



**HAL**  
open science

## De Nouveaux Capteurs de Mesure de Niveau et de Volume pour les Cuves de Pétroliers

Steeve Rudz, Khaled Chetehouna, Christophe Rosenberger

► **To cite this version:**

Steeve Rudz, Khaled Chetehouna, Christophe Rosenberger. De Nouveaux Capteurs de Mesure de Niveau et de Volume pour les Cuves de Pétroliers. *Revue des Technologies avancées*, 2011, pp.20-27. hal-00993478

**HAL Id: hal-00993478**

**<https://hal.science/hal-00993478>**

Submitted on 20 May 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# De Nouveaux Capteurs de Mesure de Niveau et de Volume pour les Cuves de Pétroliers

S. RUDZ <sup>1</sup>, K. CHETEHOUNA <sup>2</sup>, C. ROSENBERGER <sup>3</sup>

<sup>1</sup> LEMTA (UMR 7563 CNRS/INPL/UHP), 2 avenue de la Forêt de Haye, 54504 Vandœuvre-lès-Nancy CEDEX, France

<sup>2</sup> ENSI de Bourges, Institut PRISME UPRES EA 4229, 88 boulevard Lahitolle, 18020 Bourges CEDEX, France

<sup>3</sup> Laboratoire GREYC, UMR-CNR 6072, ENSICAEN, 6 boulevard Maréchal Juin 14050 Caen CEDEX, France

## RÉSUMÉ

*Cet article présente deux types de capteurs bas-coûts pour mesurer le niveau et le volume d'un liquide dans des cuves de pétroliers. L'un est basé sur la vision et est nommé capteur optique. Il permet par la mesure de coordonnées de trois points sur la surface d'un liquide de déterminer sa hauteur. L'autre capteur quant à lui, est basé sur le principe du résonateur de Helmholtz et donne une mesure directe du volume de liquide. Nous illustrons le principe de ces deux capteurs et nous donnons quelques résultats expérimentaux de mesure.*

## ABSTRACT

*This paper presents two types of low-cost sensors for the measurement of the level and the volume in tankers tanks. The first one is based on computer vision (or image processing) and is named optical sensor. It measures, using three points coordinates on the top of a liquid, its height. The second one is dedicated to the volume measurement of a liquid and is based on the Helmholtz's resonator principle. We illustrate the principle of these two sensors and we give some experimental results of measurements.*

## MOTS-CLÉS

cuves de pétroliers, technique optique, mesure de niveau, technique acoustique, mesure de volume.

## KEYWORDS

*tankers tanks, computer vision, level measurement, acoustic technique, volume measurement.*

## 1. Introduction

De nombreux capteurs dédiés à la mesure du niveau de liquide sont utilisés dans différents domaines industriels. Pour une application telle que la surveillance de la hauteur du liquide dans les cuves de pétrolier, certaines exigences sont à respecter : absence de partie mobile, absence de contact avec le produit, une précision de l'or-

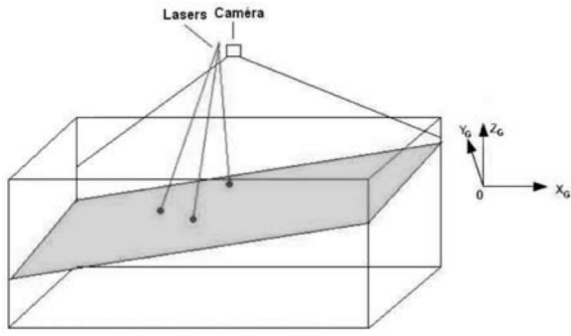
dre du millimètre, un faible coût et la conformité à la réglementation ATEX. Dans des applications similaires, la majorité des indicateurs de niveau sont de types acoustiques. Ces capteurs sont basés sur les phénomènes de réflexion du son dans la zone d'ultrasons [10]. Un des capteurs proposés dans ce travail se base aussi sur les phénomènes sonores mais dans la zone audible. Plusieurs travaux de recherche ont été menés sur ce sujet [8,11] et Isonaga et al., (2004). L'originalité de ce capteur acoustique est de mesurer des volumes de liquide dans les cuves sans contact avec celui-ci. Le principe de base de cette sonde repose sur le résonateur de Helmholtz [4,15]. Une étude similaire a été entreprise [2,3] pour la mesure du volume des cavités souterraines. L'autre capteur présenté ici, nommé capteur optique, est une alternative aux capteurs acoustiques de niveaux et est basé sur la vision assistée par ordinateur. Cette approche bas-coûts est nouvelle et présente un intérêt considérable dans le domaine de la mesure des niveaux dans les cuves de pétrolier.

