

5^e JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

22, 23, 24 mars 1995 – ROUEN

**BALLOTTEMENT DE LIQUIDE
DANS DES RESERVOIRS PARTIELLEMENT REMPLIS :
APPROCHES EXPERIMENTALES ET NUMERIQUES**

Philippe CORRIGNAN

SIREHNA

Immeuble Atlanpole – 1 Rue de la Noë – 44071 NANTES CEDEX 03

Résumé

Les phénomènes associés au ballonnement de liquide dans des réservoirs partiellement remplis (inertie du liquide, impacts sur les parois) touchent de nombreux secteurs industriels. Des modélisations expérimentales et numériques sont entreprises depuis plusieurs années au Laboratoire de Mécanique des Fluides de l'Ecole Centrale de Nantes, avec, en particulier, le développement du code bidimensionnel TUMMAC, et à la Société SIREHNA.

Des essais sur maquettes ont été réalisés pour confronter les mouvements de surface libre calculés avec l'expérience. Dans ce but, deux méthodes optiques de mesure de déformée de surface libre ont été mises en oeuvre.

On présente les principes généraux du logiciel TUMMAC, les moyens expérimentaux utilisés et les comparaisons obtenues.

Summary

Numerous industrial fields are concerned by the effects induced by the sloshing of liquid in partially filled tanks (liquid inertia, impacts on tank walls). Experimental and Numerical modeling have been carried out for several years at the Laboratory of Fluid Mechanics of Ecole Centrale Nantes, in particular with the implementation of the 2D code TUMMAC, and at SIREHNA.

Model tests have been performed to compare computed free surface motions with experiments. In this purpose, two optical methods for free surface rise measurement were implemented.

We present the general principles of TUMMAC, the experimental apparatus used, and the comparisons obtained.

I - INTRODUCTION

De nombreux secteurs industriels et scientifiques sont concernés par le transport de réservoirs partiellement remplis de liquide, que ce soit dans le domaine maritime (méthaniers, pétroliers), terrestre (camions citerne), aéronautique ou aérospatial (réservoirs de carburant). Or, le déplacement de tels réservoirs peut, dans certaines conditions, engendrer un ballonnement important de la cargaison liquide ("sloshing") pouvant affecter la stabilité du véhicule transporteur et engendrer de sévères impacts sur les parois.

Des études expérimentales et numériques du phénomène de ballonnement sont menées depuis plusieurs années à l'Ecole Centrale Nantes (ECN) et à SIREHNA. Il était alors intéressant de confronter les évolutions de surface libre calculées par le logiciel TUMMAC, développé par le Laboratoire de Mécanique des Fluides (LMF) de l'ECN, avec l'expérience. Ces comparaisons ont été effectuées pour deux cuves rectangulaires, remplies d'eau à 60 % de leur volume, et soumises à des mouvements de cavement.

II - APPROCHE EXPERIMENTALE

II.1 - MAQUETTES

Les essais ont été réalisés sur deux maquettes parallélépipédiques fabriquées dans le cadre d'une étude plus générale du phénomène de sloshing, menée à SIREHNA [1]. Leurs dimensions internes respectives sont $0.4 \times 0.2 \times 0.2 \text{ m}^3$ (maquette 1) et $0.8 \times 0.4 \times 0.4 \text{ m}^3$ (maquette 2), leurs parois étant constituées de plaques de plexiglas d'épaisseur 50 mm.

II.2 - SIMULATEUR

Les mouvements d'excitation des maquettes ont été obtenus grâce au Générateur de Mouvements Plans (GMP) du LMF. Ce moyen d'essais permet de simuler des mouvements quelconques dans un plan vertical, simultanément selon les trois degrés de liberté (deux translations et une rotation). Il se compose principalement d'une plate-forme, sur laquelle la maquette est fixée rigidement, animée par deux vérins électriques verticaux et un horizontal, selon la représentation de la figure 1.

Le principe de fonctionnement du GMP est de reproduire les élongations imposées des trois vérins, calculées avec un pas de temps de 20 ms à partir des historiques des mouvements à simuler. Un micro-ordinateur industriel gère simultanément la lecture des consignes des vérins et l'asservissement, en position et en vitesse, de leurs élongations.

Les fichiers de consignes des élongations des vérins sont calculés directement par le micro-ordinateur industriel pour des mouvements sinusoïdaux monochromatiques, ou sur tout autre micro-ordinateur dans le cas de mouvements irréguliers.

Les capacités du GMP sont les suivantes :

- débattement maximum des vérins : $\pm 300 \text{ mm}$, ce qui autorise, dans le cas de mouvements monodirectionnels, des translations de $\pm 300 \text{ mm}$, ou des rotations de 17° environ,
- vitesse maximale d'élongation : 1.2 m/s ,

- accélération maximale d'élongation : 3 m/s^2 environ, pour une charge maximale de 500 kg.

II.3 – MESURE DE LA DEFORMEE DE SURFACE LIBRE

Pour les problèmes de sloshing, la détermination expérimentale des profils de surface libre doit être réalisée pour une large étendue de la zone de mesure (longueur de la cuve) dans une enceinte fermée, avec possibilité de vagues fortement cambrées et d'impacts sur le plafond, comme l'illustre la figure 2. Face à ces contraintes, les systèmes mécaniques usuels de mesure d'élévation de surface libre (lyres, sondes à pointes asservies) se révèlent inadaptés. En conséquence, des méthodes optiques ont été mises en oeuvre. Elles se résument en des visualisations et des enregistrements video de coupes de la surface libre, analysés ensuite par des traitements numériques d'images.

