

2èmes JOURNEES DE L'HYDRODYNAMIQUE

13 au 15 Février 1989 - Nantes

CALCULS D'ÉCOULEMENTS AUTOUR DE CARENES COMPLEXES

J. Ryan, T.H. Lê

O.N.E.R.A.

29, Avenue de la Division Leclerc-92320 Châtillon

Le code TRIDENT, basé sur une méthode de singularité de seconde génération, a été développé à l'ONERA pour le calcul d'écoulements stationnaires, tridimensionnels de fluides incompressibles avec prise en compte des sillages. Ce code a été inclus dans une chaîne de calcul permettant ainsi l'évaluation des caractéristiques hydrodynamiques d'un véhicule marin. Les cas traités concernent une quille à ailettes et un sous-marin.

The TRIDENT code, based on a second-generation panel method, has been developed at ONERA for the computation of steady and incompressible flows with modeling of wakes about three-dimensional configurations. This code is a part of a computational process which allows the evaluation of hydrodynamical characteristics of a marine vehicle. The cases treated here are a twin foil keel configuration and a submarine.

1 Introduction

Le but à long terme de l'étude présentée est l'aide à la définition de navires de conception avancée. La mise en oeuvre de méthodes précises de calcul des caractéristiques de l'écoulement en est un élément. La Direction de l'Aérodynamique de l'ONERA a entrepris depuis une dizaine d'années l'étude de méthodes de singularités pour le calcul d'écoulements stationnaires, tridimensionnels de fluides parfaits incompressibles autour d'un corps aérodynamique ou hydrodynamique complexe avec prise en compte des sillages. Ces méthodes, dites de seconde génération [1], sont basées sur une représentation intégrale de la solution de l'équation du potentiel des vitesses, avec des conditions aux limites internes de Dirichlet [2] ou de Fourier [3,4], et une discrétisation des sillages à l'aide de répartitions surfaciques de doublets [4,5]. Elles ont déjà été utilisées pour le calcul d'écoulements autour de fuselages d'hélicoptère, d'une voilure munie d'un spoiler en position braquée et de sous-marins.

On présente dans cet article le code de calcul basé sur les méthodes précédemment citées et le système informatique permettant une évaluation hydrodynamique des véhicules marins, ou des éléments de ceux-ci.

2 Méthode numérique

Le code TRIDENT permet de calculer les caractéristiques d'un écoulement stationnaire de fluide incompressible non visqueux autour d'un ensemble coque + quille + appendices, la surface libre étant considérée comme un plan de symétrie.

Les caractéristiques essentielles de la méthode présentée ici sont :

- . la représentation de la solution par une formulation dérivant d'un problème avec conditions aux limites internes de Dirichlet, où le saut de potentiel sur le corps est l'inconnu principal, les nappes tourbillonnaires étant données,
- . le calcul de la vitesse à partir de ce saut de potentiel,
- . l'utilisation d'une méthode itérative rapide de résolution du système linéaire associé,
- . la prise en compte de configurations complexes à l'aide d'un maillage structuré par domaine.

2.1 Modèle mathématique

Le calcul de l'écoulement autour d'un obstacle Ω se ramène à la résolution du problème (P) suivant :

$$\Delta\phi = 0 \text{ dans } \Omega' - \Gamma_S$$

$$\left. \frac{\partial\phi}{\partial n} \right|_{\Gamma_C} = -V_\infty \cdot n$$

$$\left[\frac{\partial\phi}{\partial n} \right]_{\Gamma_S} = 0$$

$$\left[\phi \right]_{\Gamma_S} : \text{ tel que } \left| \nabla\phi \right|_\infty < \infty$$

$$\phi \longrightarrow \phi_S \quad \left| x \right| \longrightarrow \infty$$

avec

ϕ potentiel de perturbation,

n normale unitaire extérieure à Γ_C ou Γ_S ,

V_∞ vecteur normé, vitesse à l'infini,

ϕ_S potentiel induit par le sillage,

Γ_C surface de l'obstacle,

Ω ouvert borné de frontière Γ_C ,

Γ_S nappe, issue du bord de fuite et supposée donnée,

Ω' complémentaire de Ω ,

$$\left[f \right]_{\Gamma_S} \text{ saut de la quantité } f \text{ à travers } \Gamma_S,$$

Une équation non linéaire (Ec) est alors obtenue pour μ_C [6] :

$$V \cdot x \in \Gamma_C$$

$$2\pi\mu_C(x) - \int_{\Gamma_C} \mu_C(y) \frac{\partial}{\partial n_y} \frac{1}{r} d\gamma(y) - \int_{\Gamma_S} \mu_S(y) \frac{\partial}{\partial n_y} \frac{1}{r} d\gamma(y) = - \int_{\Gamma_C} \frac{V_\infty \cdot n(y)}{r} d\gamma(y)$$

$$\text{avec } r = |x-y|$$

où μ_C et μ_S sont respectivement les sauts du potentiel de perturbation ϕ à travers Γ_C et Γ_S .

