valider les résultats obtenus. La présence de cette tuyère n'est pas nécessaire pour la méthode de calibration, elle sert uniquement à la comparaison.

5.1 Tests avec le débitmètre vortex de 1.5 in

Différents essais ont été réalisés avec le débitmètre vortex à tester afin de comparer la valeur du débit obtenue avec cet appareil avec celle obtenue par notre méthode.

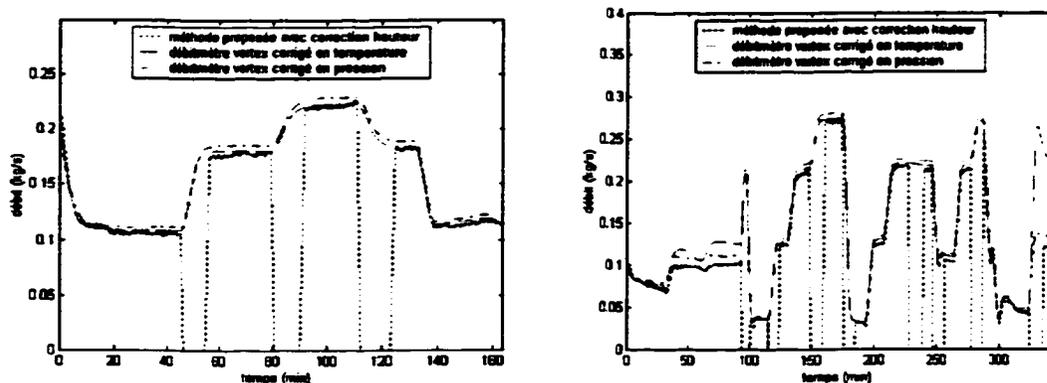


Figure 18 Comparaison des différents débits pour deux séances d'essai
(voir ANNEXE 1, Test 1 et Test 2)

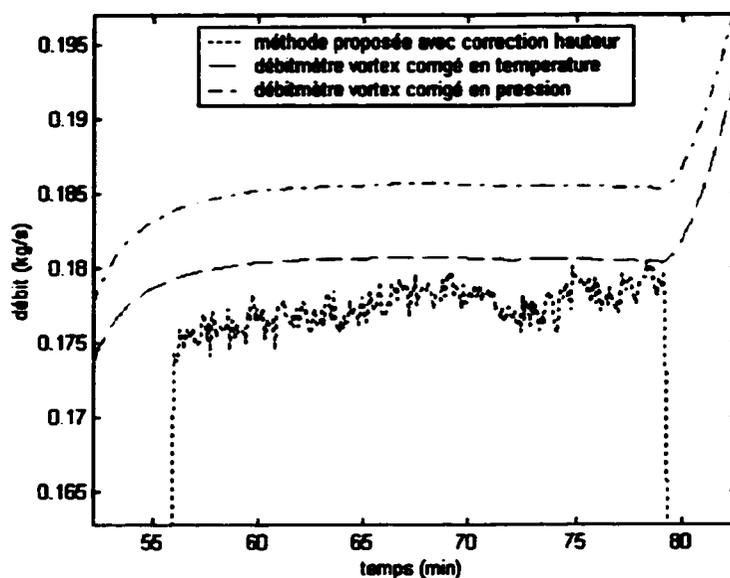


Figure 19 Agrandissement pour une plage de débit

La Figure 18 présente les résultats obtenus pour les différents débits lors de deux séances d'essai. Pour chacun des ces essais, on peut constater qu'il y a une légère différence entre le débit obtenu par notre banc d'essai et les valeurs lues avec le débitmètre. La Figure 19 montre cette différence. Le débit obtenu par notre méthode de mesure du poids de condensât tient compte de la variation de niveau de l'échangeur.(cf. 3.3)

5.1.1 Facteur de proportionnalité

Nous avons vu (cf. 2.2) qu'un facteur K liait le débit au nombre de vortex. Pour les deux essais présentés précédemment, nous avons vérifié qu'un facteur de proportionnalité était applicable partout pour permettre de rapprocher les courbes de débit. En effet, pour une plage de valeurs données prise au hasard (Test 2, entre les minutes 160 et 175), un facteur permettant de faire coïncider la courbe de débit vortex avec celle du débit obtenu par mesure du poids de condensât a été calculé. Puis cette

correction a été appliquée à toutes les plages de valeurs et on peut constater que les courbes se superposent relativement bien partout (voir Figure 20 et Figure 21, courbes avec correction facteur K). On est alors capable de calculer un nouveau facteur K. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau IX

Facteur K

	Facteur K constructeur	Facteur K déterminé	Ecart
Débit vortex corrigé sur la température	530 pulsations/ft ³	524,92 pulsations/ft ³	0,96%
Débit vortex corrigé sur la pression	530 pulsations/ft ³	512,11 pulsations/ft ³	3,38%

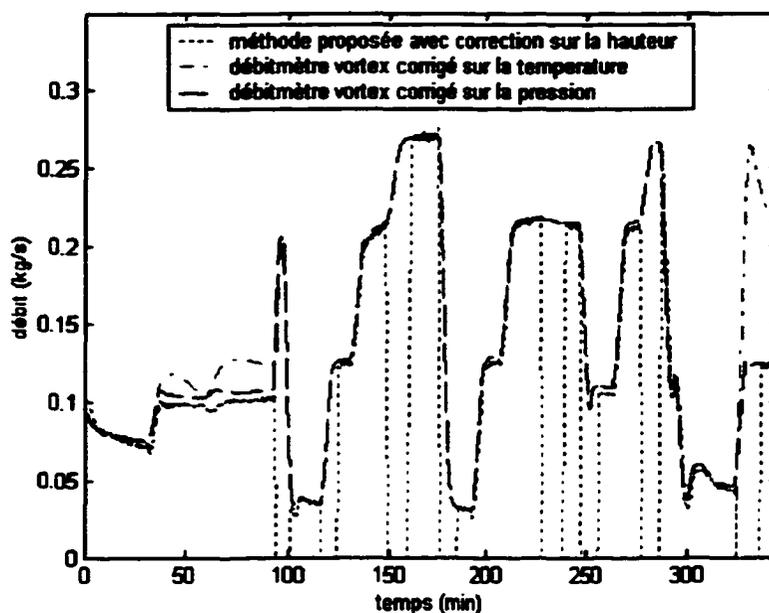


Figure 20 Application et détermination du facteur de correction (voir ANNEXE 1, Test 2)

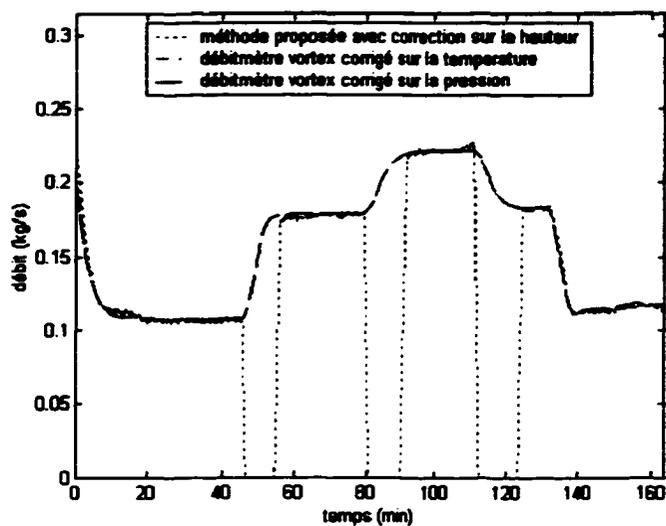


Figure 21 Application du même facteur K sur le test 1 (voir ANNEXE 1, Test 1)

On peut remarquer que le facteur de correction déterminé pour une plage de valeurs et appliqué par la suite à l'ensemble des données permet de faire coïncider les courbes avec une bonne précision. On va alors essayer de déterminer le facteur K moyen à utiliser avec ce débitmètre pour avoir les mêmes valeurs de débit. Donc pour chaque plage on peut obtenir un facteur, puis faire une moyenne.

On obtient un facteur moyen $K=510$ pulsations/ft³ pour la correction sur la température et $K=498$ pulsations/ft³ pour la correction sur la pression.

5.2 Essai avec la tuyère à vitesse critique et débitmètre de 2 in

Une tuyère est installée sur notre banc d'essai pour pouvoir comparer la valeur du débit obtenue avec notre méthode de mesure de la masse de condensât avec la valeur donnée par la tuyère. Cette tuyère n'est pas utile à proprement parler pour la méthode, mais elle permet la comparaison et la validation des résultats.

5.2.1 Résultats

Les Figure 22 et Figure 23 présentent les résultats obtenus pour un essai avec la tuyère en régime critique. Les cinq débits sont donnés :

- le débit calculé à partir de la mesure du poids de condensât (« méthode proposée »)
- le débit calculé d'après la masse de condensât en tenant compte de la variation de niveau dans l'échangeur de chaleur (« méthode proposée avec correction sur la hauteur »)
- le débit obtenu avec le débitmètre vortex et corrigé avec le volume spécifique de la vapeur saturée à la température mesurée (« débitmètre vortex avec correction sur la température »)

- le débit obtenu avec le débitmètre vortex et corrigé avec le volume spécifique de la vapeur saturée à la pression mesurée («débitmètre vortex avec correction sur la pression »)
- le débit obtenu avec la tuyère en régime critique (« tuyère »)

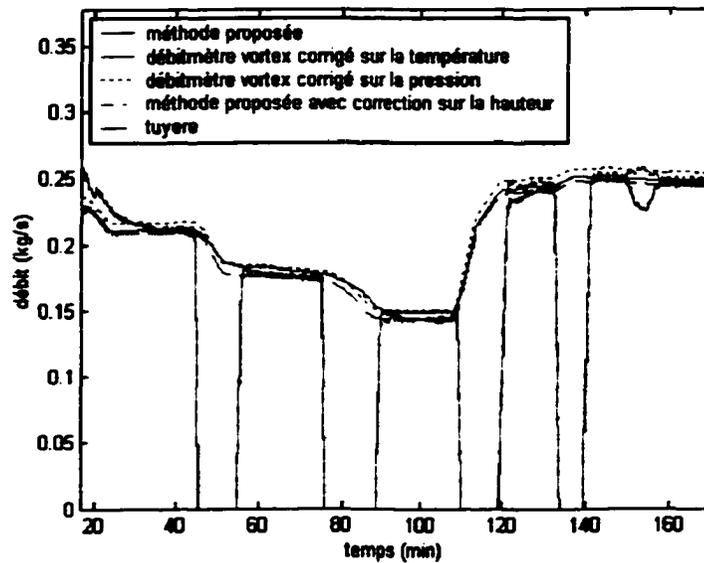


Figure 22 Résultats obtenus avec la tuyère à vitesse critique (voir ANNEXE 1, Test 6)

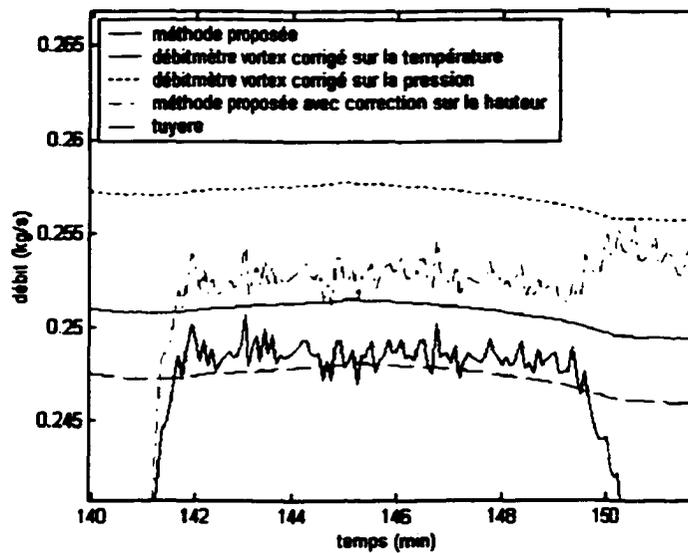


Figure 23 Détails d'une période de mesure (voir ANNEXE 1, Test 6)

La différence obtenue entre le débit mesuré avec la tuyère et celui calculé à partir de la masse de condensât et de la variation de niveau dans l'échangeur de chaleur est comprise entre 0.5 % et 2.3 %, pour une pression variant de 459 kPa à 813 kPa.

A noter que la plage de valeurs comprise entre les minutes 60 et 110 correspond à une plage où la vapeur est à l'état surchauffée. En effet, compte tenu du type de correction utilisée dans les calculs, le volume spécifique est pris soit à la température mesurée, soit à la pression mesurée dans le cas où la température de la vapeur est égale (ou très légèrement inférieure) à la température de saturation à la pression de la vapeur mesurée, ou alors, si la température de la vapeur est supérieure à la température de saturation, le volume spécifique est celui de la vapeur surchauffée pris à la pression et la température mesurées. Dans ce dernier cas, les deux débits sont donc identiques.

5.2.2 Synthèse

Ces essais nous ont permis de valider notre méthode et de voir que les résultats obtenus coïncidaient plutôt bien avec ceux donnés par une tuyère en régime critique et par un débitmètre à vortex calibré par le manufacturier. Une étude plus détaillée de la précision du banc d'essai est présentée au CHAPITRE 4.

Les résultats de la comparaison entre le débit donné par le débitmètre à vortex et notre mesure basée sur la masse de condensât et tenant compte des variations de niveau de condensât dans l'échangeur de chaleur sont synthétisés à la Figure 24.