II.3.1 – Coupe de la surface libre

Des coupes de la surface libre ont été visualisées selon deux techniques : ombroscopie et éclairage par plan lumineux laser.

La technique d'ombroscopie utilisée permet de matérialiser le profil de surface libre le long d'une paroi latérale de la cuve en une ligne sombre, comme l'illustre l'image de la figure 2. Elle consiste à éclairer le liquide à l'aide d'une lumière diffuse en contre-jour. Ses avantages résident dans sa simplicité de mise en oeuvre, ses possibilités de champ de vue étendu, et les détails de l'écoulement (jets, bulles) observables même après plusieurs impacts répétés de liquide (cf figure 2). Par contre, le contraste de la surface libre n'est généralement pas suffisant pour permettre une extraction automatique des profils par traitement d'images.

La technique d'éclairage par plan laser permet de matérialiser l'intersection du plan et de la surface libre en une courbe lumineuse. De manière à obtenir des profils à proximité du plafond de la cuve, ce plan doit provenir de dessous la maquette, et traverser le liquide. Pour notre application, il est généré par le balayage d'un faisceau laser, transporté depuis la source laser par l'intermédiaire d'une fibre optique, et dévié par un miroir tournant situé dans une pièce d'interface entre la cuve et le GMP. Le profil est finalement matérialisé à l'aide d'un ensemencement en surface composé de particules blanches hydrophobes.

La technique d'éclairage par plan lumineux s'est révélée intéressante par la luminosité importante des profils de surface libre, permettant leur extraction automatique. De plus, différentes coupes peuvent être réalisées en déplaçant le plan lumineux. Par contre, elle nécessite des moyens importants (source laser, fibre optique, miroir tournant) et reste limitée par l'angle d'ouverture du plan laser d'une part, et des problèmes liés à l'ensemencement d'autre part. En particulier, l'occurrence d'impacts répétés conduit à une dispersion des particules à la surface.

Compte-tenu de ces résultats, la technique d'éclairage par plan lumineux a été appliquée sur la première maquette, de dimensions réduites, et la technique d'ombroscopie sur la deuxième. Des schémas de montage sont représentés sur les figures 3 et 4 respectivement.

Les visualisations par plan lumineux ont été enregistrées en continu sur bande magnétique à la cadence de 500 images/s à l'aide d'un système video rapide NAC-HSV-1000. La caméra, équipée d'un zoom, a été placée sur le côté de la cuve, fixe par rapport au sol, dans

un plan perpendiculaire au plan lumineux, et suivant une prise de vue en contre-plongée (fig. 3). Simultanément, le mouvement d'excitation a été enregistré sur un oscilloscope numérique. Sa synchronisation avec les visualisations est obtenue à l'aide d'un incrustateur de signaux incorporé au système video rapide, en insérant dans les images un signal de référence (échelon,...) également enregistré par l'oscilloscope numérique.

Du fait du champ de vue requis par la deuxième maquette, et de l'encombrement des structures du simulateur, les visualisations par ombroscopie ont été filmées par une caméra standard CCD de faibles dimensions (SONY DXC 107 P), équipée d'un objectif grand angle, montée sur le châssis du GMP (fixe par rapport au sol), au-dessus de la maquette, et en utilisant un miroir de renvoi (fig. 4). Les enregistrements ont alors été réalisés à la cadence de 50 trames par seconde. Le mouvement d'excitation a, de nouveau, été mesuré sur un oscilloscope numérique. Sa synchronisation avec les visualisations a été obtenue à l'aide d'une diode, visible sur les images, et dont le signal d'allumage (en échelon) a été également enregistré par l'oscilloscope numérique.

II.3.2 - Coordonnées des profils

Pour chaque image traitée, l'obtention des coordonnées physiques du profil de surface libre se décompose en deux étapes : numérisation de l'image avec extraction du profil en pixels, et calcul des coordonnées physiques.

La première étape a été réalisée à l'aide d'une carte de numérisation d'images SECAD (numérisation en 512 x 512 pixels) implantée sur un micro-ordinateur. L'extraction du profil a été exécutée soit de manière automatique (éclairage par plan lumineux) soit manuellement en relevant des points sur l'image avec la souris de l'ordinateur (ombroscopie), à l'aide de programmes spécifiques.

Le calcul des coordonnées physiques des profils, dans un repère lié à la cuve, prend en compte les déformations de l'image dues à l'effet de perspective, au phénomène de réfraction à travers la paroi de la maquette, et celles liées aux aberrations optiques éventuelles au niveau des objectifs.

Les relations entre les coordonnées image (x,y) et les coordonnées physiques dites "coordonnées scène" (Xs, Ys) sont linéaires dans le cas d'une perspective plane, de la forme :

$$(1) \quad \begin{aligned} X_s &= (q_{11}x + q_{12}y + q_{13}) / (q_{31}x + q_{32}y + 1) \\ Y_s &= (q_{21}x + q_{22}y + q_{23}) / (q_{31}x + q_{32}y + 1) \end{aligned}$$

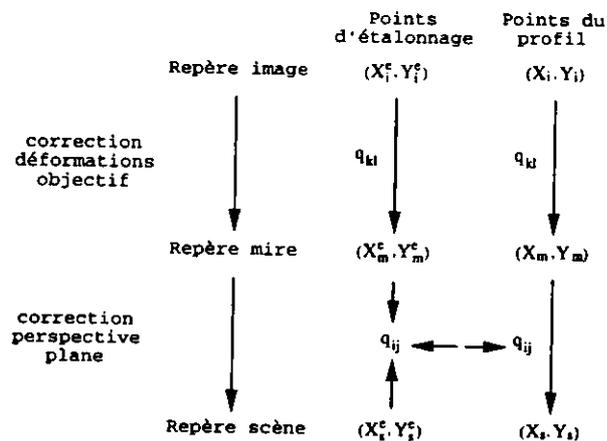
où les huit coefficients q_{ij} sont calculables à partir de quatre points d'étalonnage.