La valeur de μ_S sur la ligne de départ de la nappe donnée sur Γ_C (bord de fuite BF) est obtenue à partir de la condition de vitesse finie qui implique la continuité des sauts de potentiel dans cette région, d'où la relation suivante :

$$(Rc) \quad \mu_{CE} - \mu_{CI} - \mu_S \Big|_{BF} = 0$$

où les indices CE et CI signifient respectivement extrados et intrados du corps.

La nappe est modélisée par une surface cylindrique s'appuyant sur le bord de fuite et de génératrices parallèles à l'écoulement à l'infini : μ_S est pris constant sur ces génératrices. La relation (Rc) suffit donc à déterminer toute la distribution de doublets surfacique du sillage.

Compte tenu de cette équation le système (Ec) + (Rc) devient un système linéaire en μ_C et μ_S .

2.2 Discrétisation

L'équation (Ec) est supposée satisfaite en un nombre fini m de points de collocation $[x_i, i=1, \dots, m]$ de Γ_C . On obtient alors le système d'équations (Ed) suivant :

$$\forall x_i \in \Gamma_C$$

$$2\pi\mu_{Ci} - \int_{\Gamma_C} \mu_C(y) \frac{\partial}{\partial n_y} \frac{1}{r_i} d\gamma(y) - \int_{\Gamma_S} \mu_S(y) \frac{\partial}{\partial n_y} \frac{1}{r_i} d\gamma(y) = - \int_{\Gamma_C} \frac{V_\infty \cdot n(y)}{r_i} d\gamma(y)$$

$$r_i = |x_i - y|$$

$$\mu_{Ci} = \mu_C(x_i)$$

où les intégrales sont prises au sens de Lebesgue.

2.3 Intégration numérique

L'approximation utilisée pour le calcul des intégrales est de type "Qo" : les surfaces du corps et de la nappe sont approchées par des facettes planes sur lesquelles μ est supposé constant. Les facettes discrétisant cette nappe, supposée figée et tangente à l'écoulement non perturbé, sont des bandes planes semi-infinies issues du bord de fuite.

La surface du corps et de la nappe se décompose en :

$$\Gamma_C = \bigcup_i^m \Gamma_{Ci} \quad \text{et} \quad \Gamma_S = \bigcup_i^n \Gamma_{Si}$$

Compte tenu de l'approximation utilisée le système (Ed) et la relation (Rc) s'écrivent :

$$V x_i \in \Gamma_{Ci} \text{ pour } i \in [1, m]$$

$$2\pi\mu_{Ci} - \sum_j^m \mu_{Cj} \int_{\Gamma_{Cj}} \frac{\partial}{\partial n_y} \frac{1}{r_i} d\gamma(y) - \sum_j^n \mu_{Sj} \int_{\Gamma_{Sj}} \frac{\partial}{\partial n_y} \frac{1}{r_i} d\gamma(y) = \sum_j^m \int_{\Gamma_{Cj}} \frac{V_\infty \cdot n(y)}{r_i} d\gamma$$

les μ_{Sj} étant reliés aux μ_{Cj} par les relations (Rd)

$$\mu_{CE(j)} - \mu_{CI(j)} - \mu_{Sj} = 0$$

où CE(j) et CI(j) sont les indices correspondant aux facettes du bord de fuite.

Les différentes intégrales sont calculées à l'aide de formules analytiques données par Hess et Smith [7].

La formulation matricielle d'un tel système se présente sous la forme :

$$\begin{bmatrix} \text{A} & \text{A}' \\ \text{S} & \text{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_C \\ \mu_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Bc} \\ 0 \end{bmatrix}$$

où

A est une matrice m.n représentant "l'influence" des facettes du corps entre elles,

A' est une matrice n.m représentant l'influence des facettes du sillage sur les facettes du corps,

S est une matrice $m.n$ représentant la condition de vitesse finie au bord de fuite, relations (Rd),

I est la matrice identité de rang n ,

μ_C est un vecteur colonne de m composantes représentant l'intensité des doublets sur les m facettes du corps,

μ_S est un vecteur de n composantes représentant l'intensité des doublets sur les n facettes de la nappe,

Bc est un vecteur colonne de m composantes représentant les conditions aux limites sur le corps.

