

Utilisation de données hydrographiques et de modèles mathématiques pour
l'étude hydrodynamique du Golfe de Thessaloniki (Grèce)

J. Ganoulis* and C. Koutitas**

* prof. d'Hydraulique, Faculté de Technologie, Université Aristote de Thessaloniki, Thessaloniki, Grèce

**prof. d'Hydraulique Maritime, Fac. de Technologie, Université Democrite, Xanthi, Grèce

Le Golfe de Thessaloniki est une région côtière Grécque très gravement polluée par les eaux usées domestiques et les rejets industriels. C' est un bassin peu profond, presque fermé, ayant une faible circulation d' eau, produite surtout par le vent et par les courants de marée secondaires. Le but de cette communication est la présentation des derniers résultats de l' étude systématique de la circulation du Golfe, entrepris par le Dép. d' Hydraulique de l' Université de Thessaloniki, dans le cadre du programme MED POL-VI/UNEP. L' étude a suivie deux voies:

- (a) Des campagnes hydrographiques systématiques ont été conduites, durant lesquelles la forme de la circulation en surface a été mesurée en utilisant des drogues et a été correlée à l' intensité et à la direction des vents.
- (b) Un modèle numérique original a été construit pour la circulation tridimensionnelle due aux vents et à la marée. L' algorithme combine efficacement les éléments finis avec les différences finies afin de décrire aisément la topographie du fond.

L' étalonnage du modèle mathématique et plus spécialement la distribution des viscosités - diffusivités turbulentes a été effectué en utilisant les résultats des mesures in-situ. Le but est de construire un modèle de prévision pour le transport des polluants, qui peut être appliqué à toute autre région côtière, limitée par des côtes et des limites de mer ouverte.