Le phénomène de réfraction devient important lors d'observations à travers la paroi latérale de la maquette en plexiglas, d'un point situé dans l'eau, les indices optiques de l'eau et du plexiglas étant très proches et supérieurs à celui de l'air. Suivant l'angle de visée, il se manifeste par un décalage de l'image et/ou une variation de sa taille. En considérant en première approximation que les lois de réfraction sont linéaires (angles de visée inférieurs à 30° environ), cet effet est pris en compte lors de la correction de perspective, selon le système (1), en calculant les coefficients q_{ij} à partir de quatre points d'étalonnage situés dans le plan du

profil. Dans le cas de l'éclairage par plan lumineux, ce dernier étant situé au milieu de la maquette, ces points doivent se trouver dans le liquide. Par contre, en ombroscopie, le plan correspond à la face interne de la paroi, et les points peuvent se trouver indifféremment de part et d'autre de la surface libre. Finalement, pour ces deux cas, les points d'étalonnage ont été relevés sur les parois verticales gauche et droite des maquettes de manière à réaliser l'étalonnage pour chaque image et à obtenir les coordonnées des profils dans un repère lié aux cuves.

Les déformations dues aux objectifs ont été évaluées en filmant perpendiculairement une mire composée d'une grille rectangulaire de points. Les images obtenues, et présentées sur les figures 5 et 6, révèlent des déformations significatives induites par l'objectif grand-angle. La correction de cet effet est réalisée dans l'hypothèse où, les mailles de la grille étant suffisamment fines, les déformations s'apparentent à des effets locaux de perspective, gouvernés par le système (1), des coefficients q_{kl} étant associés à chaque maille.

En résumé, chaque point du profil est corrigé en deux étapes, en introduisant le repère "mire", intermédiaire entre le repère image et le repère scène. Le passage du repère image au repère mire, qui correspond à la correction des déformations dues à l'objectif, est réalisé en utilisant le système (1) avec des coefficients q_{kl} associés à chaque maille. Ensuite, le passage du repère mire au repère scène s'effectue à nouveau selon le système (1), avec des coefficients q_{ij} calculés à partir des quatre points d'étalonnage. Ce traitement est représenté par le schéma suivant :



Compte-tenu du montage et du système de numérisation d'images, les résolutions verticale et horizontale valent respectivement 1 mm/pixel et 1.5 mm/pixel pour la maquette 1 et environ deux fois ces valeurs pour la maquette 2.

II.4 – CONDITIONS D'ESSAIS

Les simulations ont été menées sur les deux maquettes remplies d'eau à 60 % de leur volume, et à pression d'ouillage atmosphérique.

La maquette 1 a été soumise à un mouvement de cavement irrégulier de fréquences proches de la fréquence de ballotement du liquide, représenté sur la figure 7 et défini comme suit :

$$\left[\begin{array}{l} X(t) = A(\sin(2\pi f_1 t) - \sin(2\pi f_2 t)) \quad , 0 \leq t \leq 3.43 \text{ s} \\ = 0 \quad , 3.43 \text{ s} \leq t \end{array} \right.$$

avec : $A = 0.0075 \text{ m}$,
 $f_1 = 1.598 \text{ Hz}$,
 $f_2 = 1.307 \text{ Hz}$.

La maquette 2 a été soumise à un mouvement de cavement sinusoïdal, à la période de résonance du ballonnement de liquide. De plus, afin de respecter les limites en accélération du simulateur, ce mouvement débute par une rampe exponentielle. Le mouvement obtenu, représenté sur la figure 8 s'écrit :

$$\left[\begin{array}{l} X(t) = f(t).A \sin(2\pi/T.t) \\ f(t) = 1 - e^{-\lambda t^2}, 0 \leq t \leq t_0 \\ = 1 \quad , t_0 \leq t \end{array} \right.$$

avec : $A = 0.01 \text{ m}$,
 $T = 1.19 \text{ s}$,
 $t_0 = 30 \text{ s}$,
 $\lambda = (3 \ln 10)/t_0^2$.

III - METHODES NUMERIQUES

Les simulations numériques ont été effectuées en utilisant le logiciel TUMMAC développé au LMF à partir d'un code issu de l'Université de Tokyo.

III.1 - DESCRIPTION DU CODE

Ce logiciel calcule l'écoulement monophasique (gaz d'ouillage non modélisé) bidimensionnel à surface libre et instationnaire d'un fluide visqueux et incompressible en résolvant les équations de Navier-Stokes et de continuité dans un repère mobile lié à la cuve. Cette dernière peut être de forme polygonale quelconque. Une description en est donnée en référence [2]. Il utilise la méthode de différences finies "Marker et Cell", appliquée à une discrétisation du domaine en un maillage rectangulaire de pas constants. Le principe général de cette méthode, qui permet de simuler des écoulements instationnaires à déformées de surface libre importantes, consiste à attribuer tout au long du calcul à chaque cellule un type différent selon qu'elle contient ou non du liquide. A chaque pas de temps, les termes d'accélération liés au mouvement de la cuve sont évalués et la pression et la vitesse sont calculées respectivement au centre et sur les frontières de chaque cellule, selon un processus itératif. Une condition de glissement sur les parois est appliquée à la vitesse afin d'éviter un raffinement important du maillage, nécessaire pour la représentation de la couche limite. Dans le cas de forts gradients de vitesse, le pas de temps du calcul est variable de manière à ce qu'un élément de fluide ne puisse traverser une cellule complète entre deux instants consécutifs. La discrétisation de la surface libre en segments, dont les positions sont mises à jour à chaque pas de temps, permet la représentation de vagues avec déferlement.