2.4 Résolution du système linéaire

Le système linéaire associé est résolu en deux étapes.

La première étape consiste en une élimination de GAUSS par bloc. Formellement on multiplie les m premières lignes par la matrice \bar{A}^{-1} , ce qui donne les μ_C en fonction des μ_S , en particulier ceux qui déterminent le bord de fuite, intrados et extrados. Ces derniers sont remplacés dans les n équations suivantes, ce qui donne la structure matricielle ci-dessous :

$$\left[\begin{array}{c|c} A & A' \\ \hline 0 & P \end{array} \right] \begin{bmatrix} \mu_C \\ \mu_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Bc \\ Bs \end{bmatrix}$$

où $Bs = -S A^{-1} Bc$

et $P = I - S A^{-1} A'$

Les valeurs de μ_S sont alors données par

$$\mu_S = P^{-1} B s$$

et les valeurs de μ_C sont données par

$$\mu_C = A^{-1} (B c + A' \mu_s)$$

La méthode décrite permet de réduire les coûts par rapport à une méthode d'élimination directe, dans la mesure où la matrice S est "creuse".

La deuxième étape consiste à "inverser" les matrices P et A ou, plus précisément, à résoudre les systèmes linéaires associés.

Ces matrices sont des matrices pleines qui sont, pour les applications traitées, de rangs très différents ($m \approx 5000$, $n \approx 50$), et de ce fait les systèmes sont résolus par des méthodes de résolution distinctes.

De rang faible la matrice P est inversée par une méthode directe d'élimination de GAUSS.

Par contre, la matrice A, de rang nettement plus élevé (de l'ordre de 10 fois le rang de P) est inversée soit par la méthode directe de factorisation L.U. par blocs avec gestion asynchrone des entrées/sorties [8] sur l'ordinateur CRAY XMP18 de l'O.N.E.R.A., soit par la méthode itérative MULTIGRADIANT [9] sur l'ordinateur CRAY 2 du C.C.V.R..

2.5 Calcul de la vitesse

La vitesse aux centres des facettes est calculée par un schéma de différences finies, dans un maillage structuré par domaines et dont les noeuds sont les centres des facettes, à partir des valeurs du potentiel déterminées en ces points.

La vitesse sur l'obstacle est donnée par la formule :

$$\begin{aligned} V &= \nabla\phi + V_\infty \\ &= -\nabla\mu + (-n \cdot V_\infty)n + V_\infty \end{aligned}$$

Le terme $\nabla\mu$, composante tangentielle, est calculé à l'aide des formules suivantes :

$$\frac{\partial\mu}{\partial X} = \frac{\partial\mu}{\partial\xi} \frac{\partial\xi}{\partial X} + \frac{\partial\mu}{\partial\eta} \frac{\partial\eta}{\partial X} \quad ; \quad X = (x, y, z)$$

où (ξ, η) est un repère local lié à la surface Γ_C .

Les termes $\partial\xi / \partial X$ et $\partial\eta / \partial X$ sont donnés par inversion de la matrice Jacobienne F de la transformation $(\xi, \eta) \rightarrow (x, y, z)$ coordonnées d'une surface de référence. Les dérivées du potentiel et de la métrique sont approchées par des formules aux différences sur le maillage formé par l'ensemble des barycentres. Ces formules aux différences utilisent un schéma précis à l'ordre 2 pour les points courants et les points frontières.

3 Description du système informatique

Le système informatique mis en oeuvre comprend des logiciels et des ordinateurs spécifiques qui sont adaptés à la tâche demandée, depuis la définition de la géométrie jusqu'au traitement graphique des résultats. L'architecture du système est schématisée sur la figure 1.

3.1 Logiciel CIRCE 3D (Conception Interactive et Représentation de Carènes)

Le logiciel CIRCE 3D est un logiciel de définition de géométrie en CAO développé par la société SISTRE et implanté sur un mini-ordinateur de type HP 500. A partir du croquis conçu par l'architecte naval, CIRCE 3D permet d'obtenir directement les cotes d'exécution du navire sous forme de lisses et de couples (figure 2).

Ces cotes sont ensuite utilisées pour construire un maillage de surface propre au calcul hydrodynamique (figure 3). A cet effet un sous-programme spécifique, le "mailleur", inclus dans CIRCE 3D, permet de définir des points de maillage répartis de façon régulière.