*
* *

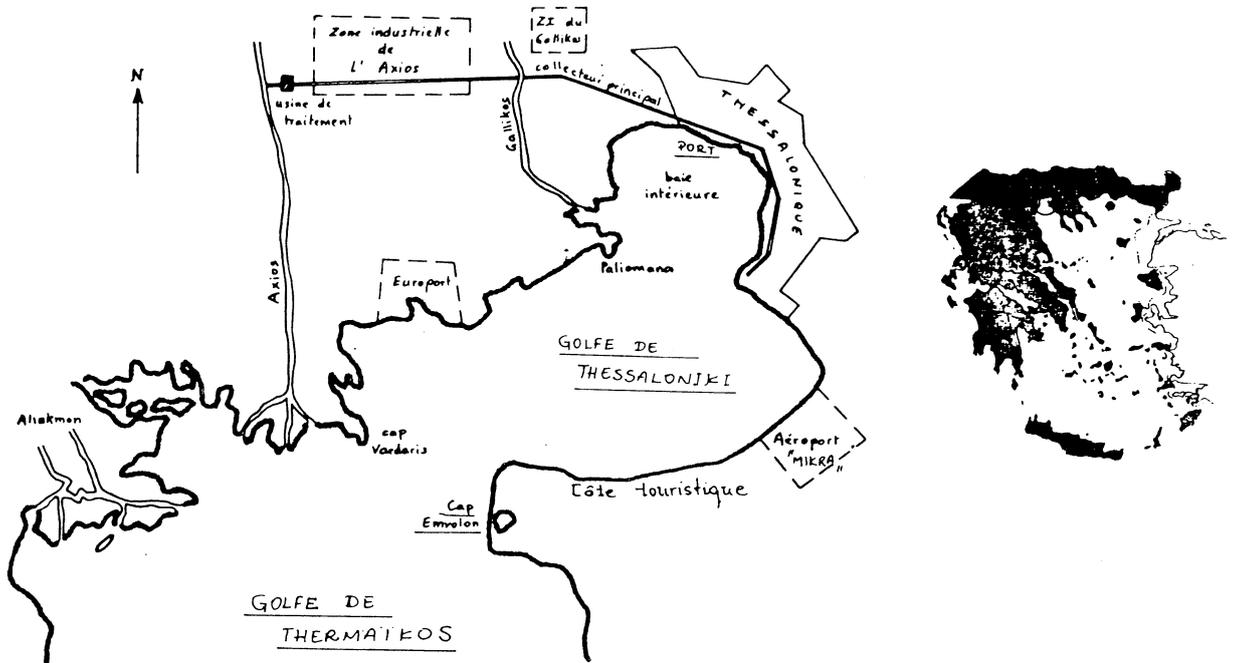


FIG. 1 Situation géographique du Golfe de Thessaloniki

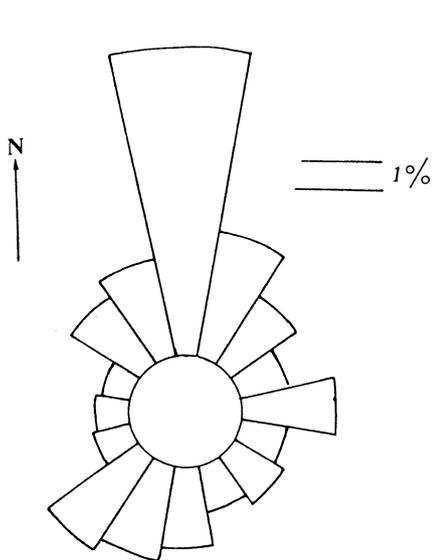


FIG. 2 : Fréquences annuelles des directions de vent

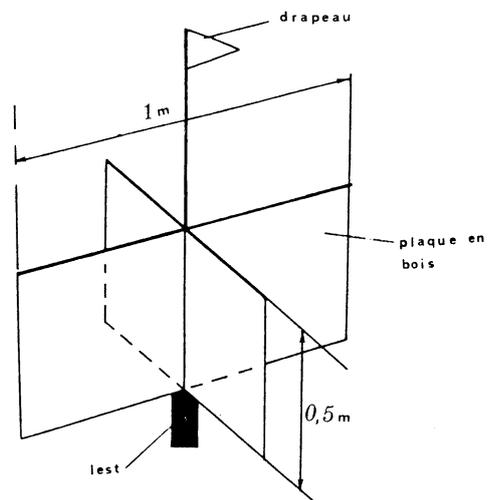


FIG. 3 : Forme et dimensions des drogues utilisées

I.- INTRODUCTION

Thessaloniki, deuxième ville de Grèce par sa population et ses activités industrielles affronte aujourd' hui de sérieux problèmes de pollution marine. La ville et son port important sont situés dans le nord du pays au fond du golfe de Thermaïkos, près des embouchures des deux grandes rivières de la Grèce du Nord: Aliakmon et Axios (fig. 1). Le transport intense de matériaux solides par ces rivières a conduit tout au long des siècles et des années à l' avancement de la terre et à la réduction de la taille de la partie nord du golfe, connue sous le nom de golfe de Thessaloniki. Cette partie de mer, qui s' étend entre les embouchures de l' Axios et du Cap Emvolon (fig. 1) jusqu' aux confins du port et des quais de la ville est aujourd' hui gravement polluée. Bassin presque fermé et peu profond, d' une profondeur moyenne de 20 m environ, il reçoit continuellement la totalité des eaux usées de la ville et des rejets industriels qui, sans traitement, sont déversés directement dans le golfe.

L' agglomération, qui compte aujourd' hui près de 800.000 habitants, est desservie par un réseau d' assainissement mixte, dont les collecteurs déversent les eaux usées et les eaux superficielles dans la baie intérieure, près du centre de la ville. L' activité industrielle, qui compte une raffinerie de pétrole, une aciérie, quelques industries chimiques, d' engrais et de papier est concentrée dans les zones industrielles, à l' ouest de la ville. C' est donc surtout dans la région nord-ouest du golfe où à cause des rejets industriels, la situation est devenue critique du point de vue de la pollution. Transportée par les courants marins, la charge polluante s' est étendue dans tout le golfe et aussi dans sa partie sud-est, entre l' aéroport de Micra et le Cap Emvolon (fig. 1), où la situation est particulièrement alarmante, à cause du caractère touristique de ces côtes.