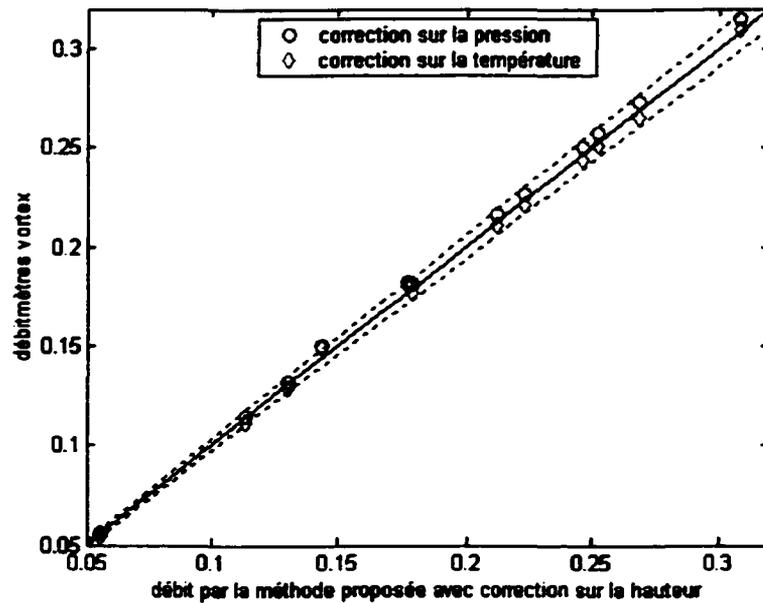


Figure 24 Calibration du débitmètre à vortex (voir ANNEXE 1, Test 6 et Test 7)

La calibration proposée est considérée comme la référence. La différence entre le débit de référence et les débits donnés par le débitmètre à vortex est comprise dans l'intervalle

de ± 3 %. La valeur moyenne de ces écarts est de +1.8 % pour le débit avec correction sur la pression et de -2.04 % pour celui avec correction sur la température.

Le tableau suivant présente les résultats obtenus pour le débit avec la méthode proposée, le débitmètre de 2 in et la tuyère à vitesse critique.

Tableau X

Résultats pour le débitmètre de 2 in et la tuyère à vitesse critique

débit (kg/s) obtenu par			
méthode proposée avec correction sur le niveau de condensât	débitmètre à vortex avec correction sur la température	débitmètre à vortex avec correction sur la pression	tuyère à vitesse critique
0,223	0,221	0,227	
0,131	0,129	0,132	
0,056	0,054	0,056	
0,114	0,112	0,115	
0,179	0,177	0,181	
0,269	0,265	0,273	
0,308	0,309	0,315	
0,212	0,211	0,216	0,209
0,177	0,181	0,182	0,175
0,144	0,149	0,150	0,143
0,246	0,244	0,250	0,241
0,253	0,251	0,257	0,248

CONCLUSION

Une méthode innovante de calibration des débitmètres à vapeur a été développée dans le cadre de ce mémoire. A l'aide d'un banc d'essai unique en Amérique du Nord, on est maintenant capable de calibrer des débitmètres à vapeur en utilisant la vapeur comme fluide de calibration.

Le comportement du banc d'essai a pu être connu précisément, avec notamment l'étude menée sur l'augmentation de hauteur dans l'échangeur de chaleur ainsi que celle sur les oscillations du débit autour de sa valeur moyenne. Les résultats ont été vérifiés grâce à la comparaison de notre mesure avec les résultats donnés par une tuyère à vitesse critique.

Un des points remarquables du travail réalisé ici est la correction appliquée au calcul du débit tenant compte de l'accumulation de condensât dans l'échangeur de chaleur vertical. Cette correction présente de bons résultats. Cependant, dans les travaux futurs, on pourra essayer de comprendre pourquoi le niveau de condensât ne se stabilise pas dans l'échangeur de chaleur. D'autre part, après étude des résultats des différents tests, on remarque que pour des mêmes ouvertures de valves, la hauteur dans l'échangeur de chaleur n'est pas toujours la même. Ceci peut être dû à la valve de condensât située en aval de celui-ci, qui lors de tous les essais était ouverte entre 5 % et 8 %. Son fonctionnement à de si faibles ouvertures n'est peut-être pas très précis. On pourra par exemple améliorer le banc d'essai à ce niveau. De plus, en développant un modèle mathématique de l'échangeur de chaleur, on pourra mieux comprendre le comportement de ce dernier.

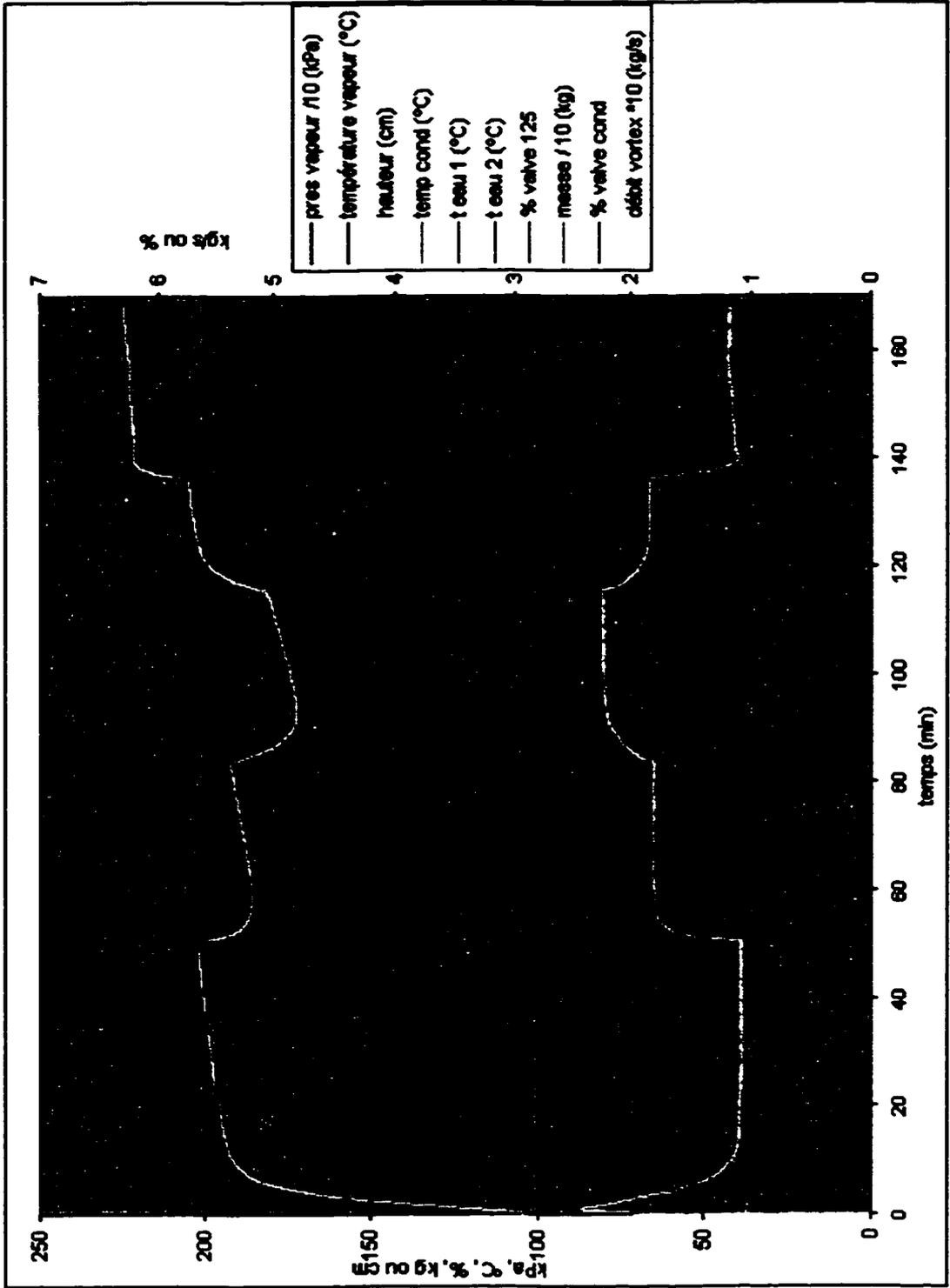
Il a également été remarqué que la température de vapeur mesurée est inférieure de quelques degrés à la température de saturation de la vapeur à la pression mesurée. Un des points d'étude pourra alors être le calcul des pertes de chaleur dans la sonde de température qui se comporte un peu comme une ailette.

Il a été vu d'autre part que la précision obtenue avec cette méthode est bonne (de l'ordre de 0.25 % sur le débit). Cette précision est très nettement influencée par le phénomène d'oscillation du débit autour de la valeur moyenne (erreur aléatoire). Ces oscillations sont dues au fait que le condensât ne s'écoule pas régulièrement dans le réservoir ; ceci à cause probablement de la fraction de condensât à la pression de fonctionnement qui est récupérée au niveau du purgeur à l'entrée de l'échangeur. La précision du transmetteur de pression et de la sonde de température au niveau du débitmètre à calibrer influence aussi très nettement la précision globale de la calibration. Une amélioration pourra également être faite à ce niveau. Notamment on s'assurera aussi que ces instruments sont « traçables », c'est-à-dire que leur étalonnage respecte une chaîne de calibration bien déterminée telle que définie par le National Institute of Standards and Technology (NIST).

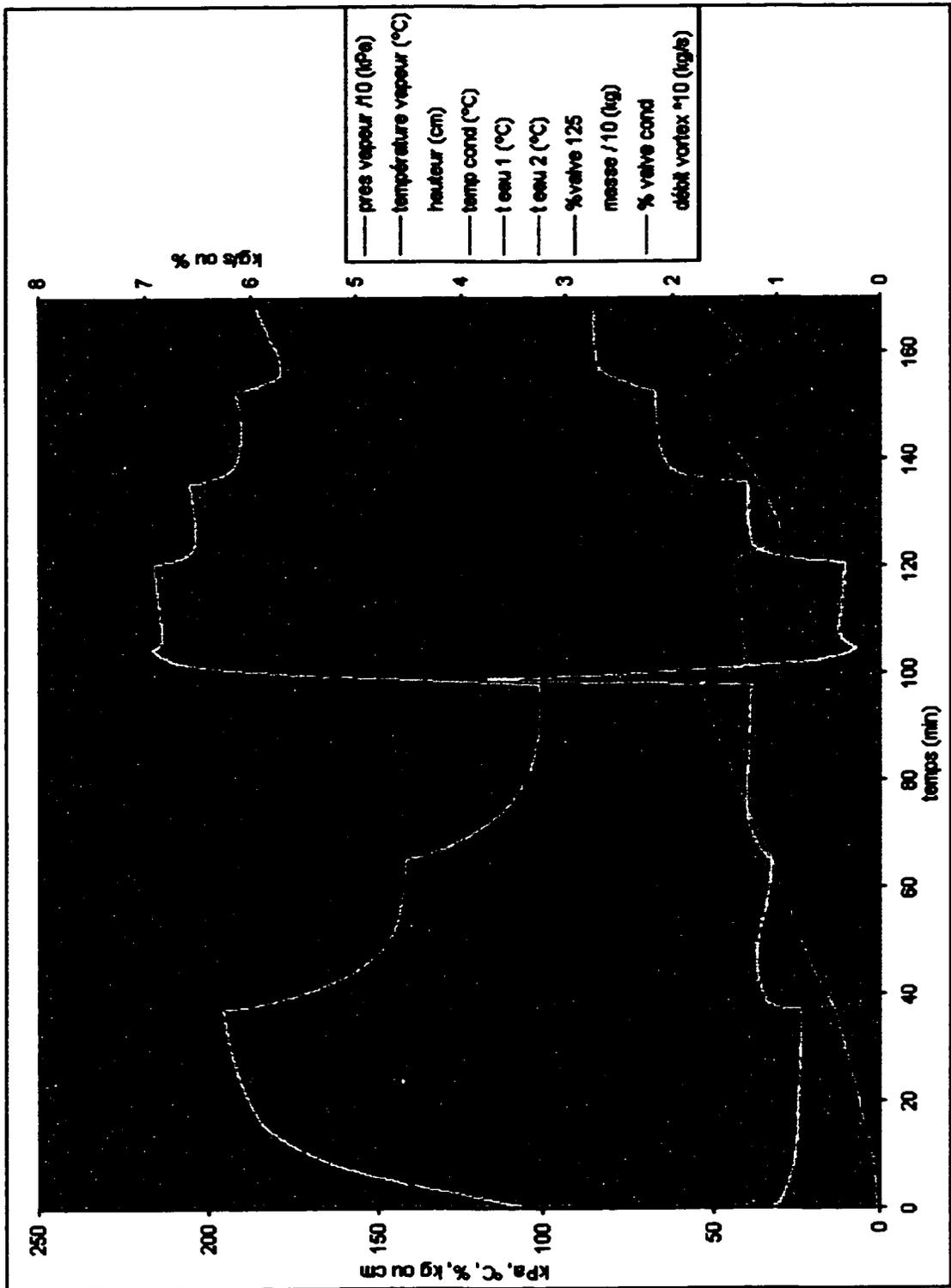
Enfin, on a vu que, comme la hauteur ne se stabilise pas, la pression ne reste pas non plus tout à fait constante. Le développement et la mise en place d'un système de contrôle automatique permettront de contrôler avec beaucoup plus de précision l'établissement du régime permanent.