3.2 Logiciel graphique PYTHAGORE

C'est un logiciel graphique couleur développé par la Direction de l'Aérodynamique de l'ONERA et implanté sur ordinateur BULL SPS9. Ce programme permet de visualiser des objets tridimensionnels en "filaire" pour le maillage ou en "remplissage" pour la représentation d'une variable, la pression par exemple.

3.3 Code de calcul

Le code de calcul TRIDENT est écrit sous deux versions, chacune étant optimisée par rapport à l'environnement informatique (capacité en mémoire centrale du calculateur), c'est à dire une version CRAY XMP18 avec gestion asynchrone des entrées/sorties et une version CRAY 2 en mémoire centrale.

3.4 Interfaces

Les données fournies par CIRCE 3D sont traitées dans un logiciel qui les rend compatibles avec :

- .les entrées du code hydrodynamique TRIDENT, à savoir la définition de l'obstacle facette par facette,
- . les entrées du programme de traitement graphique.

Ce programme est implanté sur le BULL SPS9 auquel est reliée une console graphique qui sert de poste de travail unique.

4 Résultats

Les configurations étudiées sont une quille à ailettes avec une gîte de 20^0 et un sous-marin avec une gîte de 0^0 , tous deux avec un angle de dérive de 0^0 et un angle d'assiette de 0^0 .

4.1 Quille à ailettes

La quille est munie d'ailettes avec un angle de dièdre non nul et une incidence négative par rapport à la quille. Les différents éléments sont équipés de profils de type NACA00xx. La figure 4 montre une vue en perspective du maillage de l'ensemble.

Le maillage sur la surface du corps est constitué de 10 domaines avec au total 3444 facettes. Le sillage est constitué de 3 nappes issues des bords de fuite de la quille et des deux ailettes et comportant 36 bandes semi-infinies.

Le temps de calcul est de 3 minutes sur CRAY XMP18 et de 2 minutes 30 secondes sur CRAY 2.

Sur la figure 5 les vitesses pariétales sont visualisées en module et en direction.

4.2 Sous-marin

L'ensemble traité comprend, une coque, un massif et les barres de plongées avant. Son maillage, représenté en vue de dessus, en vue de face et en vue de côté, est donné sur la figure 6.

Pour cet ensemble le demi obstacle est décomposé en 8 domaines (comprenant des zones de raccord massif-pont). Le maillage comprend au total 956 facettes. Le nombre de bandes semi-infinies représentant la nappe issue de la barre de plongée est de 4. Le maillage a été fourni par les Ateliers et Chantiers de Bretagne.

Le temps de calcul est de 15 secondes sur CRAY XMP18.

Les résultats visualisés représentent la pression, sa valeur étant donné par l'échelle des couleurs. La palette des couleurs choisie varie du bleu au rouge, variation correspondant à une échelle croissante des vitesses. La figure 7 montre les résultats sur les trois vues précédemment décrites.

Les résultats obtenus montrent une variation régulière du champ de pression sur la coque et le massif, sauf sur la partie supérieure avant et sur la partie inférieure arrière du massif où l'écoulement est accéléré (plages de couleur blanche ou rouge). Cette accélération est due : pour la partie avant à la présence de la barre de plongée qui est en incidence positive, pour la partie arrière à l'interaction massif-nappe de la barre de plongée.

5 Conclusion et perspectives

L'étude entreprise a permis le développement d'une méthode et la mise en oeuvre d'un programme de calcul d'écoulement stationnaire tridimensionnel de fluide non-visqueux incompressible autour de configurations navales complexes sans prise en compte des effets de surface libre.

Il conviendrait de poursuivre la validation de ce code de calcul en l'appliquant à des configurations navales pour lesquelles on dispose de résultats expérimentaux, des comparaisons théorie-expérience n'ayant été effectuées que pour des voilures d'avion de transport [4].

Une prochaine étape consistera à modéliser la surface libre afin de pouvoir accéder au calcul de résistance de vague.

REMERCIEMENTS

Le travail, objet du présent article, a été réalisé avec le soutien financier de la Direction des Recherches, Etudes et Techniques de la Délégation Générale pour l'Armement.