Des mouvements de cuve quelconques selon les trois degrés de liberté sont simulables simultanément. Des mouvements sinusoïdaux monochromatiques peuvent être engendrés directement par le code. Dans le cas d'excitations irrégulières, les historiques des mouvements et des accélérations doivent lui être fournis.

Les résultats disponibles comprennent les profils de surface libre, et les champs de vitesse et de pression absolue ou dynamique, à différents instants sélectionnés. Des difficultés sont cependant rencontrées pour le calcul des pressions impulsives engendrées lors d'impacts sur les parois de la cuve, avec une forte influence des paramètres de calcul (pas de temps, etc...) sur leurs caractéristiques. Ces problèmes sont également signalés pour la plupart des codes existants, décrits dans la littérature.

III.2 - CONDITIONS DE CALCUL

Les simulations numériques ont été réalisées dans les deux configurations d'essais précédentes, et pour un maillage de 80 x 40 cellules ce qui représente des pas horizontaux et verticaux de 5 mm pour la première maquette et 10 mm pour la seconde.

Le pas de temps initial de calcul a été fixé à 1 ms.

Pour la maquette 1, le mouvement d'excitation irrégulier théorique a été recalé dans le temps par rapport à la mesure du déplacement de la maquette, puis a été fourni au code avec les accélérations associées, calculées analytiquement.

Pour la seconde maquette, les accélérations ont été calculées à partir du déplacement mesuré.

IV - RESULTATS

Les comparaisons ont été réalisées jusqu'aux instants du premier impact sur le plafond, après lesquels l'extraction des profils de surface libre est rendue difficile par l'apparition d'un jet de liquide (perturbations, dissémination des particules, etc..., cf fig.2).

Les superpositions des profils expérimentaux et numériques obtenus pour la première configuration à dix instants successifs entre le début du mouvement et le premier impact sur le plafond ($t = 2.004$ s) sont présentés sur la figure 9. On observe que l'évolution de la déformée de surface libre est bien simulée par TUMMAC, avec néanmoins une atténuation de l'amplitude du ballonnement. En particulier, l'impact observé expérimentalement n'est pas prédit par les calculs, avec une distance minimale surface libre/plafond de 8 mm, obtenue à $t = 2.042$ s (fig. 9 et 9 bis).

Des résultats similaires sont obtenus dans la seconde configuration, comme l'indiquent les profils numériques et expérimentaux présentés sur la figure 10 à trois instants au cours d'un cycle de ballonnement.

Une interprétation possible de l'atténuation des mouvements de surface libre calculés est l'existence d'une "viscosité numérique" introduite par la méthode de calcul. De fait, on signale dans la bibliographie (ref. [37]), pour d'autres logiciels également développés à partir de la méthode "Marker et Cell", des effets similaires, apparemment liés à l'algorithme de calcul

utilisé.

V - CONCLUSION

Des simulations du phénomène de sloshing à moyen remplissage ont été réalisées expérimentalement et numériquement pour deux configurations de maquette et de mouvement d'excitation.

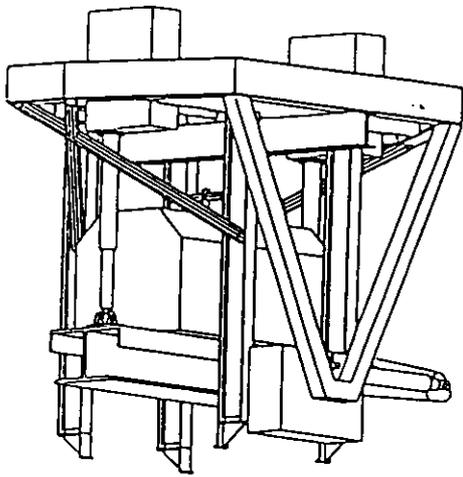
A cette occasion, deux méthodes de détermination des profils expérimentaux de surface libre ont été développées. Ces méthodes se sont révélées satisfaisantes mais limitées lorsque des impacts répétés, engendrant des jets de liquide, se produisent sur le plafond du réservoir.

La comparaison des profils de surface libre expérimentaux et numériques indique une bonne prédiction des simulations numériques du code TUMMAC, avec néanmoins un amortissement de l'amplitude du ballonnement.