ANNEXE 1

Courbes des différents tests

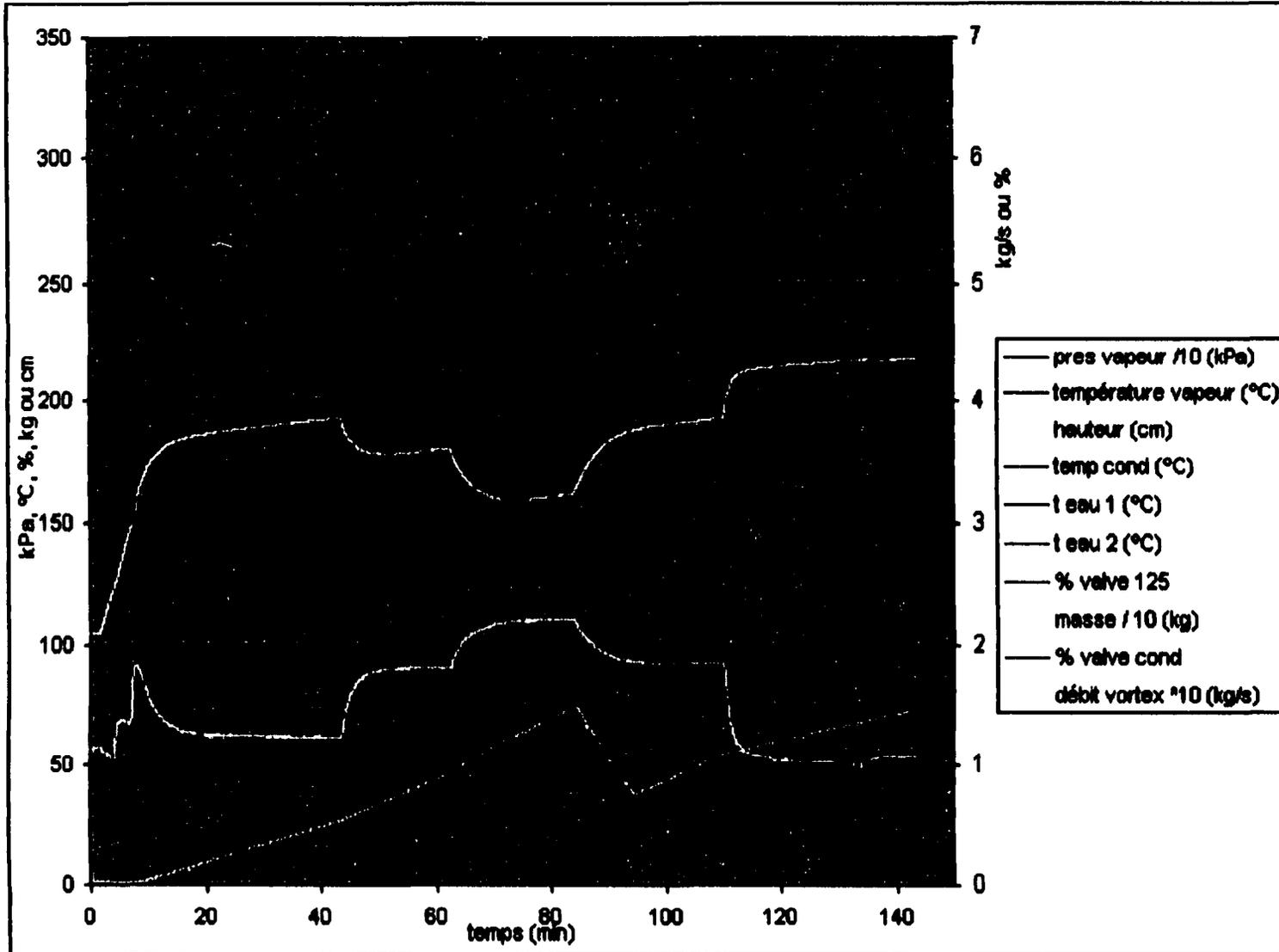


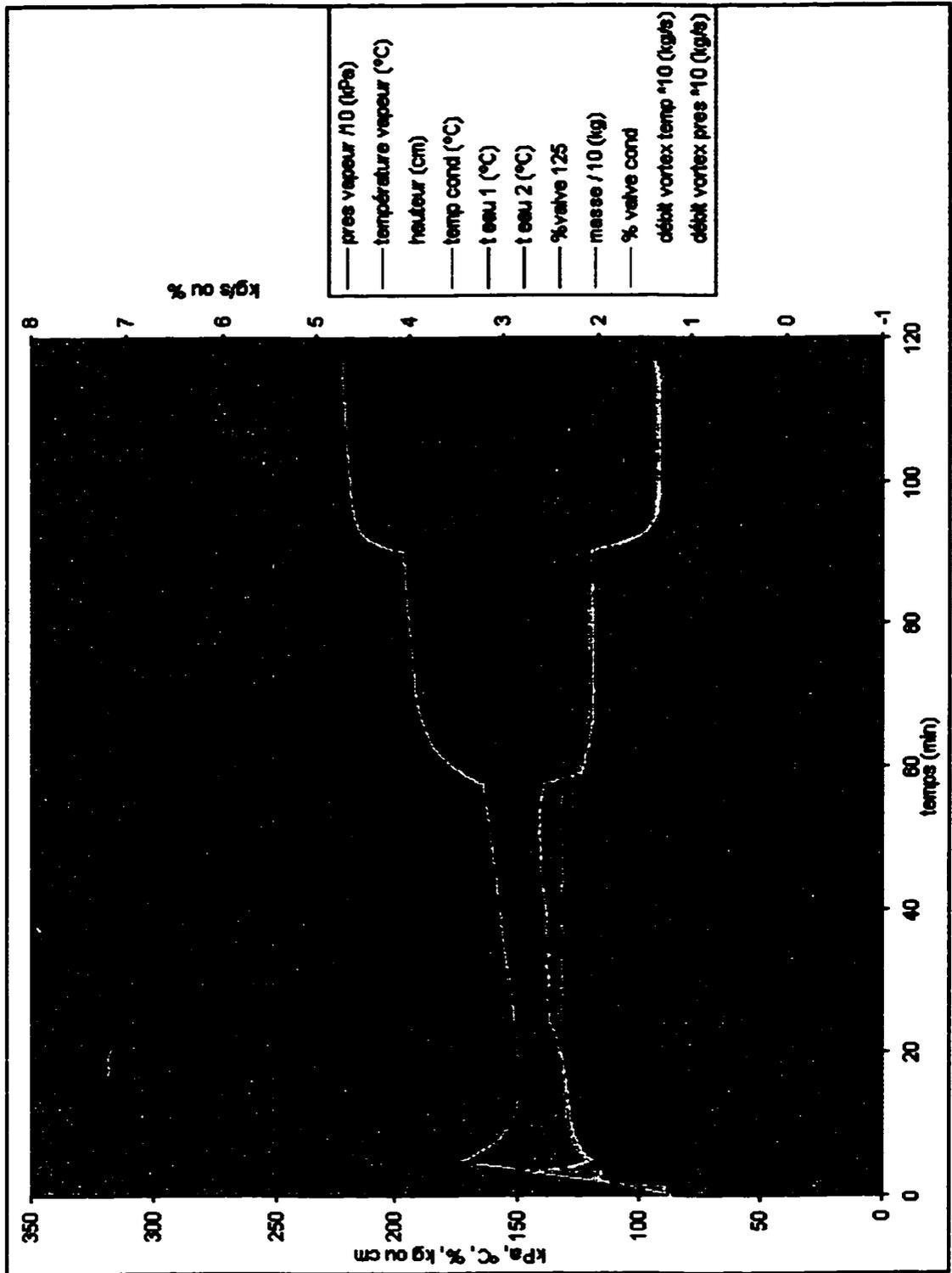
Test 1 réalisé le 10 juillet 2001, débitmètre 1.5 in



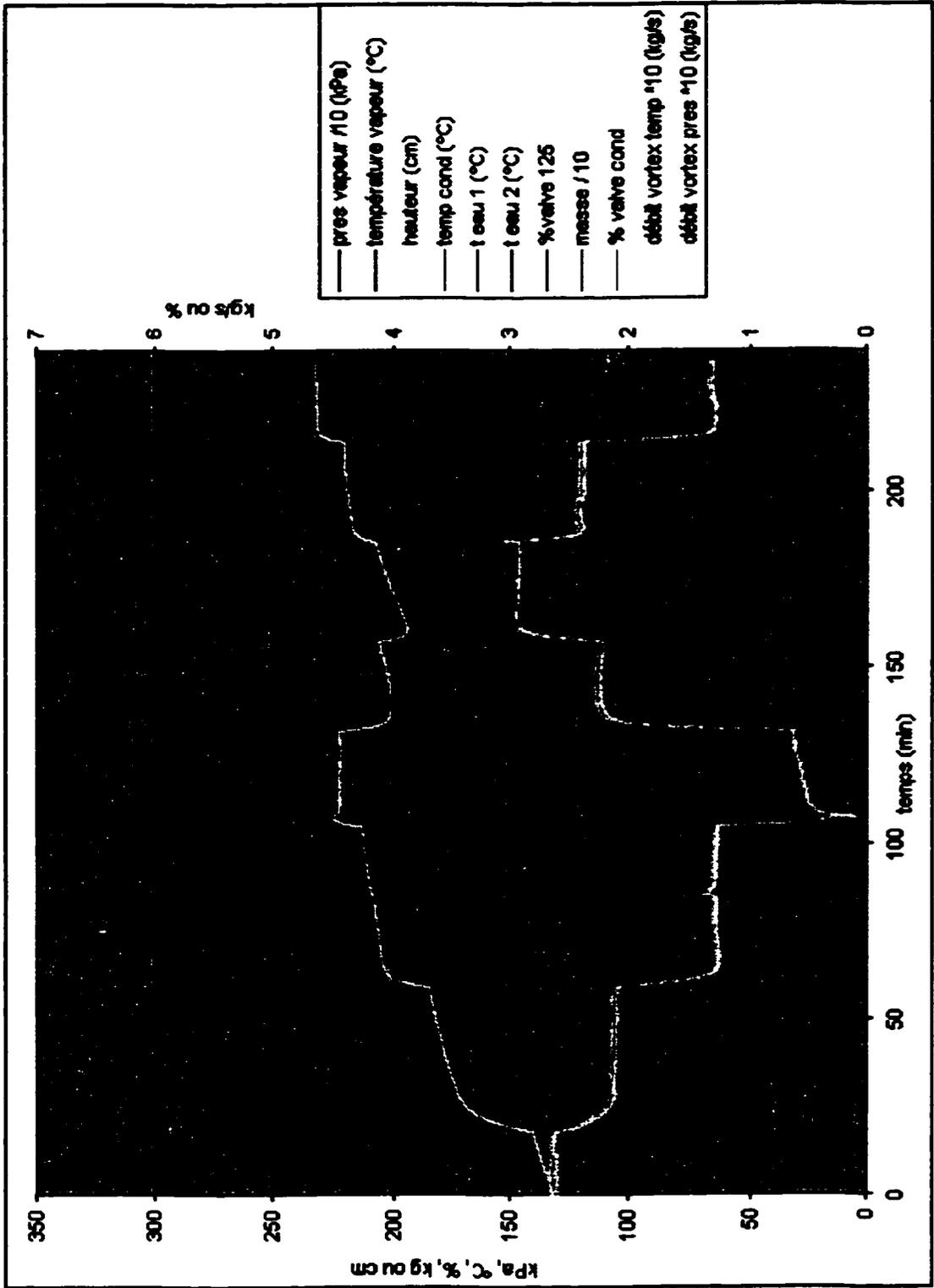
Test 2 réalisé le 11 juillet 2001, débitmètre 1.5 in