L'objectif de cet article est de démontrer la faisabilité des deux techniques bas-coûts proposées. La première partie de ce travail est consacrée au capteur optique: présentation, principe de fonctionnement, résultats et analyses. La deuxième partie porte quant à elle sur le capteur acoustique, et est traitée de la même manière que le capteur précédent. La conclusion de ces travaux ainsi que les différentes perspectives d'améliorations sont données dans la dernière partie.

## 2. Mesure de niveau par la méthode optique

### 2.1. Présentation

Pour mesurer le niveau dans une cuve de pétrolier, nous avons décidé de projeter trois faisceaux laser sur la surface du liquide afin d'en déduire l'équation du plan dans le repère de la caméra, cf. fig1. Cette technique nous permettra aussi d'avoir des informations sur le tangage et le roulis du bateau.



**Fig.1** Schéma du principe de fonctionnement de la méthode optique

La théorie du modèle sténopé [1,17] permet de définir les coordonnées d'un point dans le plan image si l'on connaît ses coordonnées homogènes dans le repère global  $(O, X_G, Y_G, Z_G)$ , cf. fig 2. Ce modèle conduit à la relation suivante :

$$\begin{pmatrix} su \\ sv \\ s \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

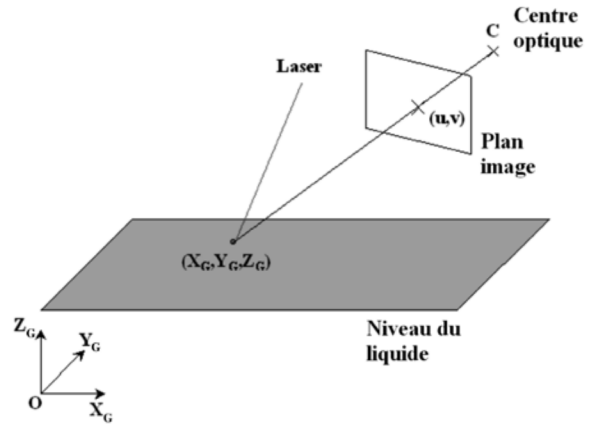
$$\text{avec : } A = \begin{pmatrix} F_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & F_y & v_0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & t_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\text{Où : } \begin{pmatrix} F_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & F_y & v_0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

est la matrice des paramètres intrinsèques de la caméra avec  $F_x$  et  $F_y$  les focales selon les axes  $x$  et  $y$  de la caméra et  $u_0$  et  $v_0$  les coordonnées de la projection du centre optique la caméra sur le plan image.

$$\begin{pmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & t_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

la matrice des paramètres extrinsèques permettant de passer du repère global au repère lié à la caméra avec  $\{r_1, \dots, r_9\}$  les rotations associées et  $\{t_x, t_y, t_z\}$  les translations associées.

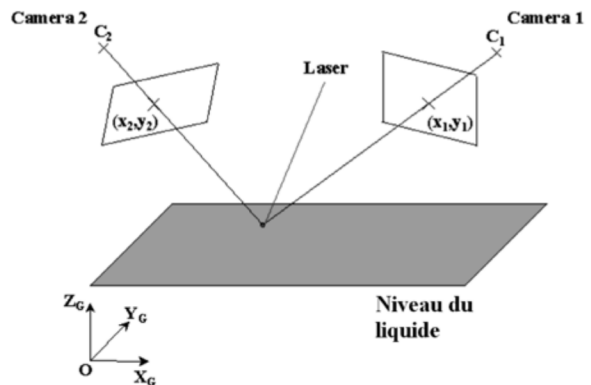


**Fig. 2** Positionnement du plan image dans le repère global.

Cependant, les coordonnées du point laser ne sont connues que dans le plan image et la matrice  $A$  des paramètres de la caméra n'est pas inversible. L'application directe de ce modèle n'est pas envisageable et l'utilisation d'une deuxième caméra semble être une solution alternative (méthode de triangulation).

## 2.2. Application de la triangulation

Le principe est basé sur la stéréovision [5]. Elle consiste à utiliser une deuxième caméra (caméra 2) qui va nous permettre, à l'aide d'une triangulation [6,13] de déterminer les coordonnées d'un point dans le repère de la caméra principale (caméra 1), cf. fig 3.



**Fig. 3** Principe de la triangulation.

En connaissant les coordonnées  $(x_1, y_1)$  du point laser dans le plan image de la caméra 1, les coordonnées  $(x_2, y_2)$  du point laser dans le plan image de la caméra 2, les paramètres intrinsèques de chaque caméra et les paramètres extrinsèques de la caméra 1 par rapport à la caméra 2, nous pouvons déterminer les coordonnées du point laser  $(X, Y, Z)$  dans le repère de la caméra 1.