Références

- [1] H.W.M. Hoeijmakers : "Panel methods in aerodynamics ; Some highlights". Third GAMM Seminar panel Methods in Mechanics. Kiel(RFA) 16-18 Janvier 1987.
- [2] J. Ryan, T.H. Lê : "A quadrature-collocation technique for boundary element method : Application to helicopter fuselage". 12th ERF. Garmisch-Partenkirchen(RFA) 22-25 Septembre 1986. T.P. ONERA N^o 1986-124.
- [3] J. Ryan, T.H. Lê, Y. Morchoisne : "A Fourier boundary condition for panel method". Third GAMM Seminar Panel Methods in Mechanics. Kiel(RFA) 16-18 Janvier 1987. T.P. ONERA n^o 1987-28.
- [4] T.H. Lê, J. Ryan, Y. Morchoisne : "Application of a Fourier panel method to 3-D spoiler calculations". Paper AIAA-87-2417-CP. AIAA 5th Applied Aerodynamics Conference. Monterey(USA) 17-19 Août 1987. T.P. ONERA n^o 1987-120.
- [5] T.H. Lê, J. Ryan, G. Falempin : "Wake modelling for helicopter fuselage". 13th ERF. Arles 8-11 Septembre 1987. T.P. ONERA N^o 1987-145.
- [6] J.C. Nédélec : "Approximation des équations intégrales en Mécanique et en Physique" (Cours de l'Ecole Polytechnique, Juin 1977).
- [7] J.L. Hess, A.M.D. Smith : "Calculation of nonlifting potential flow about arbitrary three-dimensional bodies". Journal of Ship Research, Vol. 8 N^o 2, September 1964, pp.22-44.
- [8] H. Boillot, T.H. Lê : "Asynchronous I/O technics and block management". First World Congress on Computational Mechanics. Austin(USA) 22-26 Septembre 1986.
- [9] J. Ryan, T.H. Lê, Y. Morchoisne : "Panel code solvers". 7th GAMM. Louvain(Belgique) 9-11 Septembre 1987 . T.P. ONERA N^o 1987-139.