Test 3 réalisé le 6 juillet 2001, débitmètre 1.5 in

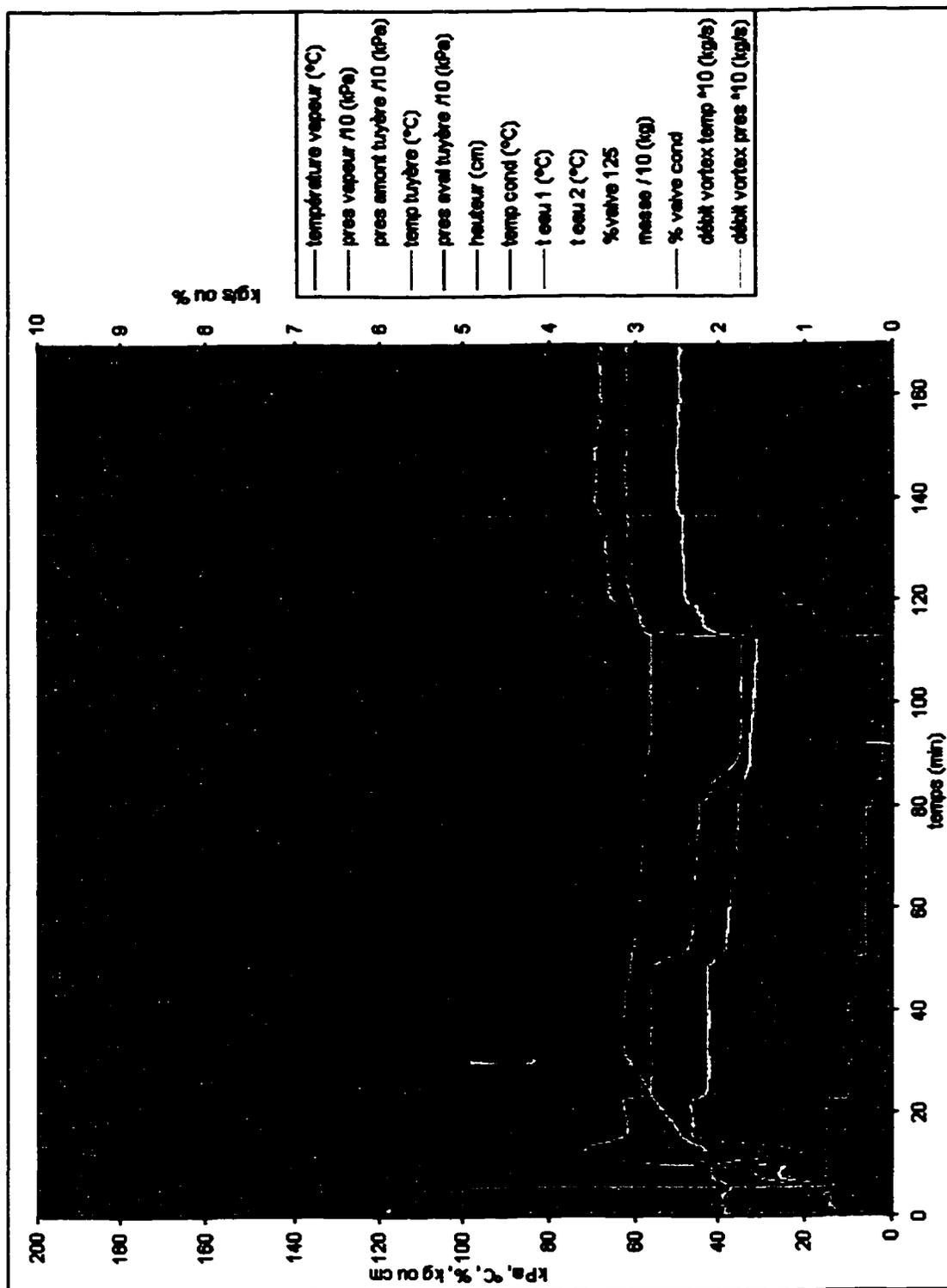




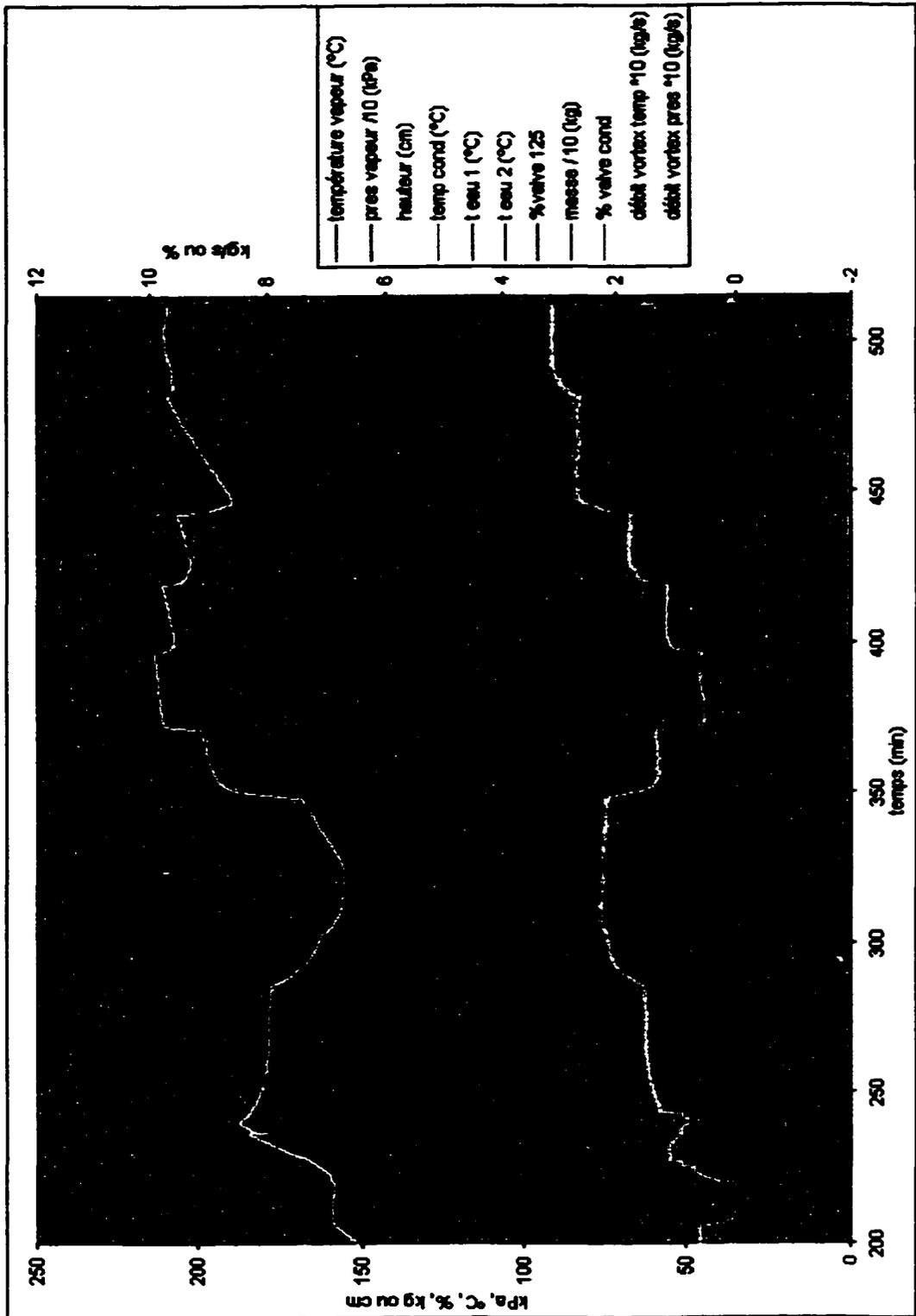
Test 4 réalisé le 20 novembre 2001 avec bypass du purgeur, débitmètre 1.5 in



Test 5 réalisé le 21 novembre 2001 avec isolation du débitmètre, débitmètre 1.5 in



Test 6 réalisé le 21 mars 2002, débitmètre 2 in



Test 7 réalisé le 19 mars 2002, débitmètre 2 in

ANNEXE 2

Programmes Matlab

```

%#####
%      Calcul et tracé du débit sur 1,3 et 5 minutes
%#####

```

```

Clear all
close all

```

```

%---lecture données-----
cd('données')
load test_10_07_2.txt;
val=test_10_07_2(:,:); %---matrice des résultats---
cd ..

```

```

%---colonne 1 : temps                colonne 2 : ---
%---colonne 3 : p1                   colonne 4 : t2
%---colonne 5 : ---                  colonne 6 : ---
%---colonne 7 : hauteur po          colonne 8 : t cond
%---colonne 9 : ---                  colonne 10 : ---
%---colonne 11 : t eau 1             colonne 12 : t eau 2
%---colonne 13 : masse               colonne 14 : ---
%---colonne 15 : ---                 colonne 16 : %125
%---colonne 17 : %cond               colonne 18 : ---
%---colonne 19 : débit vortex

```

```

%-----calcul débit vortex corrigé sur la pression---
cd vapeur
t2=(val(:,4)-32)/1.8;
p1=6.895*(val(:,3)+14.69);
n=length(t2);
[pp,vt]=vapeur_sat('T',t2,1);
[tsat,vv]=vapeur_sat('p',p1,1);
for i=1:n
    vvv(i)=vapeur_surch(t2(i),p1(i));
end
comp=t2<=tsat;
kk=find(comp);
vp(kk)=vv(kk);
ii=find(comp==0);
vp(ii)=vvv(ii);
dvt=val(:,19);
vp=transpose(vp);
dvp=dvt.*vt./vp;
cd ..

```

```

%---calcul du débit d'après la mesure du poids de condensât---
%---sur k mn-----
for k=1:5
    for i=1:(n-12*k)
        clear moyp
        clear moyt
        dcm(k,i)=(val(i+12*k,13)-val(i,13))/((val(i+12*k,1)-val(i,1))*24);
    end
end

```

```

    for j=1:(13*k-k+1)
        moyp(j)=dvp(j+i-1);
        moyt(j)=dvt(j+i-1);
    end
    dvpm(k,i)=mean(moyp);
    dvtm(k,i)=mean(moyt);
    temps(k,i)=i*5/60;
end
end
longueur=length(dcm);

%-----graphiques----- (unités SI)-----
for l=1:5
    figure(l+5)
    plot(nonzeros(temps(l,:)),nonzeros(dvtm(l,:))*1.26e-4,'-r')
    hold on
    plot(nonzeros(temps(l,:)),nonzeros(dvpm(l,:))*1.26e-4,'-k')
    hold on
    plot(nonzeros(temps(l,:)),nonzeros(dcm(l,:))*1.26e-4,':')
    axis([0 180 0 2500*1.26e-4])
    ylabel('débit (kg/s)')
    xlabel('temps (min)')
    legend('débitmètre vortex corrigé en température','débitmètre vortex corrigé en pression','[méthode
proposée (' ,int2str(l),' min)'],0)
end

%-----
figure(12)
plot(1:600,nonzeros(dcm(1,1:600))*1.26e-4,':')
hold on
plot(650:1000,nonzeros(dcm(3,650:1000))*1.26e-4,':')
hold on
plot(1050:1960,nonzeros(dcm(5,1050:1960))*1.26e-4,':')
axis([0 longueur 0 2500*1.26e-4])
ylabel('kg/s')
xlabel('measurement point number')
legend('1 mn','3 mn','5 mn',2)

%-----calcul des écart-types-----
for k=1:5
    ecartype(1,k)=std(nonzeros(dcm(k,250:500)));
    ecartype(2,k)=std(nonzeros(dcm(k,700:940)));
    ecartype(3,k)=std(nonzeros(dcm(k,1110:1310)));
    ecartype(4,k)=std(nonzeros(dcm(k,1500:1570)));
    ecartype(5,k)=std(nonzeros(dcm(k,1750:1950)));
    moyenne(1,k)=mean(nonzeros(dcm(k,250:500)));
    moyenne(2,k)=mean(nonzeros(dcm(k,700:940)));
    moyenne(3,k)=mean(nonzeros(dcm(k,1110:1310)));
    moyenne(4,k)=mean(nonzeros(dcm(k,1500:1570)));
    moyenne(5,k)=mean(nonzeros(dcm(k,1750:1950)));
end

```

```
ecart=(ecartype./moyenne)*100
for k=1:5
periode(k)=mean(ecart(:,k));
end
periode
```

```

%#####
%          Calcul du débit selon la méthode proposée et correction
%          tenant compte de l'augmentation de hauteur de condensât
%          Calcul du débit volumique
%#####

close all
clear all

%---lecture données-----
cd('données')
load test_10_07_2.txt;
%load test_21_11_deb_isole_2.txt;
val=test_10_07_2(:,:); %---matrice des résultats---
%val=test_21_11_deb_isole_2(:,:); %---matrice des résultats---
cd ..

%---colonne 1 : temps           colonne 2 : ---
%---colonne 3 : p1             colonne 4 : t2
%---colonne 5 : ---           colonne 6 : ---
%---colonne 7 : hauteur po     colonne 8 : t cond
%---colonne 9 : ---           colonne 10 : ---
%---colonne 11 : t eau 1       colonne 12 : t eau 2
%---colonne 13 : masse         colonne 14 : ---
%---colonne 15 : ---           colonne 16 : %125
%---colonne 17 : %cond        colonne 18 : ---
%---colonne 19 : débit vortex

haut=val(:,7);
v125=val(:,16);
vcond=val(:,17);
masse=val(:,13);
temps=val(:,1);
tcond=val(:,8);
dvt=val(:,19);
pression=val(:,3);
temperature=val(:,4);

%-----dimensions-----
D=12; %in
D=D*0.0254; %m
d=0.75; %in
d=d*0.0254; %m
A=((pi*D^2)/4)-(48*pi*(d^2)/4);

%-----unités SI-----
haut=haut*0.0254; %m
masse=masse*0.4535924; %kg
tcond=(tcond-32)/1.8; %---temp condensât en °C
temps=temps*24*3600; %---en seconde
dvt=dvt*0.4535924/3600; %---kg/s
pression=pression*6.895; %---kPa

```

```

temperature=(temperature-32)/1.8; %--temp vap en °C

%-----calcul débit vortex corrigé sur la pression-----
cd vapeur
n=length(temperature);
[pp,vt]=vapeur_sat('T',temperature,1);
[tsat,vv]=vapeur_sat('p',pression+101.325,1);
for i=1:n
    vv(i)=vapeur_surch(temperature(i),pression(i)+101.325);
end
comp=temperature<=tsat;
kk=find(comp);
vp(kk)=vv(kk);
ii=find(comp==0);
vp(ii)=vv(ii);
vp=transpose(vp);
dvp=dvt.*vt./vp;
cd ..

%-----calculs-----
cd vapeur
[p,v,u,h,s]=vapeur_sat('T',tcond,0); %--on considère liquide saturé à température du condensât
cd ..

for k=1:length(masse)-60 %--calcul sur 5 mn
    clear moyp
    clear moyt
    clear moyv
    clear moyvt
    clear moyvp
    dcm(k)=(masse(k+60)-masse(k))/(temps(k+60)-temps(k)); %--calcul du débit
    aughaut(k)=haut(k+60)-haut(k); %--augmentation de hauteur
    tem(k)=k; %--temps 5 mn
    for j=1:(13*5-5+1)
        moyp(j)=dvp(j+k-1);
        moyt(j)=dvt(j+k-1);
        moyv(j)=v(j+k-1);
        moyvt(j)=vt(j+k-1);
        moyvp(j)=vp(j+k-1);
    end
    vmean(k)=mean(moyv);
    dvpm(k)=mean(moyp);
    dvtm(k)=mean(moyt);
    vtm(k)=mean(moyvt);
    vpm(k)=mean(moyvp);
end
augmasse=aughaut*A./vmean; %--augmentation de la masse sur 5 mn
ecart=((augmasse/(5*60))./dcm)*100;
da=augmasse/(5*60);
debitcorr=dcm+da;
temps=tem*5/60;

```

```

figure(1)
plot(temps,ecart,':')
axis([0 temps(length(temps)) 0 5])
%title('écart relatif sur le débit du à l"accumulation de condensât')
xlabel('temps (min)')
ylabel('écart (%)')

```

```

figure(2)
plot(temps,dcm,'-r')
hold on
plot(temps,debitcorr,'--k')
%hold on
%plot(temps,dvm,'m')
axis([0 temps(length(temps)) 0 .3])
%legend('méthode proposée','méthode proposée avec correction sur la hauteur de condensât','débitmètre
vortex',2)
legend('méthode proposée','méthode proposée avec correction sur la hauteur de condensât',2)
ylabel('débit (kg/s)')
xlabel('temps (min)')