Cependant, le capteur final ne doit comporter qu'une seule caméra. Une calibration s'avère donc nécessaire avant toute utilisation de ce capteur pour déterminer l'équation des droites lasers. Les coordonnées des trois points laser sont alors obtenues par l'intersection de ces droites et des différentes droites optiques (qui passent par chaque point image, chaque point laser et le centre optique de la caméra). Dans un premier temps, les coordonnées de plusieurs points d'une droite laser sont obtenues par triangulation décrite précédemment dans le repère de la caméra 1. Ensuite l'équation de la droite qui passe au mieux par ces points est calculée par moindres carrés à l'aide d'un algorithme d'optimisation génétique [8, 16]. Cette droite est déterminée par l'intersection de deux plans  $(\pi_1)$  et  $(\pi_2)$  d'équations :

$$(\pi_1) : Z = p_1 X + p_2 Y + p_3 \quad (2)$$

$$(\pi_2) : Z = p_4 X + p_5 Y + p_6 \quad (3)$$

La fonction à minimiser s'écrit sous la forme suivante :

$$Obj_1(p) = \sum_{j=1}^N \left[ (Z_j - p_1 X_j - p_2 Y_j - p_3)^2 + (Z_j - p_4 X_j - p_5 Y_j - p_6)^2 \right] \quad (4)$$

Où  $N$  est le nombre de points laser choisis et  $p = (p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6)$  est le vecteur de paramètres à déterminer. A partir des équations (2) et (3) nous pouvons écrire l'équation paramétrique de cette droite laser sous la forme :

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} 1 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

avec

$$a_1 = \frac{p_1 - p_4}{p_5 - p_2}, \quad a_2 = p_1 + p_2 \frac{p_1 - p_4}{p_5 - p_2},$$

$$\text{Dans } b_1 = \frac{p_3 - p_6}{p_5 - p_2}, \quad b_2 = p_3 + p_2 \frac{p_3 - p_6}{p_5 - p_2}.$$

des trois points lasers (situés sur la surface du liquide) dans le repère de la caméra peuvent être déterminées par l'intersection de la droite (5) et les différentes droites optiques données par :

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \tilde{\lambda} \begin{pmatrix} C \\ D \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Les paramètres  $C$  et  $D$  sont obtenus à partir des coordonnées en pixel du point image.

Chaque point laser est déterminé par un couple

de paramètres  $(\lambda, \tilde{\lambda})$  en égalisant les deux

équations (5) et (6). En pratique, nous avons considéré les points d'intersection comme étant les centres des segments les plus courts reliant les deux droites laser et optique. Pour cela, une nouvelle fonctionnelle est considérée :

$$Obj_1(\lambda, \tilde{\lambda}) = \left( \lambda - \tilde{\lambda} C \right)^2 + \left( a_1 \lambda + b_1 + \tilde{\lambda} D \right)^2 + \left( a_2 \lambda + b_2 - \tilde{\lambda} \right)^2 \quad (7)$$

L'algorithme de minimisation est basé sur la méthode du simplex [12, 14]. Les coordonnées des points lasers sont alors données par la relation :

$$\begin{cases} X = \frac{1}{2} \left( \lambda + \tilde{\lambda} C \right) \\ Y = \frac{1}{2} \left( a_1 \lambda + b_1 + \tilde{\lambda} D \right) \\ Z = \frac{1}{2} \left( a_2 \lambda + b_2 + \tilde{\lambda} \right) \end{cases} \quad (8)$$

### 2.3. Expériences et résultats

Les principales étapes du protocole expérimental sont les suivantes. Tout d'abord le système constitué de deux caméras et d'un laser a été fixé. Ensuite les deux caméras ont été calibrées pour déterminer leurs paramètres intrinsèques et extrinsèques. Après un même point laser a été pris en photo par les deux caméras et ce pour vingt points différents, cf. fig 4. Une fois les images acquises, les coordonnées de ces points sont obtenues par triangulation dans le repère de la caméra 1.

L'équation de la droite laser est déterminée par la procédure décrite dans le paragraphe précédent et est donnée par l'équation (5). Les tableaux 1 et 2 présentent à titre indicatif les résultats obtenus pour quelques points lors de cette phase de calibration.