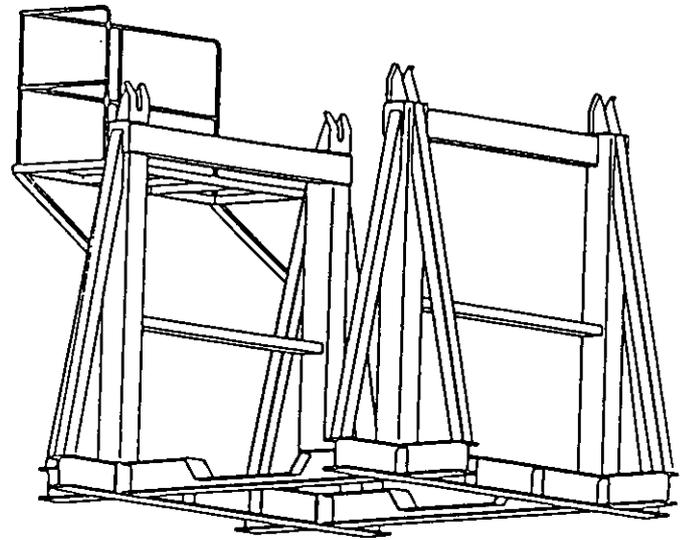
Il serait à présent intéressant d'étudier l'influence des paramètres de calcul sur ces résultats, de considérer des géométries de cuve plus complexes et d'étudier le problème du calcul des pressions impulsives.

VI - REFERENCES

- [1] - Analyse physique des phénomènes associés au ballonnement de liquide dans des réservoirs (sloshing). Ph. CORRIGNAN - Thèse de l'Université de Nantes présentée fin 1994
- [2] - Analyse des mouvements de cargaison liquide dans des cuves de navires méthaniers. Ph. CORRIGNAN, J. P. CORDONNIER, J. P. BORLETEAU - Rapport SIREHNA 89/42-A/RF - Décembre 1991
- [3] - A numerical simulation of large amplitude sloshing. T.J. BRIDGES - Texas A&M University, College Station Texas - 3rd International Congress on Numerical Hydrodyn. - Paris, 1981



Cuve en position sur le GMP



Chassis support

Figure 1 – Schéma du GMP



Figure 2 – Exemple d'impact (ombroscopie, remplissage 60 %, résonance)