```

```

figure(3)
plot(temps,da)

```

```

%débit volumique
deb_vol_T=vtm.*debitcorr;
deb_vol_p=vpm.*debitcorr;

```

```

%—sauvegarde des données—
save debit_10_07 temps tem dcm debitcorr haut tcond da pression temperature deb_vol_T deb_vol_p
dvtm dvpm

```

```
% tracé de courbes montrant la variation de pression équivalent à
% l'augmentation du niveau de condensât
```

```
close all
clear all
```

```
load hauteur_pression_2.txt;
hauteur=hauteur_pression_2(:,1); %po
presmes=hauteur_pression_2(:,2); %psi
presequ=hauteur_pression_2(:,3); %psi
```

```
% unités SI
```

```
hauteur=hauteur*25.4e-3; %m
presmes=presmes*6.895; %kPa
presequ=presequ*6.895; %kPa
x=2371:2370+length(hauteur);
temps=x*5/60;
```

```
figure(1)
```

```
plot(temps,presequ,temps,presmes,':')
```

```
ylabel('pression (kPa)')
```

```
xlabel('temps (min)')
```

```
legend('variation pression équivalente','variation pression mesurée',0)
```

```
axis([temps(1) temps(length(temps)) -6 1])
```

```
grid on
```

```
#####
%          Calcul du débit et de la variation de hauteur
%          avec bypass du purgeur aval de l'échangeur
#####
```

```
clear all
close all
```

```
%—lecture données———
cd('données')
load test_20_11_bypass_2.txt;
val=test_20_11_bypass_2(:,:); %——matrice des résultats——
cd ..
```

```
%—colonne 1 : temps           colonne 2 : —
%—colonne 3 : p1             colonne 4 : t2
%—colonne 5 : —             colonne 6 : —
%—colonne 7 : hauteur po     colonne 8 : t cond
%—colonne 9 : —             colonne 10 : —
%—colonne 11 : t eau 1       colonne 12 : t eau 2
%—colonne 13 : masse         colonne 14 : —
%—colonne 15 : —            colonne 16 : %125
%—colonne 17 : %cond         colonne 18 : —
%—colonne 19 : débit vortex température  colonne 20 : débit vortex pression
```

```
%——calcul débit vortex corrigé pour la vapeur surchauffée——
cd vapeur
t2=(val(:,4)-32)/1.8;
p1=6.895*(val(:,3))+14.69;
n=length(t2);
[pp,vt]=vapeur_sat('T',t2,1);
[tsat,vv]=vapeur_sat('p',p1,1);
for i=1:n
    vvv(i)=vapeur_surch(t2(i),p1(i));
end
comp=t2<=tsat;
kk=find(comp);
vp(kk)=vv(kk);
vts(kk)=vt(kk);
ii=find(comp==0);
vp(ii)=vvv(ii);
vts(ii)=vvv(ii);
dvt=val(:,19);
dvp=val(:,20);
vp=transpose(vp);
dvsp=dvt.*vt./vp;
dvst=dvt.*vt./vts';
cd ..
```

```
%——calcul du débit d'après la mesure du poids de condensât——
for i=1:(n-60)
```

```

clear moyp
clear moyt
dcm(i)=(val(i+60,13)-val(i,13))/((val(i+60,1)-val(i,1))*24);
for j=1:(13*5-5+1)
    moysp(j)=dvsp(j+i-1);
    moyt(j)=dvt(j+i-1);
    moyp(j)=dvp(j+i-1);
    moyst(j)=dvst(j+i-1);
end
dvspm(i)=mean(moysp); %—débit moyen vortex corrigé en vapeur surchf et pression
dvtm(i)=mean(moyt); %—débit moyen vortex corrigé sur la température
dvpm(i)=mean(moyp); %—débit moyen vortex corrigé sur la pression
dvstm(i)=mean(moyst); %—débit moyen vortex corrigé en vapeur surchf et température
end

%—mémoire
figure(100)
x=1:length(nonzeros(dcm));
temps=x*5/60;
plot(temps,nonzeros(dcm(:))*1.26e-4)
axis([0 temps(length(temps)) 0 2500*1.26e-4])
ylabel('débit (kg/s)')
xlabel('temps (min)')
grid on

figure(110)
x2=1:length(val);
temps2=x2*5/60;
plot(temps2,val(:,7)*25.4e-3)
xlabel('temps (min)')
ylabel('hauteur (m)')
grid on

figure(555)
plot(temps,nonzeros(dcm(:))*10*1.26e-4,temps2,val(:,7)*25.4e-3,'-.')
axis([0 temps(length(temps)) 0 2500*1.26e-4*10])
ylabel('débit *10 (kg/s) et hauteur (m)')
xlabel('temps (min)')
legend('débit calculé selon la méthode proposée','hauteur')
grid on

```

```

#####
%                               calcul du débit d'eau de refroidissement dans l'échangeur
#####

clear all
close all

%—lecture données——
cd('données')
load test_11_07_2.txt;
val=test_11_07_2(:,:); %—matrice des résultats du test du 11/07—
cd ..

%—colonne 1 : temps                colonne 2 : —
%—colonne 3 : p1                   colonne 4 : t2
%—colonne 5 : —                    colonne 6 : —
%—colonne 7 : hauteur po           colonne 8 : t cond
%—colonne 9 : —                    colonne 10 : —
%—colonne 11 : t eau 1             colonne 12 : t eau 2
%—colonne 13 : masse               colonne 14 : —
%—colonne 15 : —                  colonne 16 : %125
%—colonne 17 : %cond               colonne 18 : —
%—colonne 19 : débit vortex température  colonne 20 : débit vortex pression

%—calcul du débit d'après la mesure du poids de condensât——
n=length(val);
for i=1:(n-60)
    clear moyp
    clear moyt
    dcm(i)=(val(i+60,13)-val(i,13))/((val(i+60,1)-val(i,1))*24); %—débit massique de vapeur en lbm/h
    for j=1:(13*5-5+1)
        moytcond(j)=val(j+i-1,8);
        moyt2(j)=val(j+i-1,4);
        moyp1(j)=val(j+i-1,3);
        moydeltat(j)=abs(val(j+i-1,11)-val(j+i-1,12));
    end
    Tcond(i)=mean(moytcond);
    t22(i)=mean(moyt2);
    p11(i)=mean(moyp1);
    deltaT(i)=mean(moydeltat);
end
%—calcul du débit d'eau——
%—propriétés
cd vapeur
Tcond=(Tcond-32)/1.8;
[p.v,u,hout,s]=vapeur_sat('T',Tcond,0); %—enthalpie du condensât kJ/kg
t2=(t22-32)/1.8;
p1=6.895*(p11+14.69);
n=length(t2);
[pp,v,u,ht,s]=vapeur_sat('T',t2,1);
[tsat,v,u,hp,s]=vapeur_sat('p',p1,1);

```

```

for i=1:n
    [v u h(i)]=vapeur_surch(t2(i),p1(i));
end
comp=t2<=tsat;
kk=find(comp);
hint(kk)=ht(kk);
hinp(kk)=hp(kk);
ii=find(comp==0);
hint(ii)=h(ii); % kJ/kg
hinp(ii)=h(ii); % kJ/kg
cd ..
%—hinp : enthalpie de la vapeur :si saturée à P, sinon surchauffée
%—hint : enthalpie de la vapeur :si saturée à T, sinon surchauffée

%delta T=abs(val(:,11)-val(:,12)); %°F
Cp=1; %Btu/lbm.°F
hinp=hinp/2.326; %Btu/lb
hint=hint/2.326; %Btu/lb
hout=hout/2.326; %Btu/lb
%—débit d'eau
m_eau_p=dcn.*(hinp-hout)/(Cp*deltaT);
m_eau_t=dcn.*(hint-hout)/(Cp*deltaT);

x=1:length(m_eau_t);
temps=x*5/60;

figure(1)
%plot(m_eau_p*1.26e-4)
%hold on
plot(temps,m_eau_t*1.26e-4,'r')
axis([0 temps(length(temps)) 0 3e5*1.26e-4])
%legend('m_e_a_u_p','m_e_a_u_t')

%title('débit eau test du 11/07')
ylabel('débit (kg/s)')
xlabel('temps (min)')
grid on

```

```

#####
%          comparaison entre la température de la vapeur mesurée et
%          la température de saturation `a la pression mesurée
#####
clear all
close all

%—lecture données———
cd('données')
load test_10_07_2.txt;
val=test_10_07_2(:,:); %—matrice des résultats——
cd ..

%—colonne 1 : temps          colonne 2 : —
%—colonne 3 : p1            colonne 4 : t2
%—colonne 5 : —            colonne 6 : —
%—colonne 7 : hauteur po    colonne 8 : t cond
%—colonne 9 : —            colonne 10 : —
%—colonne 11 : t eau 1      colonne 12 : t eau 2
%—colonne 13 : masse        colonne 14 : —
%—colonne 15 : —           colonne 16 : %125
%—colonne 17 : %cond        colonne 18 : —
%—colonne 19 : débit vortex

%——calcul débit vortex corrigé sur la pression——
cd vapeur
t2=(val(:,4)-32)/1.8;
p1=6.895*(val(:,3)+14.69);
[Tsat,v,u,h,s]=vapeur_sat('p',p1,1);
cd ..
x=1:length(val);
temps=x*5/60;

figure(1)
plot(temps,t2,temps,Tsat,'-.')
legend('température mesurée','température de saturation',0)
xlabel('temps (min)')
ylabel('température (°C)')
grid on
axis([0 180 150 175])

% écart
ecart=((Tsat-t2)./t2)*100;
figure(2)
plot(temps,ecart)
mean(ecart(240:2021))

```

```

#####
%                               Tracé des courbes d'augmentation de la hauteur
#####

clear all
close all

%—lecture données———
cd('données')
load test_10_07_2.txt;
val=test_10_07_2(:,:); %—matrice des résultats——
cd ..

%—colonne 1 : temps                colonne 2 : —
%—colonne 3 : p1                   colonne 4 : t2
%—colonne 5 : —                   colonne 6 : —
%—colonne 7 : hauteur po          colonne 8 : t cond
%—colonne 9 : —                   colonne 10 : —
%—colonne 11 : t eau 1            colonne 12 : t eau 2
%—colonne 13 : masse              colonne 14 : —
%—colonne 15 : —                  colonne 16 : %125
%—colonne 17 : %cond              colonne 18 : —
%—colonne 19 : débit vortex

%—transformation unités SI———
pression=val(:,3)*6.895/1000; %psi->MPa
temperature=(val(:,4)-32)/1.8; %°F->°C
hauteur=val(:,7)*2.54e-2; %inch->m
tcond=(val(:,8)-32)/1.8; %°F->°C
teau1=(val(:,11)-32)/1.8; %°F->°C
teau2=(val(:,12)-32)/1.8; %°F->°C
masse=val(:,13)*0.4536; %lbm->kg
debvort=val(:,19)*1.26e-4; %lbm/h->kg/s
v125=val(:,16);
vcond=val(:,17);
n=length(pression);
x=1:n;
temps=x*5/60;
N=max(temps);

%—graphiques———
figure(1)
plot(temps,hauteur,':',temps,pression)
legend('hauteur','pression',0)
grid on
xlabel('temps (min)')
ylabel('hauteur (m) ou pression (MPa)')
axis([0 N 0 2.5])

```

```

#####
%
%          calcul de la variation de masse correspondant à
%          la variation de hauteur d'eau dans l'échangeur
%#####

clear all
close all

%---lecture données-----
load mars_21_2.txt;
val=mars_21_2(:,:); %---matrice des résultats---

%---colonne 1 : temps          colonne 2 : ---
%---colonne 3 : pression vapeur  colonne 4 : température vapeur 1
%---colonne 5 : ---          colonne 6 : température vapeur 2
%---colonne 7 : ---          colonne 8 : hauteur
%---colonne 9 : température condensât  colonne 10 : ---
%---colonne 11 : ---        colonne 12 : t eau 1
%---colonne 13 : t eau 2    colonne 14 : masse
%---colonne 15 : ---        colonne 16 : ---
%---colonne 17 : valve 125  colonne 18 : valve condensât
%---colonne 19 : ---        colonne 20 : débit vortex température
%---colonne 21 : débit vortex pression

%choix de la plage de valeur qui correspond a la vidange de l'échangeur
x=2160:2188;
n=length(x);
val=val(x,:);
hauteur=val(:,8);
masse=val(:,14);
dvp=val(:,21);
dvt=val(:,20);
temps=x*5/60;

% unité SI
hauteur=hauteur*2.54e-2; %m
masse=masse*0.4536; %kg
dvp=dvp*1.26e-4; %kg
dvt=dvt*1.26e-4; %kg

figure(3)
plot(temps,dvt,':',temps,dvp)
legend('débit vortex corrigé en température','débit vortex corrigé en pression')
grid on
ylabel('débit (kg/s)')
xlabel('temps (min)')

% calcul de la quantité de condensât pesée pendant cette période
masse_totale=masse(n)-masse(1); %kg

% variation totale hauteur dans l'échangeur correspondant