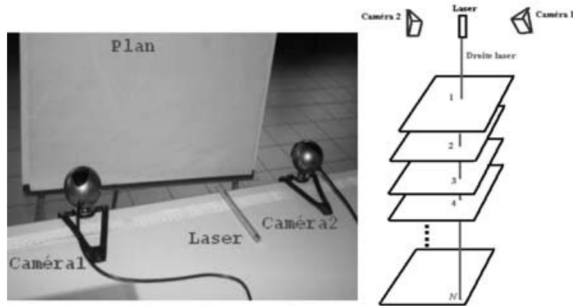


Figure 4. Schéma du dispositif expérimental.

|          | Plan image caméra 1 (xi,yi) (en pixel) | Plan image caméra 2 (xi,yi) (en pixel) | Repère caméra 1 par stéréo-triangulation (X,Y,Z) (en mm) |
|----------|--|--|--|
| Point 1  | 326,93<br>599,67                       | 309,92<br>274,78                       | 134,0<br>50,5<br>358,0                                   |
| Point 5  | 266,36<br>386,14                       | 263,09<br>439,06                       | 35,1<br>30,9<br>609,0                                    |
| Point 10 | 242,80<br>302,90                       | 245,91<br>500,91                       | -56,0<br>13,2<br>840,8                                   |
| Point 15 | 231,00<br>263,50                       | 237,75<br>529,62                       | -129,0<br>-1,6<br>1026,3                                 |
| Point 20 | 219,80<br>223,60                       | 229,58<br>558,08                       | -245,1<br>-24,5<br>1320,5                                |

Tableau 1. Coordonnées dans les plans image et dans le repère de la caméra 1 obtenues par triangulation – Phase de calibration.

| Paramètres des plans ( $\pi_1$ ) et ( $\pi_2$ )          |       |       |        |       |       |       |
|--|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
|  | $P_1$ | $P_2$ | $P_3$  | $P_4$ | $P_5$ | $P_6$ |
| Valeurs  | -16,5 | 70,6  | -998,2 | -4,9  | 12,3  | 400,5 |
| Paramètres de l'équation paramétrique d'une droite laser |       |       |        |       |       |       |
|  | a1    | a2    | b1     | b2    |       |       |
| Valeurs  | 0,2   | -2,5  | 24,0   | 698,3 |       |       |

Tableau 2. Paramètres des plans et de l'équation paramétrique d'une droite laser – Phase de calibration.

Les différents points de la droite laser peuvent simuler les différents niveaux du liquide. Une validation de la technique proposée semble donc possible. Pour cela, nous avons déterminé toutes les droites optiques données par la relation (6) et les différentes coordonnées obtenues par les relations (7), (8). Les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau 3 et sur la fig 5.

|          | Paramètres (C, D) des droites optiques | Coordonnées des points laser dans le repère caméra 1 par intersection de La droite laser et des droites optiques (X,Y,Z) (en mm) | Erreur relative commise<br>$\left( \frac{X_{stéréo} - X_{opt}}{X_{stéréo}}, \frac{Y_{stéréo} - Y_{opt}}{Y_{stéréo}}, \frac{Z_{stéréo} - Z_{opt}}{Z_{stéréo}} \right)$<br>(en %) |
|----------|--|--|---|
| Point 1  | 0,37<br>0,14                           | 134,0<br>50,4<br>358,2   | 0,02<br>0,14<br>0,04  |
| Point 5  | 0,06<br>0,05                           | 35,1<br>31,0<br>609,2  | 0,04<br>0,14<br>0,05  |
| Point 10 | -0,07<br>0,02                          | -55,9<br>13,1<br>840,2   | 0,14<br>0,52<br>0,07  |
| Point 15 | -0,13<br>-0,00                         | -128,9<br>-1,7<br>1025,7   | 0,04<br>3,50<br>0,06  |
| Point 20 | -0,19<br>-0,02                         | -245,1<br>-24,5<br>1320,4  | 0,01<br>0,08<br>0,01  |

Tableau 3. Coordonnées dans le repère de la caméra 1 obtenues par intersection de la droite laser et des droites optiques – Validation pour la phase de mesure.

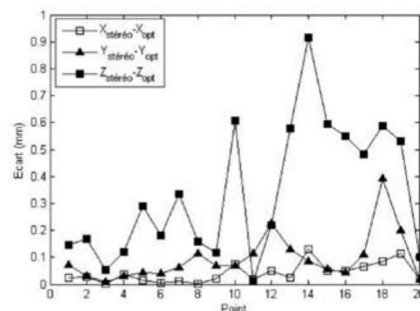


Fig 5. Ecart entre les coordonnées déterminées par triangulation et celles obtenues par intersection de la droite laser et des droites optiques.

L'analyse des résultats obtenus permet de constater que les écarts de mesure de niveau entre les valeurs obtenues dans la phase calibration et celles obtenues par les intersections d'une droite laser et les droites optiques sont inférieurs à 1 mm. Ce résultat montre l'intérêt de la technique proposée par rapport à notre cahier des charges.