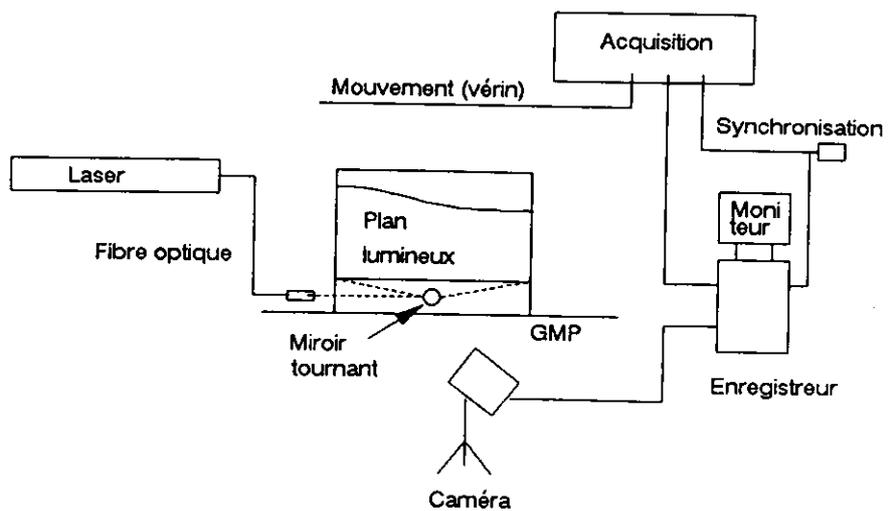


Figure 3 – Eclairage par plan lumineux : schéma du montage expérimental

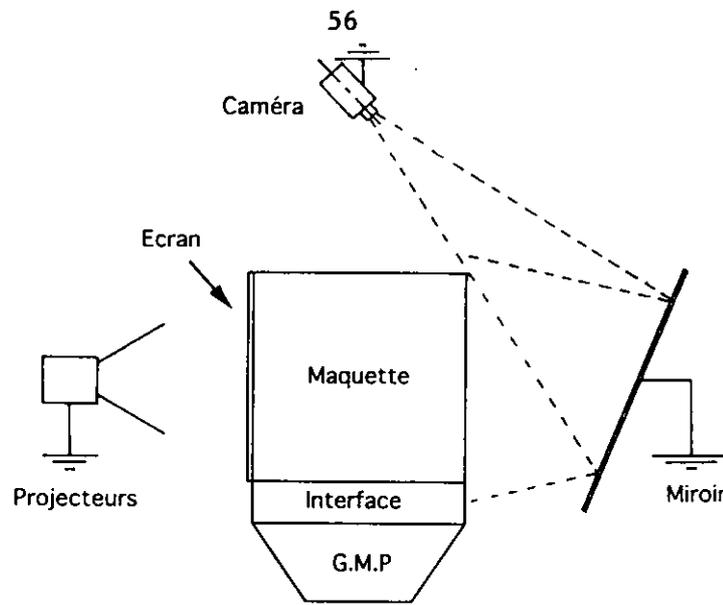


Figure 4 – Technique d'ombroscopie : schéma du montage expérimental

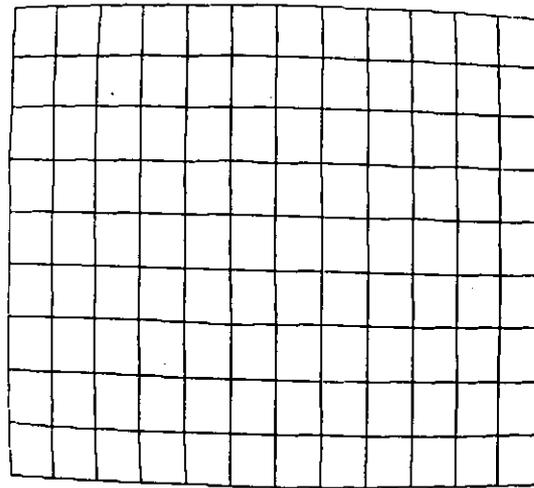


Figure 5 – Déformations de la grille rectangulaire dues à l'objectif grand angle