```

```

var_haut=-hauteur(n)+hauteur(1); % m

% masse d'un centimetre experimentalement
masse_exp=(masse_totale/var_haut)/100;

figure(4)
plot(temps,masse)
ylabel('masse (kg)')
grid on
xlabel('temps (min)')

figure(5)
plot(temps,hauteur)
ylabel('hauteur (m)')
grid on
xlabel('temps (min)')

% comparaison en tenant compte des dimensions theoriques de l'echangeur
D=12; %po
d=0.75; %po
D=D*25.4e-3; %m
d=d*25.4e-3; %m
N=48; %tubes
A=(pi*D^2/4)-N*pi*d^2/4; %m^2

temp_cond=mean(val(:,9)); %F

cd vapeur
temp_cond=(temp_cond-32)/1.8; %—temp condensat en °C
[p,v,u,h,s]=vapeur_sat(T,mean(temp_cond),0); %—on considere liquide saturé à T moy du condensat
% v en kg/m^3
cd ..

masse_th=(A*v)/100;

'masse correspondante pour 1 cm dans l'echangeur :'
['theorique = ',num2str(masse_th),' kg']
['experimentale = ',num2str(masse_exp),' kg']

figure(7)
plot(hauteur,masse)
xlabel('hauteur (m)')
ylabel('masse (kg)')
grid on

```

```

#####
%
%          calcul débit corrigé sur la pression
%          comparaison débit vortex (température , pression) / débit calculé
%          Et débit tuyère
%
#####

```

```

clear all
close all

```

```

%—lecture données-----
load mars_21_2.txt;
val=mars_21_2(:,:); %—matrice des résultats—

```

```

%—colonne 1 : temps          colonne 2 : température
vapeur
%—colonne 3 : pression vapeur          colonne 4 : —
%—colonne 5 : press amont tuyère      colonne 6 : température vapeur tuyère
%—colonne 7 : press aval tuyère      colonne 8 : hauteur
%—colonne 9 : température condensât  colonne 10 : —
%—colonne 11 : —                  colonne 12 : t eau l
%—colonne 13 : t eau 2            colonne 14 : masse
%—colonne 15 : —                  colonne 16 : —
%—colonne 17 : valve 125          colonne 18 : valve
condensât
%—colonne 19 : —                  colonne 20 : débit vortex
température
%—colonne 21 : débit vortex pression

```

```

%—comparaison débit calculé masse/débit vortex
n=length(val);
dvt=val(:,20);
dvp=val(:,21);
haut=val(:,8);
tcond=val(:,9);
pression=val(:,3);
temp=val(:,2);

```

```

%calcul débit tuyère

```

```

cd calcul_debit
load tuyere

```

```

cd ..
n=2104;
debit1=debit1/0.4536;
debit2=debit2/0.4536;

```

```

%calcul débit masse
for i=1:(n-60)
    clear moyp

```

```

clear moyt
clear moydeb1
clear moydeb2

dcm(i)=(val(i+60,14)-val(i,14))/((val(i+60,1)-val(i,1))^24);
x(i)=i;
aughaut(i)=haut(i+60)-haut(i); %—augmentation de hauteur
for j=1:(13*5-5+1)
    moyt(j)=dvt(j+i-1);
    moyp(j)=dvp(j+i-1);
    moydeb1(j)=debit1(j+i-1);
    moydeb2(j)=debit2(j+i-1);
end
dvtm(i)=mean(moyt); %—débit moyen vortex corrigé sur la température
dvpm(i)=mean(moyp); %—débit moyen vortex corrigé sur la pression
debit_tuy1(i)=mean(moydeb1); %—débit moyen tuyere 1
debit_tuy2(i)=mean(moydeb2); %—débit moyen tuyere 2
end

%—correction de la hauteur de condensât accumulée.
%—dimensions—————
D=12; %in
d=0.75; %in
A=((pi*D^2)/4)-(48*pi*(d^2)/4);

cd vapeur
tcondC=(tcond-32)/1.8; %—temp condensât en °C
[p,v,u,h,s]=vapeur_sat('T',mean(tcondC),0); %—on considère liquide saturé à T moy du condensât
v=v*(10^6/16.4)*0.4536; %—v en in^3/lbm
cd ..

augmasse=aughaut*A/v; %—augmentation de la masse sur 5 mn
ecart=((augmasse/(5/60))/dcm)*100;
debitcorr=dcm+(augmasse/(5/60));

%—presssion

pres(1)=mean(pression(400:530));
pres(2)=mean(pression(700:890));
pres(3)=mean(pression(1100:1300));
pres(4)=mean(pression(1500:1580));
pres(5)=mean(pression(1700:1800));
pres
%— température
temperature(1)=mean(temp(400:530));
temperature(2)=mean(temp(700:890));
temperature(3)=mean(temp(1100:1300));
temperature(4)=mean(temp(1500:1580));
temperature(5)=mean(temp(1700:1800));
temperature

%—vérification vapeur saturée

```

```

cd vapeur
pression=(pression+14.7)*6.895;
temp=(temp-32)/1.8;
[T,vpres,u,h,s]=vapeur_sat('p',pression,1);
[ppp,vtemp,u,h,s]=vapeur_sat('T',temp,1);
cd ..
for k=1:length(dvtm)
    if T(k)<temp(k)
        cd vapeur
        [vsurch,u,h,s,a] = vapeur_surch(temp(k),pression(k));
        dvtmsur(k)=dvtm(k)*vtemp(k)/vsurch;
        dvpmsur(k)=dvpms(k)*vpres(k)/vsurch;
        cd ..
    else
        dvtmsur(k)=dvtm(k);
        dvpmsur(k)=dvpms(k);
    end
end
end

temps=x*5/60;
figure(10)
plot(temps,dcm*1.26e-4,temps,dvtmsur*1.26e-4,temps,dvpmsur*1.26e-4,':',temps,debitcorr*1.26e-4, '-.',temps,debit_tuy2*1.26e-4,'--')
axis([200*5/60 2050*5/60 0 3000*1.26e-4])
%legend('mass','/temperature','/pressure','mass+level','nozzle',2)
legend('méthode proposée','débitmètre vortex corrigé sur la température','débitmètre vortex corrigé sur la pression','méthode proposée avec correction sur la hauteur','tuyere',2)
%title('comparaison débit test 21/03')
ylabel('débit (kg/s)')
%xlabel('measurement point number')
xlabel('temps (min)')

%—débits
debmass(1)=mean(debitcorr(400:530)*1.26e-4); %mass+level
debmass(2)=mean(debitcorr(700:890)*1.26e-4);
debmass(3)=mean(debitcorr(1100:1300)*1.26e-4);
debmass(4)=mean(debitcorr(1500:1580)*1.26e-4);
debmass(5)=mean(debitcorr(1700:1800)*1.26e-4);

debpres(1)=mean(dvpmsur(400:530)*1.26e-4);
debpres(2)=mean(dvpmsur(700:890)*1.26e-4);
debpres(3)=mean(dvpmsur(1100:1300)*1.26e-4);
debpres(4)=mean(dvpmsur(1500:1580)*1.26e-4);
debpres(5)=mean(dvpmsur(1700:1800)*1.26e-4);

debtemp(1)=mean(dvtmsur(400:530)*1.26e-4);
debtemp(2)=mean(dvtmsur(700:890)*1.26e-4);
debtemp(3)=mean(dvtmsur(1100:1300)*1.26e-4);
debtemp(4)=mean(dvtmsur(1500:1580)*1.26e-4);
debtemp(5)=mean(dvtmsur(1700:1800)*1.26e-4);

```

```
debmass  
debpres  
debtemp
```

```
debtuy(1)=mean(debit_tuy2(400:530)*1.26e-4);  
debtuy(2)=mean(debit_tuy2(700:890)*1.26e-4);  
debtuy(3)=mean(debit_tuy2(1100:1300)*1.26e-4);  
debtuy(4)=mean(debit_tuy2(1500:1580)*1.26e-4);  
debtuy(5)=mean(debit_tuy2(1700:1800)*1.26e-4);  
debtuy
```

```
ecart=((debmass-debtuy)/debmass)*100
```

```
save donne_tuyere pres temperature debmass debpres debtemp debtuy ecart
```

```

#####
%      tracé du graphe de calibration
#####

clear all
close all
load debitmasslevel.txt
debitmass=debitmasslevel;

load debitpressure.txt
debitpres=debitpressure;

load debitemperature.txt
debittemp=debitemperature;

x=0.05:0.0001:0.35;
y=x;
y1=x+(0.03*x);
y2=x-(0.03*x);

figure(1)
plot(debitmass,debitpres,'o',debitmass,debittemp,'d')
hold on
plot(x,y,'k',x,y1,':k',x,y2,':k')
axis([0.05 0.32 0.05 0.32])
%legend('correction on pressure','correction on temperature',0)
%xlabel('flow rate mass+level')
%ylabel('vortex flow rate')
legend('correction sur la pression','correction sur la température',0)
xlabel('débit par la méthode proposée avec correction sur la hauteur')
ylabel('débitmètres vortex')

```

```

function [debit1,debit2]=calcul_debit(To,Po)
%
% fonction calculant le debit de la tuyere
% en tenant compte de la compressibilite de la vapeur
% calcul_debit(To,Po)
% (To,Po) : conditions d'entree To en F, Po en psig
% d = 0.644 pouce
% debit1 : calcule a l'aide des tables (kg/hr)
% debit2 debit calcule par le facteur de compressibilite de AMini (kg/hr)
%
%
    po = (Po+14.5)*100/14.5;
    To = (To-32)/1.8;
    k = 1.2871;
    rap_theo = (2/(k+1))^(k/(k-1));
%
% valeurs totales en amont
%
    [vo,uo,ho,so,xo] = table_vapeur('Tp',To,po);
%
% recherche de p_critique
%
    pc_i = rap_theo*po;
    options = optimset('display','off');
    pc = fsolve(@col,pc_i,options,ho,so,vo);
    [Tc,vc,uc,hc,xc] = table_vapeur('ps',pc,so);
    c= vitesse_son(Tc,pc);
% Calcul du Cr
    d = 0.644*0.0254;
    D = d/0.209;
    nu = eau_prop('nug',Tc+273);
    Re = c*d/nu;
    if Re < 2.5e6
        a = 0.9887;
        b = 0;
        n = 0;
    else
        a = 1;
        b = 0.2165;
        n = 0.2;
    end
    Cd = a-b*Re^(-n);
    A = pi*d^2/4;
    debit1 = Cd*c*A/vc*3600;
    R = 461.526;
    Z = 0.961;
    Ci = sqrt((k*(2/(k+1))^(k/(k-1)))/Z);
    debit2 = Cd*Ci*A*(po*1000)/sqrt(R*(To+273.15))*3600;

```

```

function y = col(p,ho,so,vo)

```

```

    beta = 0.209;

```

```
[T,v,u,h,x] = table_vapeur('ps',p,so);  
a= vitesse_son(T,p);  
y = a^2/2000*(1-vo*beta^2/v)+h-ho;
```

```

function a = vitesse_son(Ti,p);
%
% fonction calculant les propriétés de la vapeur surchauffée connaissant T et p
% T est en Celsius et p en kiloPascals
% écrit par Louis Lamarche 10-04-2001
T = Ti+273.15;
R = 0.461526;
Tcr = 540; % temperature critique en K
pii = p/1000;
tau = Tcr/T;
load vap1.txt;
load vap2.txt;
Jo = vap1(:,2);
no = vap1(:,3);
l = vap2(:,2);
J = vap2(:,3);
n = vap2(:,4);
gamo = log(pii)+sum(no.*tau.^Jo);
gamr = sum(n.*pii.^l.*(tau-0.5).^J);
gam = gamo+gamr;
gamop = 1/pii;
gamopp = -1/pii^2;
gamot = sum(no.*Jo.*tau.^(Jo-1));
gamott = sum(no.*Jo.*(Jo-1).*tau.^(Jo-2));
gamopt = 0;
gamrp = sum(n.*l.*pii.^(l-1).*(tau-0.5).^J);
gamrpp = sum(n.*l.*(l-1).*pii.^(l-2).*(tau-0.5).^J);
gamrt = sum(n.*pii.^l.*J.*(tau-0.5).^(J-1));
gamrtt = sum(n.*pii.^l.*J.*(J-1).*(tau-0.5).^(J-2));
gamrpt = sum(n.*l.*pii.^(l-1).*J.*(tau-0.5).^(J-1));
gamp = gamop+gamrp;
gamt = gamot+gamrt;
gamtt = gamott+gamrtt;
v = R*T/p*pii*gamp;
u = R*T*(tau*gamt-pii*gamp);
s = R*(tau*gamt-gam);
h = R*T*tau*gamt;
num = 1+2*pii*gamrp+pii^2*gamrp^2;
den = 1-pii^2*gamrpp+(1+pii*gamrp-tau*pii*gamrpt)^2/(tau^2*gamtt);
a = sqrt(1000*R*T*num/den);

```

%Calcul de la quantité d'évaporation dans le réservoir

Tw = 50; %température eau (°C)

Ta = 30; %température air (°C)

phi = 0.6; %humidité relative

Me = 18; % kg/kmol

Ma = 28.97; % kg/kmol

patm = 101.330 % kPa

R = 8.314; % KJ/Kmol K

L = 0.9144;

A = L^2;

P = 4*L;

D = 4*A/P;

cd vapeur

psat = table_vapeur('Tx',Tw,1);

pvap = phi*table_vapeur('Tx',Ta,1);

pairs = patm-psat;

paira = patm-pvap;

Twk = Tw+273;

Tak = Ta+273;

Sc = 0.61;

rhows = (psat*Me)/(R*Twk);

rhoas = (pairs*Ma)/(R*Twk);

rhos = rhows+rhoas;

rhoa = (pvap*Me)/(R*Tak);

rhoaa = (paira*Ma)/(R*Tak);

rhoa = rhoa+rhoaa;

ms = rhows/rhos

ma = rhoa/rhoa

Tf = (Tak+Twk)/2;

rho = (rhos+rhoa)/2;

nu = air_prop('nu',Tf)

cd ..