La mesure de niveau (ou la hauteur  $H$ ) du liquide dans la cuve se déduit de l'équation du plan formé par les trois points lasers dans le repère de la caméra principale  $(X,Y,Z)$ . Soient  $(X_1, Y_1, Z_1)$  les coordonnées du point laser n°1,  $(X_2, Y_2, Z_2)$  les coordonnées du point laser n°2 et  $(X_3, Y_3, Z_3)$  les coordonnées du point laser n°3 ; l'équation du plan associée à ces points peut être donnée par la relation :

$$\alpha X + \beta Y + \gamma Z + \delta = 0 \quad (9)$$

où :

$$\begin{cases} \alpha = (Z_3 - Z_1)(Y_2 - Y_1) - (Y_3 - Y_1)(Z_2 - Z_1) \\ \beta = (X_3 - X_1)(Z_2 - Z_1) - (Z_3 - Z_1)(X_2 - X_1) \\ \gamma = (Y_3 - Y_1)(X_2 - X_1) - (X_3 - X_1)(Y_2 - Y_1) \\ \delta = -\alpha X_1 - \beta Y_1 - \gamma Z_1 \end{cases} \quad (10)$$

On cherche à mesurer la hauteur  $H$  du liquide au centre de la cuve dont les coordonnées  $(X_G^c, Y_G^c)$  dans le plan horizontal sont connues. Cette hauteur  $H$  correspond à la coordonnée  $Z_G^c$  et se détermine à partir du modèle sténopé :

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & t_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_G^c \\ Y_G^c \\ H \\ 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

ou encore :

$$\begin{cases} X = r_1 X_G^c + r_2 Y_G^c + r_3 H + t_x \\ Y = r_4 X_G^c + r_5 Y_G^c + r_6 H + t_y \\ Z = r_7 X_G^c + r_8 Y_G^c + r_9 H + t_z \end{cases} \quad (12)$$

En insérant (12) dans (9), la hauteur du liquide peut être donnée par la relation suivante :

$$H = -\frac{\delta + (\alpha r_1 + \beta r_4 + \gamma r_7) X_G^c + (\alpha r_2 + \beta r_5 + \gamma r_8) Y_G^c + \alpha t_x + \beta t_y + \gamma t_z}{\alpha r_3 + \beta r_6 + \gamma r_9} \quad (13)$$

avec  $(X_G^c, Y_G^c)$  les coordonnées du centre de la cuve dans le plan horizontal ; elles sont mesurées avant le remplissage de la cuve. A partir de cette expression, le calcul de l'erreur relative de niveau du liquide conduit à la relation suivante :

$$\frac{\Delta H}{H} (\%) = \frac{100}{H} \times \sum_{i=1}^3 \left( \left| \frac{\partial H}{\partial X_i} \right| \Delta X_i + \left| \frac{\partial H}{\partial Y_i} \right| \Delta Y_i + \left| \frac{\partial H}{\partial Z_i} \right| \Delta Z_i \right) \quad (14)$$

Dans la formule (14), nous avons considéré que les paramètres extrinsèques de la caméra et les coordonnées  $(X_G^c, Y_G^c)$  sont parfaitement connus.

L'application de la relation (13) conduit à la détermination du niveau de liquide dans une cuve.

### 3. Mesure de niveaux par méthode acoustique

Cette méthode est différente de la précédente car elle permet de mesurer un volume au lieu de la hauteur d'un liquide. En effet, par la mesure du volume de gaz présent dans la cuve, nous pouvons calculer celui du liquide en connaissant le volume de la cuve vide.

#### 3.1. Présentation

Le principe de ce capteur acoustique repose sur la théorie de Helmholtz [14,15]. En effet, il existe une relation entre la fréquence de résonance du gaz et son volume, s'il se trouve dans un endroit clos. C'est une expérience très appréciée des jeunes enfants (et des moins jeunes) complètement illustrée lorsque l'on souffle sur le goulot d'une bouteille et que l'on entend un seul et unique son: en fait, le système se comporte comme un filtre passe-bande, de bande très étroite.

Le résonateur de Helmholtz se compose d'une cavité de volume  $V$  reliée à l'atmosphère par un col étroit de section  $s$  et de longueur  $L_{réelle}$ , cf. fig 6.

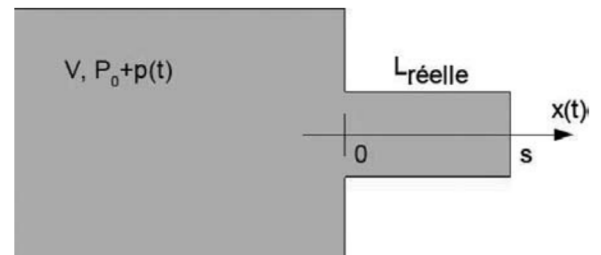


Fig 6. Schéma du résonateur de Helmholtz.