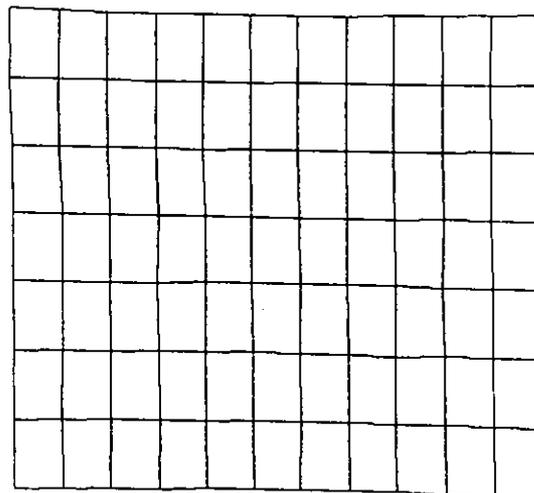


Figure 6 – Déformations de la grille rectangulaire dues au zoom

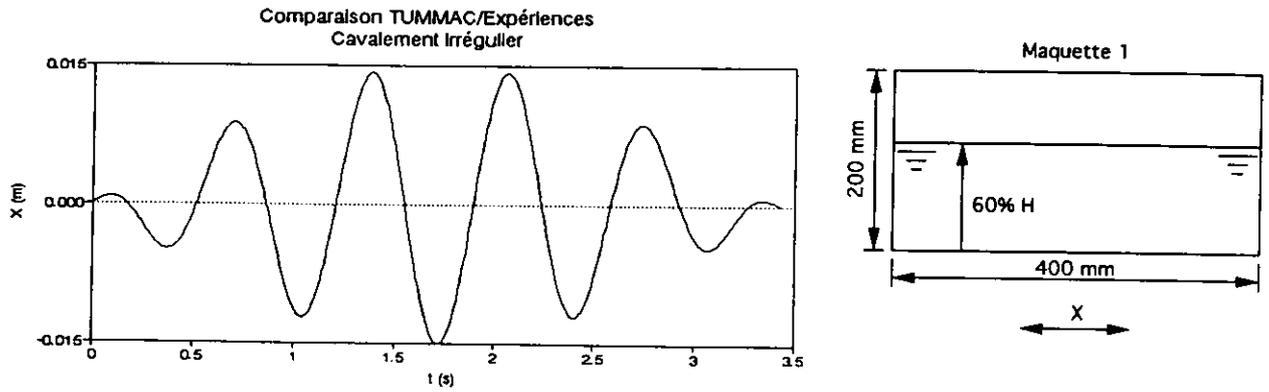


Figure 7 – Mouvement de cavalement irrégulier – maquette 1

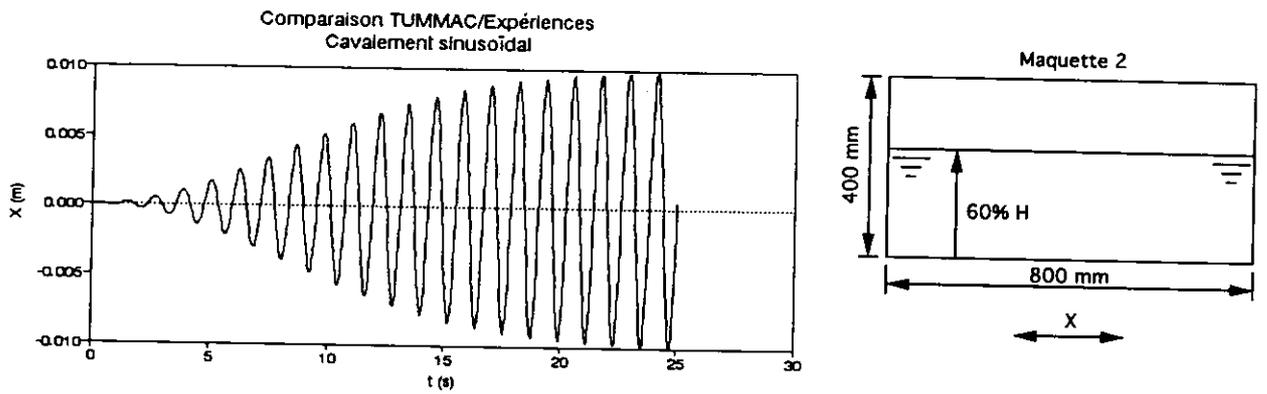


Figure 8 – Mouvement de cavalement sinusoïdal – Maquette 2