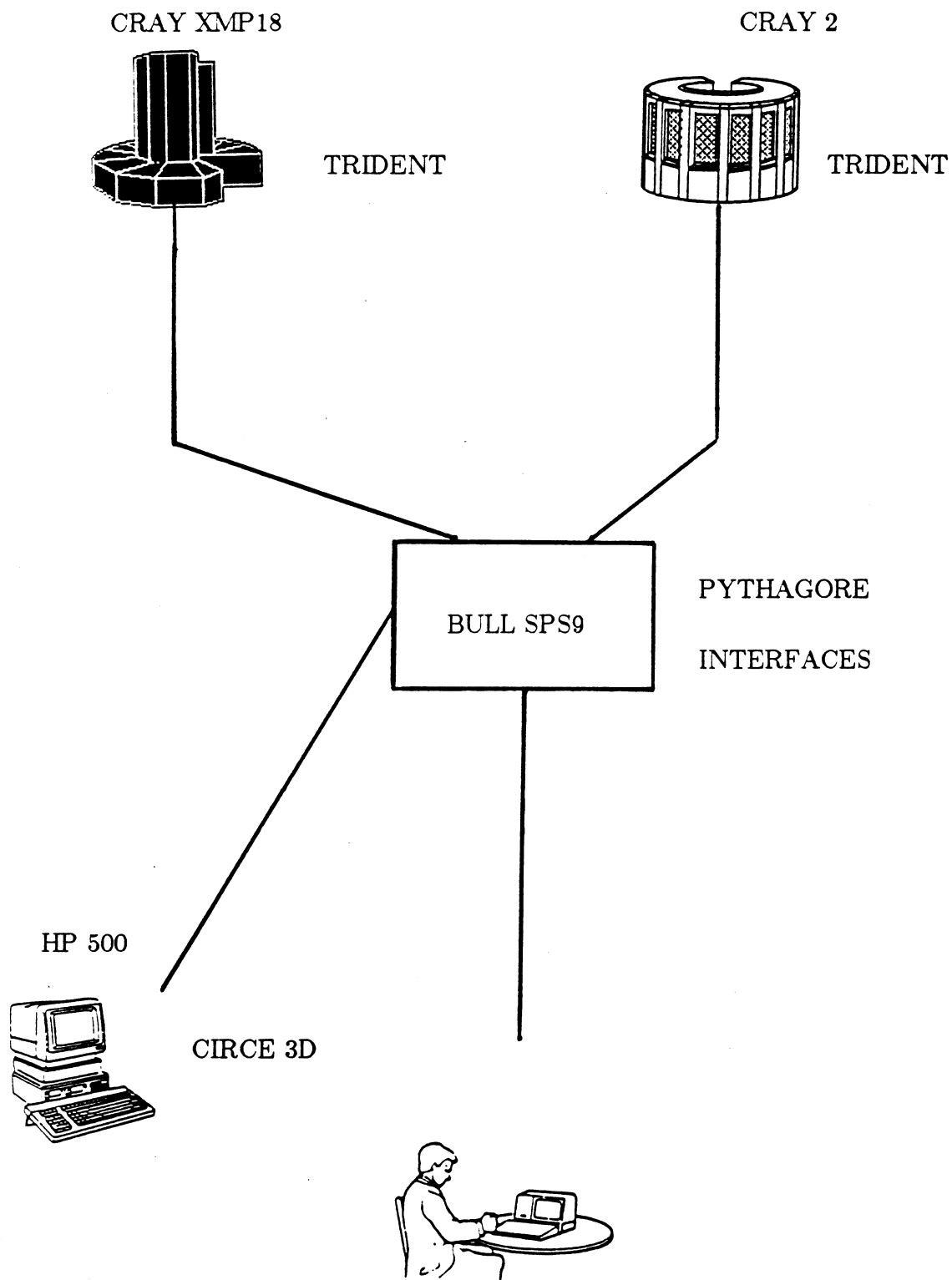


Figure 1 : Système informatique

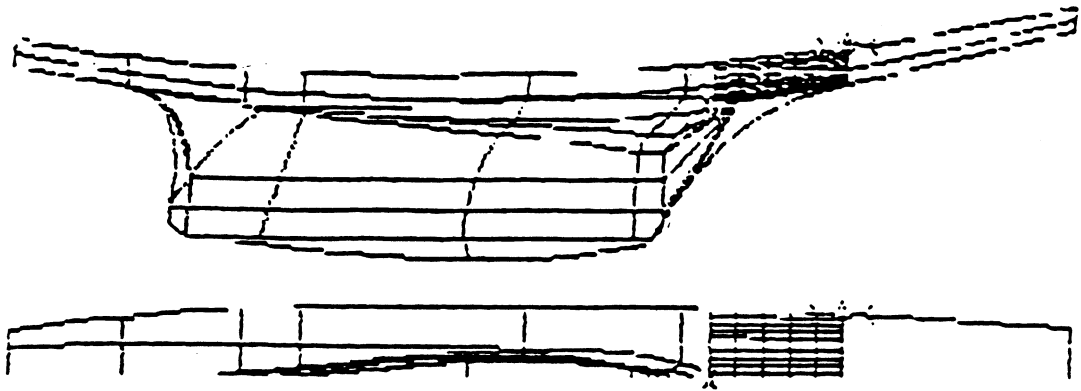


Figure 2 : Définition par lisses et couples

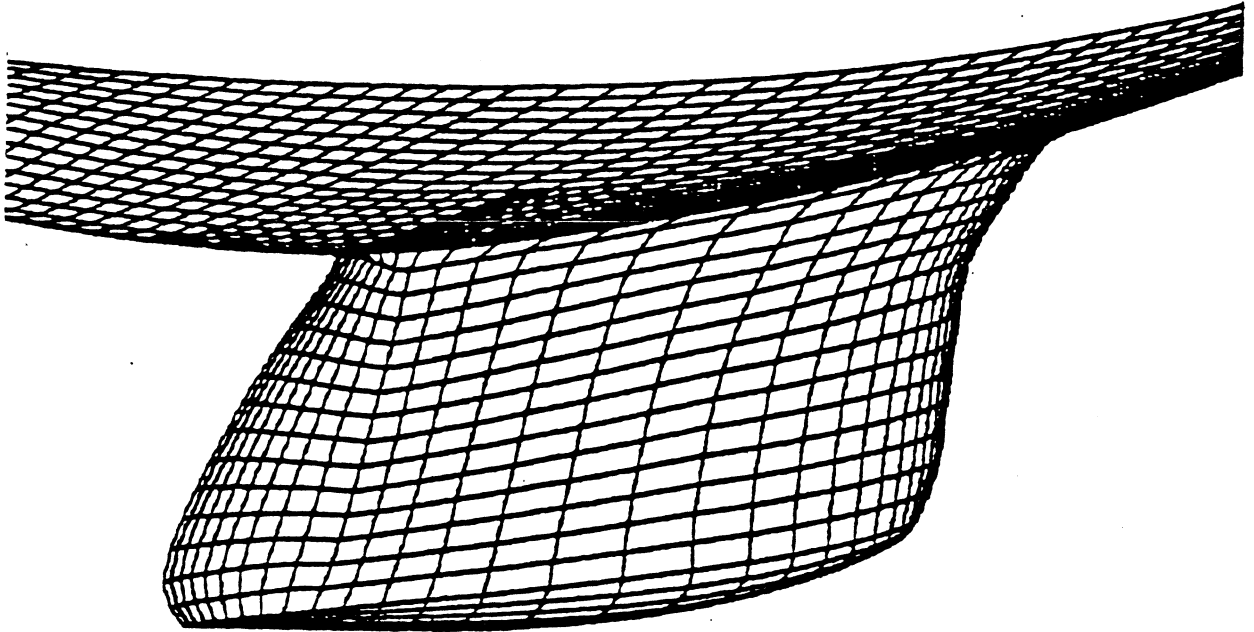