De nombreuses expériences ont montré que la longueur  $L_{réelle}$  du col doit être compensée par l'ajout d'une longueur fictive  $l_0$  constante égale

à  $\frac{3d}{8}$  avec  $d$  le diamètre du col (Bernardot et al.,

2002). Par la suite, nous noterons  $l = L_{réelle} + l_0$ . La relation liant le volume  $V$  à la fréquence de résonance  $f_0$  peut s'écrire sous la forme :

$$V = \frac{s}{l} \left( \frac{c}{2\pi f_0} \right)^2 \quad (15)$$

Le volume du liquide  $V_{liq}$  se calcule donc par la relation suivante :

$$V_{liq} = V_{cuve} - \frac{s}{l} \left( \frac{c}{2\pi f_0} \right)^2 \quad (16)$$

Où  $V_{cuve}$  est le volume de la cuve vide parfaitement connu.

### 3.2. Calculs d'erreurs

Dans cette étude, l'objectif principal est d'obtenir une précision maximale. On cherche ici à savoir par quels paramètres sera minimisée l'erreur relative associée à la mesure du volume  $V_{liq}$ .

On sait que  $V_{liq}$  dépend de 4 paramètres : la célérité  $c$  des ondes acoustiques, la section  $s$  du col, sa longueur  $l$  et la fréquence de résonance  $f_0$ . En appliquant l'opérateur différentiel à l'équation (16) on obtient :

$$dV_{liq} = \frac{\partial V_{liq}}{\partial f_0} df_0 + \frac{\partial V_{liq}}{\partial c} dc + \frac{\partial V_{liq}}{\partial l} dl + \frac{\partial V_{liq}}{\partial s} ds \quad (17)$$

Après quelques simplifications, on peut écrire :

$$\frac{\Delta V_{liq}}{V_{liq}} = 2 \frac{\Delta f}{f} + 2 \frac{\Delta c}{c} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta s}{s} \quad (18)$$

Cependant, les capteurs de niveaux sont surtout utilisés lors des phases de chargements et de déchargements. Lorsque que l'on charge la cuve de pétrole, il ne faut pas qu'il y ait d'oxygène afin d'éviter un risque d'explosion : on remplace l'air par un gaz inerte. Même si la variation de gaz se fait à pression constante (cette valeur est généralement située entre 1,1 et 1,3 bars) et à température quasi-constante, la masse volumique de ce gaz est différente sur chaque pétrolier car sa composition varie d'un pétrolier à l'autre,

ce qui a pour effet de modifier la célérité  $c$  des ondes acoustiques. Pour pallier à ce problème, nous avons opté pour l'utilisation d'un deuxième résonateur de Helmholtz (avec  $V'$ ,  $l'$ , et  $s'$  connus) dans la cuve afin de mesurer la célérité  $c$  des ondes acoustiques :

$$c = 2\pi f_0' \sqrt{\frac{V'l'}{s'}} \quad (19)$$

L'erreur de mesure de cette grandeur est donnée par :

$$\frac{\Delta c}{c} = \frac{\Delta f_0'}{f_0'} + \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta V'}{V'} + \frac{\Delta l'}{l'} + \frac{\Delta s'}{s'} \right) \quad (20)$$

Si on considère que les grandeurs  $l$ ,  $s$ ,  $l'$ ,  $s'$  et  $V'$  sont mesurées sans erreurs et que la fréquence est donnée par le même appareil ( $\Delta f = \Delta f_0 = \Delta f_0'$ ), l'erreur relative sur le volume du liquide dans la cuve peut s'exprimer par :

$$\frac{\Delta V_{liq}}{V_{liq}} = 2 \left( \frac{\Delta f_0}{f_0} + \frac{\Delta f_0'}{f_0'} \right) \quad (21)$$

### 3.3. Expériences et résultats

Pour réaliser cette expérience, nous avons utilisé les instruments suivants (cf. fig 7).

- un générateur basses fréquences (GBF) pour générer différentes fréquences ;
- un haut parleur (relié au GBF pour convertir l'énergie électrique en énergie mécanique) ;
- un microphone (convertir l'énergie mécanique en énergie électrique) ;
- un oscilloscope pour mesurer la fréquence de résonance ;
- une bouteille d'eau de 8,178 litres pour simuler une cuve de cargo (la forme de la paroi rappelle celle d'une cuve de cargo) ;
- eau pour simuler le liquide ;
- air pour simuler le gaz ;
- un amplificateur pour amplifier les signaux reçus par le microphone ;
- une alimentation stabilisée.