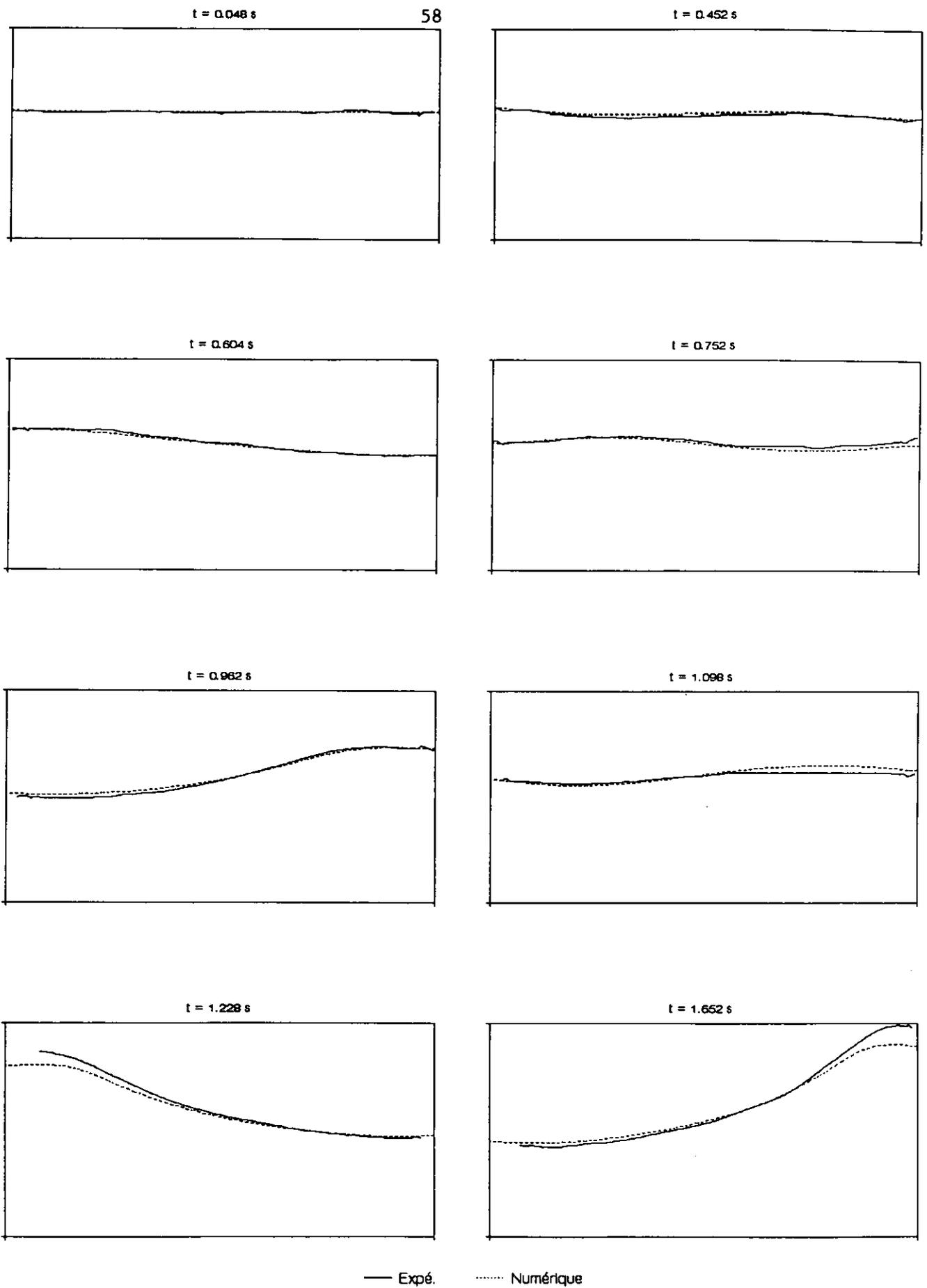


Figure 9 – Configuration 1 – Profils expérimentaux et numériques

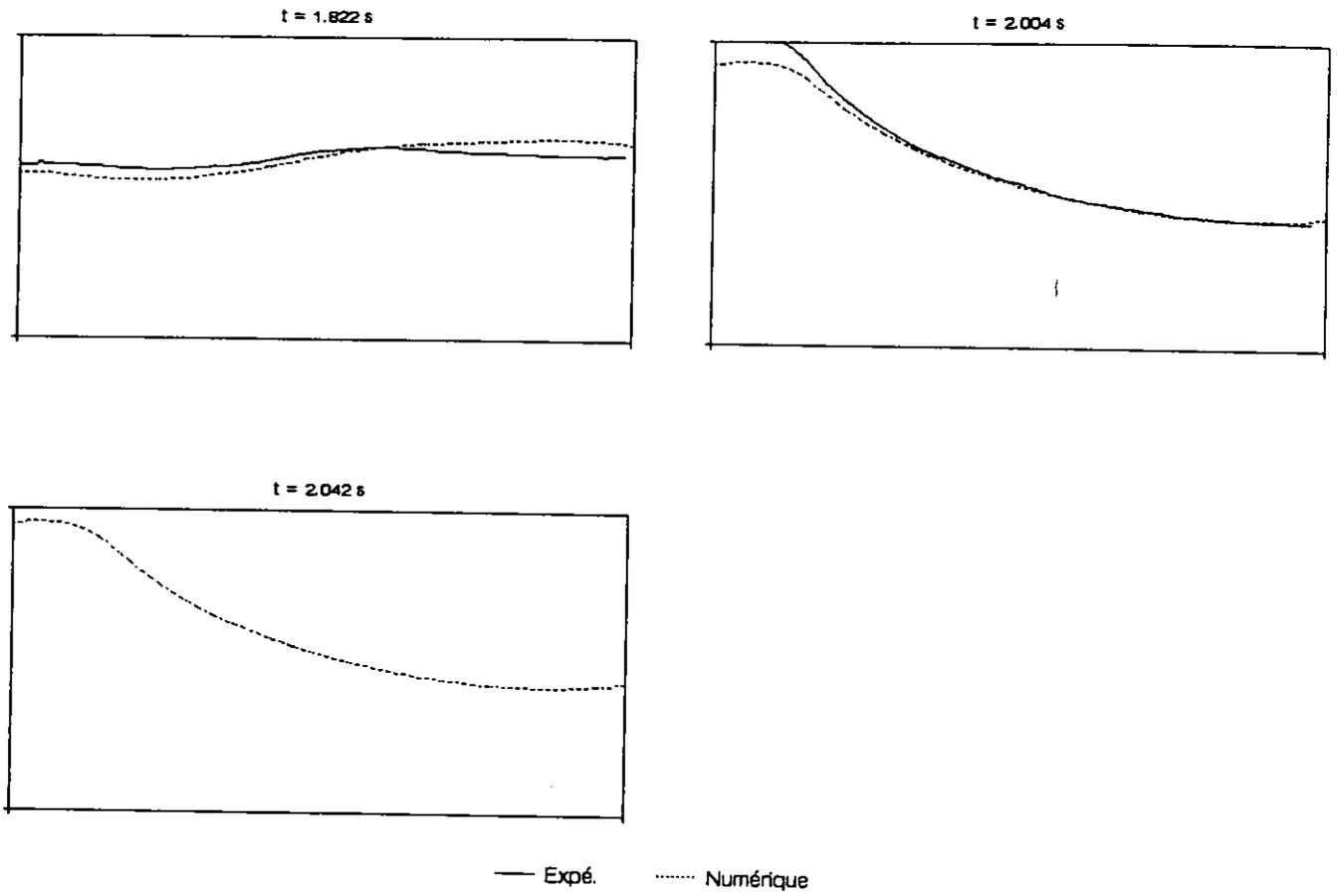


Figure 9 bis – Configuration 1 – Profils expérimentaux et numériques

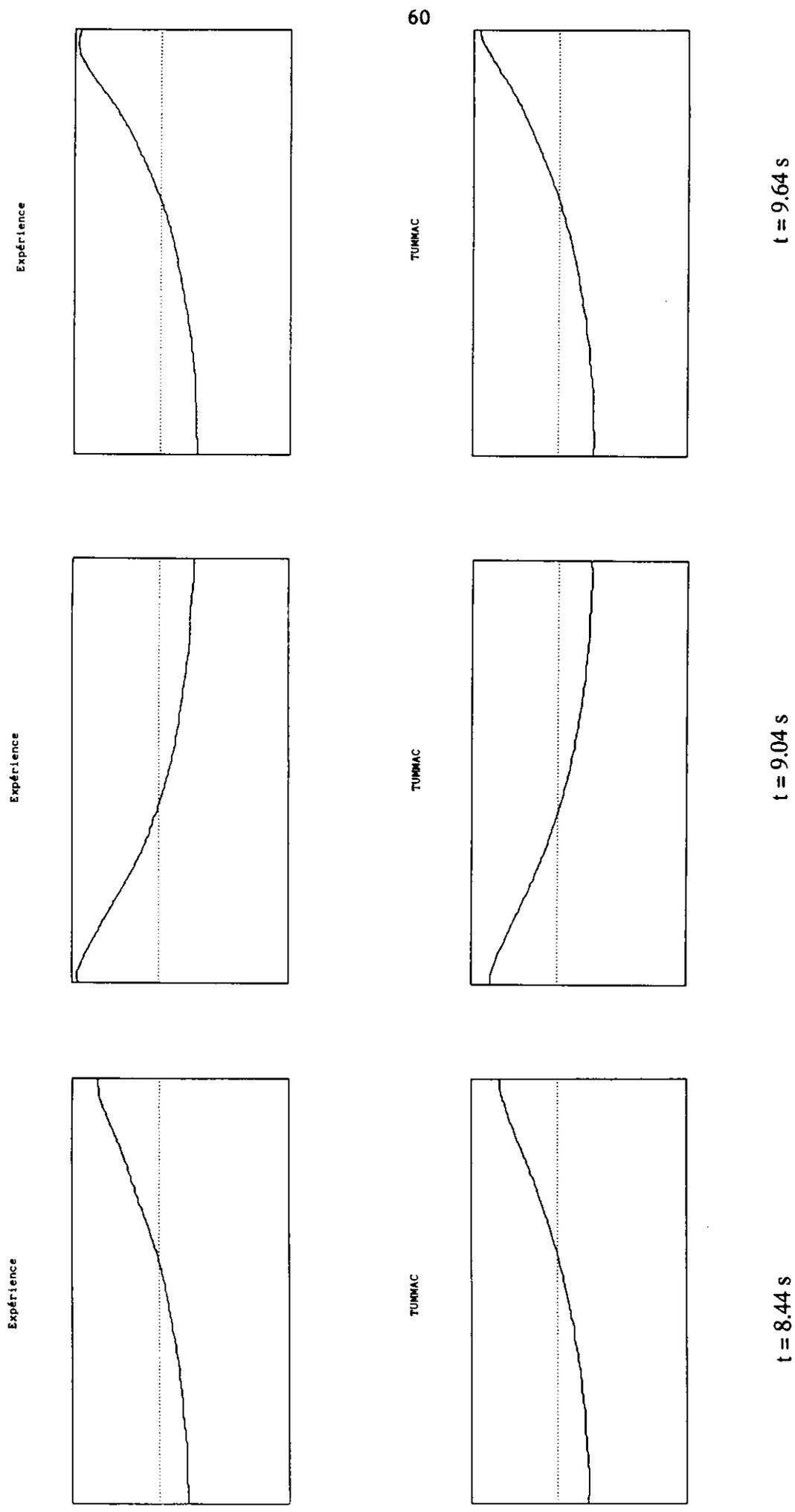


Figure 10 – Configuration 2 – Profils expérimentaux et numériques