Figure 3 : Maillage par facettes

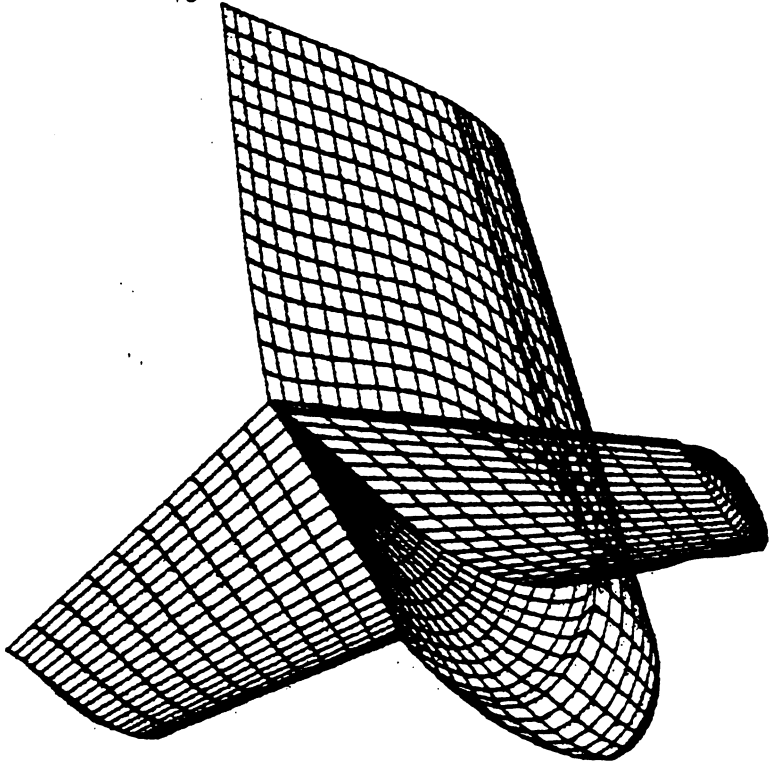


Figure 4 : Quille à ailettes - Maillage

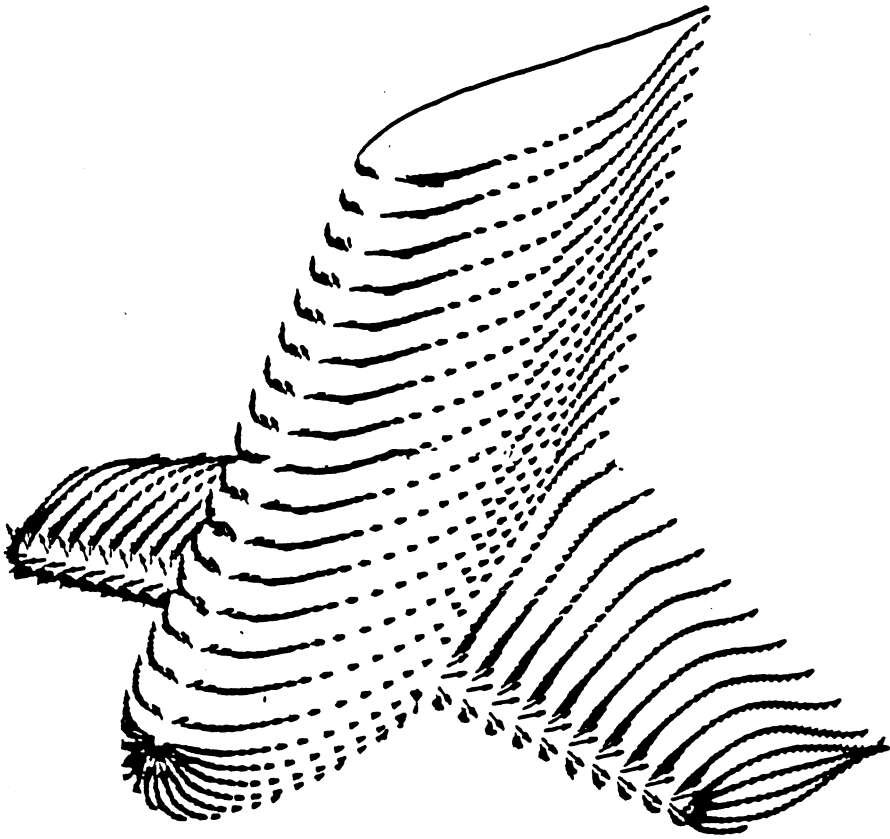