Dab = nu/Sc;

Gr = abs(rhos-rhoa)/rho*9.8*D^3/nu^2

Gr2 = abs(Twk-Tak)/Tf*9.8*D^3/nu^2

Sh = 0.14*(Gr*Sc)^(1/3)

sig = rho*Dab*Sh/D

mp = rho*Dab*Sh/D*A*(ms-ma)

hm = Dab*Sh/D %coefficient d'évaporation (kg/m^2s)

mp2 = hm*A*(psat/Twk-pvap/Tak)*Me/R %évaporation (kg/s)

ANNEXE 3

Rapport de calibration de la balance

Client: Ecole de technologie Supérieure
 Adresse: Montréal

1 Description (type): planches Mécanique Électronique

Indicateur	Balance	Impression/Inscription
Marque: <u>Rice Lake</u>	<u>Active Scale</u>	/
Modèle: <u>9019 + 3556</u>	<u>G2EC4848-2500L</u>	
Série: <u>B04244</u>	<u>002069</u>	
Capacité: <u>2500 x 0.2</u>		

Unité utilisée pour la vérification lb kg g oz autre

2. Inspection visuelle :

	Vérifié bon	Non-vérifié	A réparer	Sans objet	Lecteur <input type="checkbox"/>	Lecteur <input type="checkbox"/>	Avant	Après
Cadres	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	A <u>200.0</u>	/
Indicateur	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	B <u>200.0</u>	/
Levier et suspension	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	C <u>200.0</u>	/
Cellule de charge et file	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	D <u>200.0</u>	/
Boue - graisse	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	2. Vérification (autres) à :	
Filtre	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<u>200</u>	
Regle "TAPE"	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Tolérance ± <u>0.2</u>	

3. Étalonnage : (Étendue de la balance utilisée: -) Lecteur Lecteur Tolérance ± 0.2

	Poids	Charge utilisée	Avant correction	Tolérance ±	Après correction
1	<u>60</u>	/	<u>60.0</u>	<u>0.06</u>	
2	<u>100</u>		<u>100.0</u>	<u>0.10</u>	
3	<u>140</u>		<u>140.0</u>	<u>0.14</u>	
4	<u>200</u>		<u>200.0</u>	<u>0.20</u>	
5					
6					
7					

Kil(s) de poids étalons utilisés pour l'étalonnage: 1

Notes : Les étalons utilisés sont retrapables aux étalons nationaux.
 Les méthodes d'étalonnage utilisées sont en accord avec les normes de Mesures Canada.
 La tolérance appliquée, pour les balances légales pour le commerce, est en accord avec Mesures Canada et la tolérance appliquée pour les balances non légales pour le commerce, est de ± 1%. Un tiret "-" dans les cases "après correction" signifie qu'aucune correction n'a été apportée.

4. Remarque :

Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>	Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Vérifier selon l'instruction BE 08-01	<input checked="" type="checkbox"/> Sceller l'indicateur + base
<input checked="" type="checkbox"/> Balance légale (avec sceau P.M.)	<input checked="" type="checkbox"/> Laisser les originaux du rapport
<input checked="" type="checkbox"/> Étiqueter non légale	<input checked="" type="checkbox"/> Client désire un rapport dactylographié
<input checked="" type="checkbox"/> Étiqueter - signer	<input checked="" type="checkbox"/> Condition atmosphérique normale lors de l'étalonnage

Résultat final : conforme non conforme

J-P. Lehu Technicien D. Chénier Technicien 11-12-01 Date d'étalonnage 30-04-01 Date due

ANNEXE 4

Publication

Cet article a été présenté à la X^{ème} conférence internationale "Air Conditioning, Protection & District Heating" à l'Université de Technologie de Wrocław, Pologne, du 27 au 30 juin 2002.

STEAM FLOW METER CALIBRATION BASED ON MEASUREMENT OF THE MASS OF CONDENSATE

Vincent Nicolas, Stanislaw Kajl, Louis Lamarche, Christian Masson
Ecole de Technologie supérieure, Département de Génie Mécanique

Abstract

Steam flow meters are usually calibrated using air or water as the working fluid. To improve the accuracy of steam flow rate measurement, a testing bench allowing to calibrate steam flow meters using steam as the working fluid has been developed. This testing bench is located in the Center for Thermal Technology (CTT) of École de Technologie Supérieure (ETS) in Montréal. The proposed calibration method is based on the measurement of the mass of condensate. The paper describes the method used to maintain the steady-state regime, and the results obtained for the calibration of flow meters. The proposed method does not need a critical flow nozzle, but one is installed to be able to compare the results obtained by the nozzle and by the measurement of weight of condensate. The results of this comparison are presented in this paper. The tested flow meter is a commercial vortex flow meter. The first results obtained during these tests are also presented in this paper.

1. Introduction

The steam flow meters are usually calibrated using air or water as the working fluid and consequently the accuracy of these flow meters is not sufficient in steam applications. The flow rates recorded in a building by two types of flow meters (vortex and differential) during a period when these flow meters should give the same results shows that the difference could reach 10% of the measured flow rate. To balance a steam network with such flow meters is an impossible task. The American National Standard ASME/ANSI MFC-6M-1987 "Measurement of Fluid Flow in Pipes Using Vortex Flow

Meters" [1] stipulate that accuracy for all flow meters is improved by in situ calibration if possible and the user may select this option. The calibration in situ, using the real working fluid, proposed by the standard mentioned above could improve the accuracy of the flow meters, but such calibration is difficult to realise. It is in this context that the CTT research group is developing a new calibration procedure of steam flow meters based on measurements of the mass of condensate. The main objective of the testing bench constructed for this project is to undertake flow meters calibration using steam as the working fluid instead of air or water which are normally used.

2. Description of the testing bench

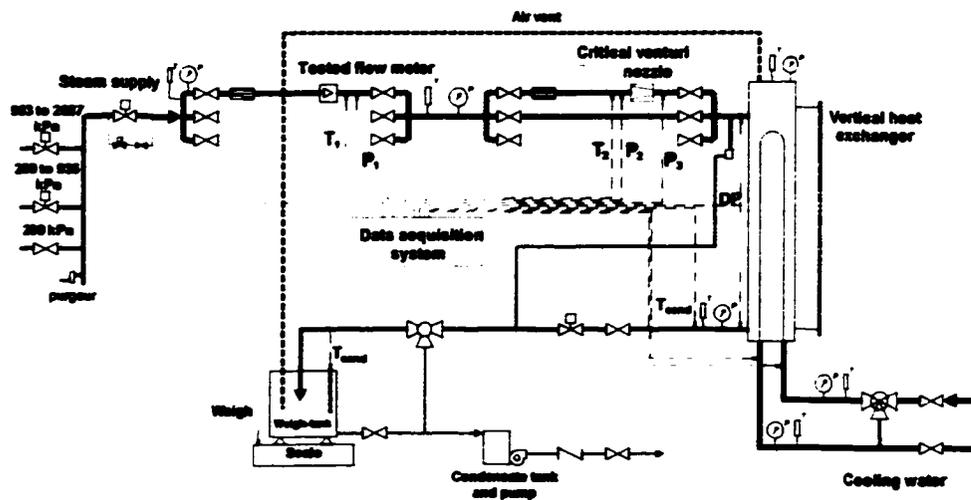


Figure 25. Schematic of steam flow meter calibration testing bench

The aim of this testing bench is to calibrate the flow meters using steam as the working fluid. The main components of the testing bench, as shown on Figure 1, are: the flow meter to calibrate, a vertical heat exchanger, a weigh-tank for the accumulation of condensate, a weighing device and a critical venturi flow nozzle. Even if the critical flow nozzle is not necessary to develop a new calibration procedure, it is installed in the appropriate section because it is considered as a reference flow meter in the standard ASME MFC-3M-1989 and ASME/ANSI MFC-7M-1987. The challenge of the

calibration procedure is to reach and maintain a steady-state regime which permits to calculate the average flow rate of steam by knowing the increase of the mass of condensate in the weigh-tank during an appropriate period of time. It is to be notice that the testing bench is designed to avoid the loss of condensate: all condensate coming from (i) the heat exchanger, (ii) the piping upstream of the heat exchanger and (iii) the air vent (if the steam is loosed this way) is accumulated in the weigh-tank.

3. Characterization of the testing bench

The first important part of the work done on this testing bench has been to characterize its behaviour. Indeed, it is really important to be able to know how to obtain the steady-state regime. It has been assumed in this study that:

- the pressure of steam upstream the pressure reduction valve, provided from district heating network, is constant;
- the flow rate of cooling water in the heat exchanger is constant because of the constant flow rate pump using in this water loop.

With these assumptions, the steady-state regime may be reached by acting on each control valve (condensate, steam pressure, water cooling loop) and choosing their appropriate opening.

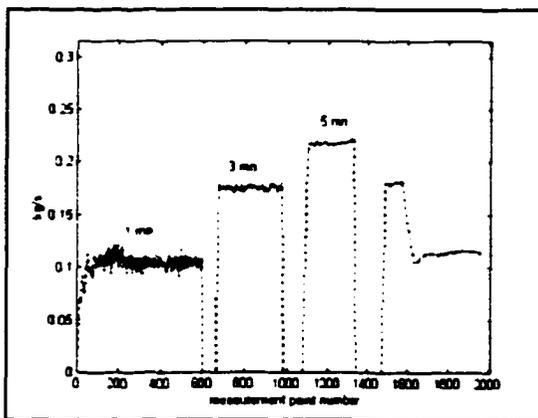


Figure 26. Flow rate obtained on the basis of one, three and five minute analysis

3.1. Measurement of the flow rate

As it was mentioned, when the steady-state regime is reached, the measurement of condensate mass in the weigh-tank allows to calculate the steam mass flow rate. The accumulated condensate is coming mainly from heat exchanger but a small fraction is evacuated (steam condensate in the piping)

by the steam trap installed upstream the heat exchanger (see Fig.1). To avoid the flashing of this condensate, it is mixed with the condensate exiting the heat exchanger. Depending on the steam operation pressure, this practice could make the instantaneous time derivative of accumulated mass of condensate variable. Consequently, an appropriate period of time must be chosen to increase the precision of flow rate calculation process. Figure 2 shows the steam flow rate obtained using one, three and five minutes periods to determine the flow rate by weighing the mass of condensate. After numerous tests, it has been determined that the five-minute period represents a good compromise between accuracy and testing time (costs and difficulties to maintain steady state regime) for the calculation of the flow rate, because the standard deviation of the data obtained is respectively 2.5 %, 1 % and 0.67 % for 1, 3 and 5 minutes period.

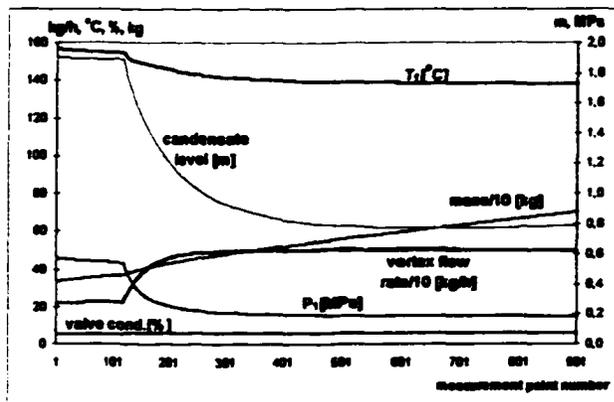


Figure 27. Variation of measurement parameters

3.2. Behavior of the test bench

As it was mentioned above, to reach the steady-state regime at appropriate flow rate level it is necessary to choose the right opening of the control valves. Figure 3 confirms this assumption and shows the intrinsic capacity of the testing bench to reach the steady-state regime. The first 118

measurements presented on this figure was recorded with the 5% opening of condensate control valve. At this moment the opening has changed to 6% resulting in: (i) increasing steam flow rate, (ii) decreasing steam pressure and temperature and (iii) decreasing level of condensate in heat exchanger. The steady state regime is reached again near the 600th measurement. Beyond this measurement point, for example, the steam pressure and temperature vary respectively only from 186.7 to 189.1 kPa and from 138.4 to 138.8 °C. It can be seen in this figure that the level of condensate was relatively constant. However, it is important to note that in general, it never does stabilize itself. Indeed,

when the steady-state regime is reached and all the parameters seem to be constant, the level of condensate in the heat exchanger still increase approximately at a rate of 2.5 cm/10 min. Some potential sources of this effect were identified and studied:

- *Location of the condensate exit in the weigh-tank.* The condensate exit was composed on a diffuser located at the bottom of the weigh-tank allowing the condensate to flow under the level of condensate already accumulated in the tank. This solution was efficient in avoiding condensate flashing. However, it could produce back pressure on the system and consequently increase the level of condensate in the heat exchanger. To examine this effect, the condensate exit has been modified so that it always runs above the level of accumulated condensate in the tank. No significant difference was recorded after this change in the testing bench.
- *Use of steam trap downstream of heat exchanger.* This steam trap is installed only for sake of security because the normal operation of the vertical heat exchanger and condensate control valve avoids steam flowing into the weigh-tank. To examine the effect of the steam trap operation on the stability of the condensate level, a by-pass has been installed. Again, no significant difference was recorded after this change in the testing bench.
- *Decrease of the steam pressure in the flow meter section.* Even if the steam pressure in this section seems constant, a study was undertaken to determine the relation between the decrease of this pressure and the increase of condensate level in the heat exchanger. It was assumed in this study than the total pressure remains constant. The variation of the steam pressure corresponding to the increase of condensate level obtained in this way is very small. Depending on the steam operation pressure, it could be within the accuracy of the pressure transmitter. This clearly indicates the need for very accurate pressure control. However, it does not explain the systematic recurrent increase of condensate level.

With the results of these different tests, the decision taken finally is to correct the measured mass of condensate taking into account the recorded variation of the level of condensate. Knowing the heat exchanger design, the accumulated mass of condensate in the heat exchanger is added to the total mass of condensate in the tank. A corrected mass flow rate is obtained, which takes into account the increase level of condensate in the heat exchanger.