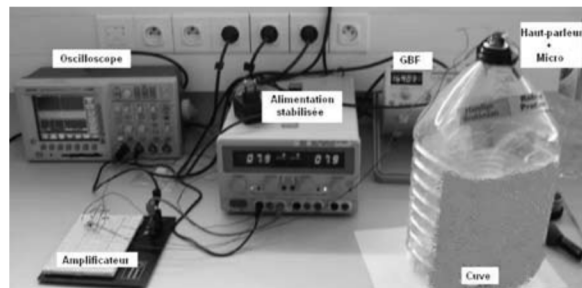
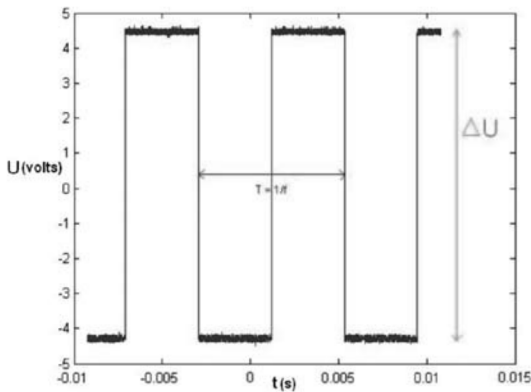


Fig 7. Schéma du dispositif expérimental.

Pour les essais, nous avons choisi d'envoyer par l'intermédiaire du GBF un signal créneau d'amplitude  $\Delta U$  constante égale à 8,48 volts vers le haut-parleur afin de minimiser les problèmes de puissances sonores liés à la caractéristique de celui-ci (cf. fig 8). Ce choix est en accord avec la théorie des oscillateurs harmoniques puisqu'un signal créneau est une somme de signaux sinusoïdaux.



**Fig 8.** Signal créneau envoyé par le GBF au haut-parleur

Nous avons fixé 3 valeurs de volume d'eau afin d'examiner l'erreur relative entre le volume obtenu par la relation (16) et celui mesuré par une balance (en utilisant la relation  $V_{eau} = \frac{m}{\rho_{eau}}$

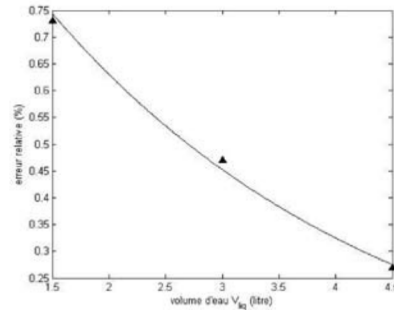
avec  $\rho_{eau} = 998 \text{ kgm}^{-3}$  la masse volumique de l'eau).

Pour identifier la fréquence de résonance expérimentale, nous avons pris une série de points avant et après la fréquence théorique de résonance calculée par la relation (16) et appliqué la transformée de Fourier au signal reçu par le micro. La fréquence de résonance expérimentale est ensuite donnée par le plus grand pic.

Les résultats de ces expériences sont illustrés dans le tableau 3 et sur la fig 9 ci-dessous.

| Volume d'eau mesuré par la balance (en litre) | Fréquence théorique de résonance (en hertz) | Fréquence expérimentale de résonance (en hertz) | Erreur relative de la fréquence (en %) | Volume expérimental obtenu par la relation (13) (en %) | Erreur relative du volume (en litre) |
|---|---|---|--|--|--------------------------------------|
| 1,5   | 130,36                                      | 130,25  | 0,08                                   | 1,489  | 0,73                                 |
| 3   | 148,04                                      | 147,88  | 0,11                                   | 2,986  | 0,47                                 |
| 4,5   | 175,66                                      | 175,37  | 0,17                                   | 4,488  | 0,27                                 |

**Tableau 3.** Valeurs expérimentales du volume de liquide et de la fréquence de résonance avec leurs erreurs relatives.



**Fig 9.** Evolution de l'erreur relative en fonction du volume d'eau

Dans une gamme de mesure de volume du liquide allant de 1,5 litres à 4,5 litres, l'analyse des ces résultats montre que l'évolution de l'erreur relative du volume de l'eau  $\frac{\Delta V_{liq}}{V_{liq}}$  en fonction de ce dernier suit une loi exponentielle de type

$$\frac{\Delta V_{liq}}{V_{liq}} = a \exp(-kV_{liq})$$

avec  $a = 1.22$  et  $k = 0.33 \text{ m}^{-3}$

La décroissance de l'erreur relative en fonction du volume est en parfait accord avec la relation (21). En effet, cette erreur est inversement proportionnelle à la fréquence de résonance qui elle, croît en fonction du volume du liquide suivant la formule (16). Les erreurs relatives de la fréquence de résonance  $f_0$  n'excèdent pas le seuil de 0,2% ; cette valeur est très inférieure à l'erreur de 1,35% proposée par Bérest et al. 1999.