Figure 5 : Quille à ailettes - Répartition de vitesses

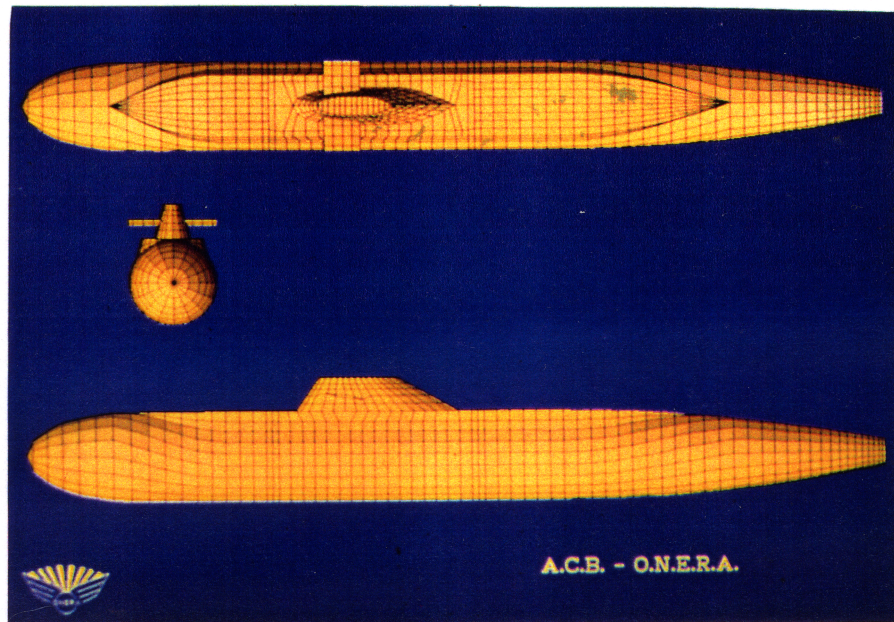


Figure 6 : Sous-Marin - Maillage

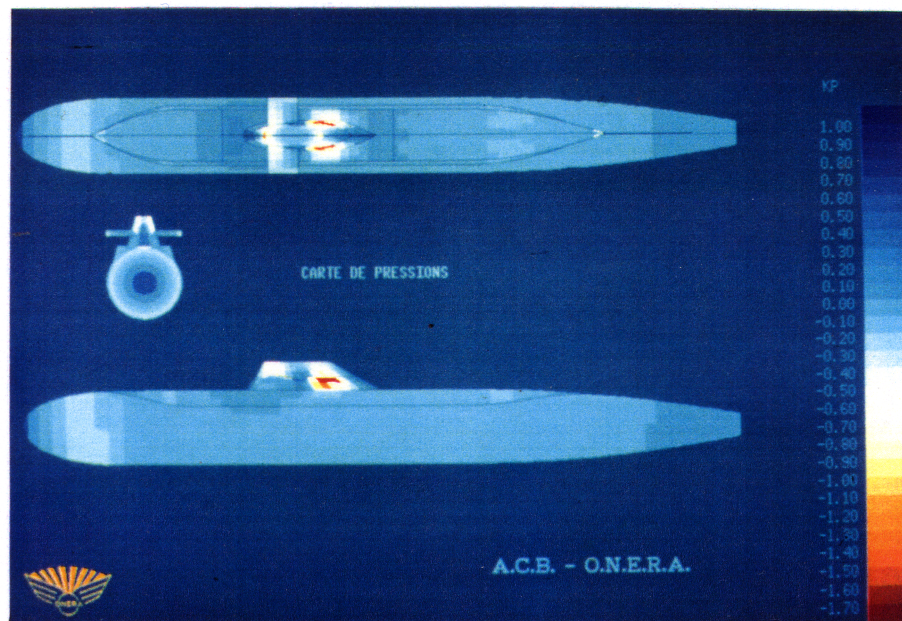


Figure 7 : Sous-marin - Répartition de pression