4. Measurements obtained with the critical flow nozzle

With the aim of validating the values obtained with the proposed method, a critical flow nozzle is install on the steam line. This can give a new value for the mass flow rate. The calculation done to obtain the measures with the critical flow nozzle is conform to the norm ASME/ANSI MFC-7M-1987. It is based on the assumption that the flow is adiabatic and isentropic. In the case where the fluid is an ideal gas, the flow rate is given by :

$$\dot{m} = \frac{AC P_2}{\sqrt{RT_2}} \quad \text{with} \quad C_i = \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (1) \text{ and } (2)$$

However, steam does not behave as an ideal gas, and we have to consider it for the calculation of the flow rate. Amini et Owen [3] have proposed a correction based on the compressibility factor. This correction is classical even if they deal with the case where the steam is around the saturation, where particular problems due to the possibility of condensation of the steam at the expansion of the nozzle can appear. Essentially they propose a correction of the type

$$\dot{m} = C \frac{AC_R P_2}{\sqrt{RT_2}} \quad \text{where} \quad C_R = \sqrt{\frac{k}{Z} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (3) \text{ and } (4)$$

In this expression, the compressibility factor Z and the ratio of specific heat k vary with the thermodynamic state.

In this work, the energy balance as proposed by Sullivan [4] has been used. We need to evaluate the properties at the throat of the nozzle (T^* , P^* , h^* , s^* , c^*) from the properties upstream (T_2 , P_2 , h_2 , s_2 , V_2). The calculation start by assuming a critical pressure P^* , for

example the one given by the ideal gas relation. From this assumed critical pressure and the entropy ($s^{\circ} = s_2$), it is possible to deduce the enthalpy at the throat h° and the speed of sound c° . This last one is given by the Maxwell equation as by the verification of the energy balance shown here

$$c^{\circ 2} = - \left(\frac{\partial h}{\partial P} \right) \left(\frac{\partial^2 h}{\partial P^2} \right)^{-1} \quad \frac{c^{\circ 2}}{2} + h = h_2 \quad (5) \text{ and } (6)$$

This last equation has been obtained by making the assumption of an adiabatic flow and by neglecting the kinetic energy difference upstream of the nozzle. If the energy balance is satisfied, the calculation is over, otherwise we repeat the calculations with a new pressure at the throat. Once the pressure at the throat known, the other thermodynamic properties can be determined. The flow rate is then given by

$$\dot{m} = C \rho c^{\circ} A^{\circ} \quad (7)$$

where A° is the section at the throat. The coefficient of flow rate C depends of the geometry of the type of the section of the nozzle and of the number of Reynolds of the flow. Its expression is shown in the norm ASME/ANSI MFC-7M-1987.

The figure 4 and 5 show the five flow rates: (i) flow rate obtained taking into account only the mass of condensate accumulated in the weighing tank ("mass"), (ii) previous

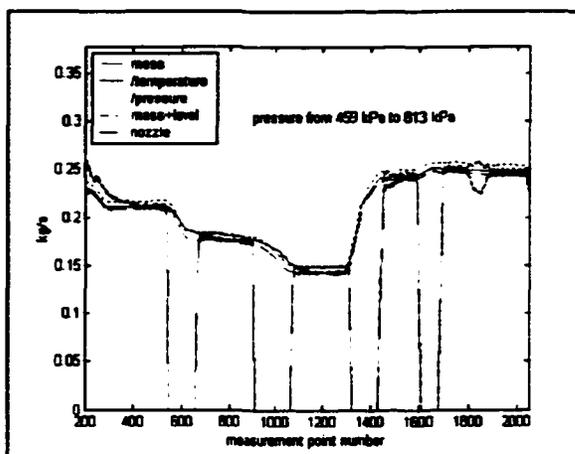


Figure 5. Variation of five flow rates obtained during one day of test

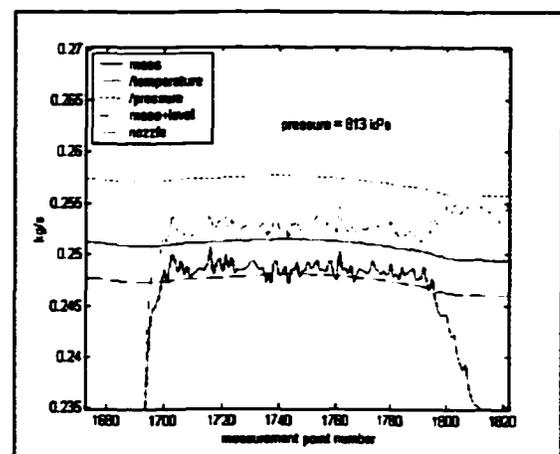


Figure 4. Variation of five flow rates obtained during one measure period

flow rate (“mass”) corrected by taking into account the increase of the condensate level in the heat exchanger (“mass + level”), (iii) flow rate given by critical nozzle (“nozzle”) and two vortex flow rates (“temperature” and “pressure”) explained in the Section 5. The difference between flow rates obtained by our method and critical nozzle vary from 0.5 % to 2.3 %.

5. Comparison with a vortex flow meter

In this section the comparison between the reading of a commercial vortex steam flow meter and the flow rates obtained by the proposed method is presented. The principle of such flow meter is to cause vortex shedding from some obstruction in the pipe and relate the shedding frequency to the volumetric flow rate of the fluid in the pipe.

It is to be notice that a vertical pipe (diameter and high respectively of 150 mm and 4 m) situated upstream of the measuring section and equipped of a steam trap is considered as the condensate separator and insures high steam quality at the measuring section if the coming steam from network is saturated. The estimated value of steam quality in this section is higher than 99%. According to Amini and Owen [3], the wet steam correction factor, which increases with increasing water content and is apparently independent of flow rate and pressure, can be reasonably represented by $x^{-1/2}$, where x is a steam quality. It means, that the wet steam correction factor, with the steam quality estimated in our case, could be considered very close to one. As the steam flow rate given by vortex meter is based on the steam velocity in the measured section, it is necessary to evaluate the steam specific volume in this section to determine the vortex mass flow rate of steam. It is to be notice, that it is quite impossible to obtain in the industrial conditions the measured pressure and temperature of saturated steam exactly corresponding to the values of the tabulated saturated state. Consequently, the evaluated steam specific volume will depend on which property (pressure or temperature) has been used to consult the thermodynamic table. Therefore, two steam mass flow rates obtained using the specific volume determined for the saturated steam at measured temperature and at

measured pressure are systematically presented here. These flow rates are mentioned in this paper as corrected on “pressure” or on “temperature”.

Figure 6 shows the details for one measurement period. It shows the four flow rates: (i) flow rate “mass”, (ii) flow rate “mass + level”, (iii) vortex flow rate corrected on steam

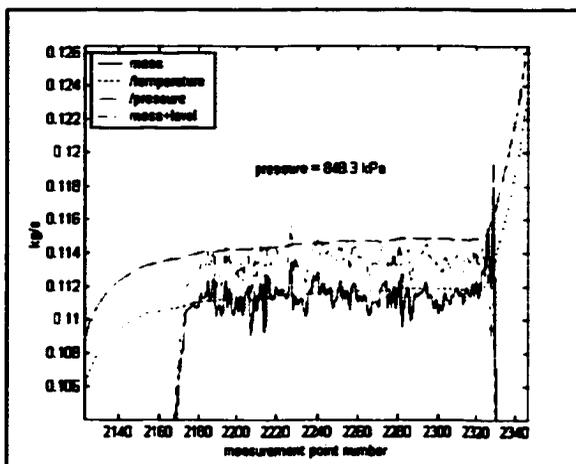


Figure 6. Variation of four flow rates obtained during one measurement period

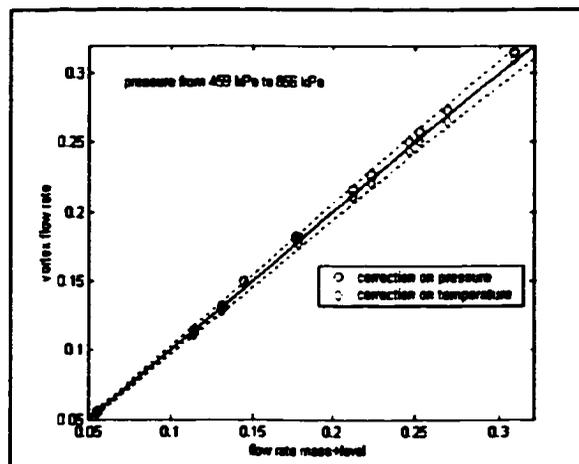


Figure 7 Calibration of vortex flow meter using saturated steam

temperature (“temperature”) (iii) vortex flow rate corrected on steam pressure (“pressure”). One can better evaluate the impact of condensate level correction (flow rate “mass” and “mass + level”) and the difference between the vortex flow rates corrected on temperature and on pressure. One can also see that the vortex flow rate corrected on temperature is less than the flow rate given by the proposed calibration method (“mass + level”) and the vortex flow rate corrected on pressure is higher than this one. Figure 7 shows the comparison of the results obtained by the proposed calibration method (“mass + level”), considered in this figure as “reference”, and the flow rates given by tested vortex flow meter. The difference between these values is within $\pm 3\%$. The average value of this difference is $+1.8\%$ and -2.04% for the flow rate corrected on “pressure” and on “temperature” respectively.

6. Conclusion

Two flow meters, critical flow nozzle and vortex, have been tested with saturated steam against a calibration method based on measurements of the mass of condensate. The difference between critical flow nozzle and the proposed method vary from 0.5 % to 2.3%. Considering the critical flow nozzle as the reference flow meter, these results demonstrate the accuracy of proposed calibration method. The difference for a vortex flow meter is within 3% and the average value is +1.8 % and -2.04 % depending the type of correction used.

The tests presented in this paper have permitted to better understand the behaviour of the proposed testing bench. To improve the proposed calibration procedure, the recorded increase of condensate level in heat exchanger should be avoided during the test. However, based on the comparison with the critical flow nozzle, the proposed correction approach consisting in adding the accumulated mass to the weighed mass of condensate seems very accurate.

References

- [1] American National Standard, Measurement of Fluid Flow in Pipes Using Vortex Flow Meters, ASME / ANSI MFC-6M-1987
- [2] American National Standard, Measurement of Gas Flow by Means of Critical Flow Venturi Nozzles, ASME / ANSI MFC-7M-1987
- [3] A. Amini, I. Owen, The use of critical flow Venturi nozzles with saturated wet steam. *Flow Meas. Instrum.* 1995, Vol. 6, No. 1, pp.41-47.
- [4] Sullivan, Historical Review of Real-Fluid Isentropic Flow modes, *Journal of Fluid Engineering* 103 , 1981, pp. 258-267.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Carrie Hutchinson, Calibration facility measures up, *PACE*, mars 1993
- [2] Bj Richardson, Colorado Facility Advances Natural Gas Measurement, *Pipeline & Gas Journal*, Juillet 1999
- [3] Thomas M. Kegel, Uncertainty analysis of a compressible flow meter calibration process, *Developments in Electrorheological Flows and Measurement Uncertainty*, ASME 1994
- [4] American National Standard, *Measurement of Fluid Flow in Pipes Using Vortex Flow Meters*, ASME/ANSI MFC-6M-1987
- [5] I. B. Hussein, I. Owen, Calibration of flowmeters in superheated and wet steam, *Flow Meas. Instrum.* 1991, Vol. 2, No. 10, pp.209-215
- [6] I. Owen, I. B. Hussein, Wet steam flowmeter correction factors, Technical Note, *Flow Meas. Instrum.* 1991, Vol. 2, No. 4, pp.139-140.
- [7] I. Owen, I. B. Hussein, A. M. Amini, The impact of water slugs on wet steam flowmeters, *Flow Meas. Instrum.* 1991, Vol. 2, No. 4, pp.98-104.
- [8] Marshall, N., The measurement of dryness fraction of steam. *The British Coal Utilisation Research Association. Monthly Bulletin*, July 1953.
- [9] I. B. Hussein, I. Owen, A. M. Amini, Energy metering system for high quality saturated steam, *Flow Meas. Instrum.* 1992, Vol. 3, No. 4, pp.235-240.
- [10] A. Bsata, *Instrumentation et automation dans le contrôle des procédés*, éditions Le Griffon d'argile, 2^{ème} édition, 1994.
- [11] Nicholas P. Cheremisinoff, Applied fluid flow measurement, Fundamentals and technology, *Engineering measurements and instrumentation*, v.1 ,Marcel Deker, 1979
- [12] Richard W. Miller, *Flow measurement engineering handbook*, Second Edition, McGraw-Hill publishing company, 1989.
- [13] American National Standard, *Measurement of Gas Flow by Means of Critical Flow Venturi Nozzles*, ASME / ANSI MFC-7M – 1987

- [14] A. Amini, I. Owen, The use of critical flow venturi nozzles with saturated wet steam. *Flow Meas. Instrum.* 1995, Vol. 6, No. 1, pp.41-47.
- [15] Sullivan, Historical Review of Real-Fluid Isentropic Flow modes, *Journal of Fluid Engineering* 103 , 1981, pp. 258-267.
- [16] *Test Uncertainty, Instrument and Apparatus*, ASME PTC 19.1-1998
- [17] *Measurement of fluid flow – Evaluation of uncertainties*, ISO/TR 5168 : 1998
- [18] *Assessment of uncertainty in the calibration and use of flow measurement devices*, ISO 7066-1 et ISO 7066-2
- [19] Recknagel, Sprengel, Hönnmann, *Le Recknagel, Manuel Pratique de Génie Climatique*, 2^{ème} édition, PYC édition 1986
- [20] A. F. Mills, *Basic heat and mass transfer*, second edition, Prentice Hall, pages 796-797
- [21] L. Lamarche, *Systèmes de mesures, SYS862, Notes de cours*, Département de génie mécanique, Ecole de Technologie Supérieure de Montréal, 1999