Toutefois, il faut signaler que l'erreur relative du volume de liquide ne dépasse pas la valeur de 1%. Ce seuil est largement inférieur à la valeur de 3,3% obtenue par Berest et Habib, 1983 pour la mesure du volume des cavités souterraines. Cela montre la performance de la méthode que nous proposons dans le présent travail.



#### 4. Conclusion

L'objet de cet article a été de mettre au point deux nouveaux capteurs pour mesurer le niveau et le volume dans les cuves de pétroliers. Le premier, nommé capteur optique, est basé sur la vision (ou traitement d'images). Ce capteur est simple à mettre en place et offre des bonnes performances.

Le deuxième capteur, quant à lui, est basé sur les phénomènes de résonance acoustique. Ce capteur permet une mesure directe du volume de liquide, donnée importante dans les applications maritimes. Des résultats très satisfaisants pour différents volumes d'eau dans une bouteille de forme similaire aux cuves de pétroliers ont été obtenus.

Les perspectives de ces travaux concernent l'étude de faisabilité de ces deux techniques en conditions réelles sur un pétrolier.

#### Bibliographie

- [1] Bénallal M., «*Système de calibration de caméra Localisation de forme polyédrique par vision monoculaire*», Thèse de doctorat de l'école de Mines de Paris, 2002.
- [2] Bérest P., Habib P., «*Détermination du volume d'une cavité souterraine par mesure d'une période d'oscillation*», *Compte rendu de l'Académie des Sciences - série II*, 1983, p. 301-304.
- [3] Bérest P., Bergues J., Brouard B., «*Review of static and dynamic compressibility issues relating to deep underground salt caverns*», *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 36, n° 8, 1999, p. 1131-1149.
- [4] Bernardot F., Bruneaux J., Matricon J., «*Un archétype d'oscillateur : le résonateur acoustique de Helmholtz*», *Bulletin de l'union des physiciens*, vol. 96, 2002, p. 1055-1077.
- [5] Bougeniere G., Moulon P., Rosenberger C., Smari W., «*On the determination of 3D Trajectory of Moving Targets by Stereovision*», *IEEE International Conference on Computers, Communications, and Signal Processing (CCSP 2005)*.
- [6] Brand P., *Reconstruction tridimensionnelle à partir d'une caméra en mouvement : de l'influence de la précision*, Thèse de doctorat, Université de Claude Bernard – Lyon I, 1995.
- [7] Cohran S. D., Medioni G., «*3D Surface description from Binocular Stereo*», *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 14, 1992, p. 981-994.
- [8] Donlagic D., Završnik M., Sirotic I., «*The Use of One-Dimensional Acoustical Gas Resonator for Fluid Level Measurements*», *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, vol. 49, n° 5, 2000, p. 1095-1100.
- [9] Goldberg, D. E., «*Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning*», 1st edition, Boston, Addison-Wesley, 1989.

- [10] Haynes J. S., «*Tank sonic gauging system and methods*», U.S. Patent 4, 1989, p. 805-453.
- [11] Isonaga S., Hattori S., Okamoto M., Tanaka S., «*Measurement of Water Level in a Monitoring System of a Bathroom*», *SICE Annual Conference, Sapporo*, August 4-6 2004, Japan, Hokkaido Institute of Technology, p. 1730-1734.
- [12] Lagarias J. C., Reeds J. A., Wright M. H., Wright P. E., «*Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions*», *SIAM Journal of Optimization*, vol. 9, n° 1, 1998, p.112-147.
- [13] Malgouyres R., *Algorithmes pour la Synthèse d'Images et l'Animation 3D*, 2ème édition, Paris, Dunod, 2005.
- [14] Pandey P., Punnen A. P., «*A simplex algorithm for piecewise-linear fractional programming problems*», *European Journal of Operational Research*, vol. 178, n° 2, 2007, p. 343-358.
- [15] Rocard Y., *Dynamique générale des vibrations*, 4ème édition, Paris, Masson, 1971.
- [16] Tang L., Tian L., Steward B.L., «*Color image segmentation with genetic algorithm for in-field weed sensing*», *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, vol. 43, no 4, 2000, p. 1019-1027.
- [17] Telle B., «*Méthode ensembliste pour une reconstruction tridimensionnelle garantie par stéréovision*», Thèse de l'université de Montpellier II, 2003.