Face à cette évolution du problème qui ne cesse que de s' aggraver l' administration a réagi. Au niveau des sources de pollution, un projet est actuellement en cours de réalisation, qui prévoit la collecte des eaux usées domestiques et des rejets industriels. Le collecteur principal après avoir traversé la ville (fig. 1), desservira les zones industrielles et aboutira près de la rivière Axios, où une station d' épuration est prévue. Les rejets seront ensuite déversés dans le golfe de Thermaïkos, par l' intermédiaire de l' Axios. Pour assainir la partie Est de la ville et les régions touristiques du sud-est du golfe, le projet prévoit un émissaire soumarin, qui sera posé près du Cap Emvolon.

Pour mieux comprendre le transport des polluants dans le golfe et afin de pouvoir calculer la dilution des rejets, il est indispensable de connaître l' aspect physique et hydrodynamique du mouvement des eaux. C' est dans le cadre du programme MED-POL, en collaboration avec l' UNEP et l' Agence Grecque pour la Recherche et la Technologie (YEET), que le Département d' Hydraulique de l' Ecole Polytechnique de l' Université de Thessaloniki, a entrepris depuis 1979, l' exécution du programme d' océanographie physique (MED-VI) dans cette région. Ce rapport résume les principaux résultats obtenus, concernant l' analyse et la modélisation des courants marins dans le golfe de Thessaloniki.

II.- LE PROBLEME PHYSIQUE ET METHODOLOGIE ADOPTEE

La circulation de l' eau dans le golfe est par sa nature un phénomène extrêmement complexe. Il s' agit d' un écoulement turbulent, tridimensionnel, dans un domaine de morphologie compliquée. Plusieurs incertitudes proviennent des conditions aux limites, mais aussi du côté des forces motrices de mise en mouvement de l' eau: l' action du vent en surface est de nature instationnaire et stochastique et les courants sont influencés en même temps, par la marée et les gradients de densité.

La région près des embouchures des rivières mise à part, la mesure de la densité à plusieurs points dans le golfe a montré que la masse de l' eau est presque uniforme. D' autre part, les mesures des fluctuations dues à la marée au voisinage du port montrent que la composante prépondérante est la M_2 , ayant une amplitude de l' ordre de 20 cm seulement. Nous pouvons donc estimer que sur le site de Thessaloniki les courants sont essentiellement générés par l' action du vent. Comme le montre le diagramme polaire de la figure 2, ce sont plutôt les vents du Nord qui sont les plus fréquents dans le golfe et aussi les plus violents.

Pour analyser la situation et pouvoir faire des prévisions au niveau de la planification de l' assainissement optimal de la ville, notre étude a suivie, dans le cadre du programme MED POL - VI (UNEP), deux methodologies principales (a) les mesures in situ et (b) la modélisation mathématique du phénomène, à l' aide d' un modèle numérique original à trois dimensions.

II.1 LES CAMPAGNES HYDROGRAPHIQUES

Pour mesurer les courants, nous avons utilisé dans un premier temps des drogues flottantes, permettant de visualiser l' allure du phénomène de manière très simple et suffisamment précise. La figure 3 montre la forme et les dimensions des dro-

gues adoptées, qui en général ont été plongées à la surface de l' eau. Durant chaque campagne hydrographique journalière, les trajectoires de l' eau en surface ont été enregistrées, en repérant sur la carte la position des drogues et le temps correspondant. Cette manière Lagrangienne de suivre le mouvement de l' eau permet de calculer la vitesse moyenne et sa direction, en connaissant la distance entre deux positions successives (fig. 4). Un système de radar a été utilisé sur le bateau de mesures afin de déterminer chaque fois la position des drogues [1].

Ces campagnes hydrographiques se poursuivent actuellement dans le but de couvrir tout le cycle annuel et afin de pouvoir corrélérer la vitesse et la direction du vent à la circulation de l' eau en surface. Ces corrélations ne sont pas faciles à obtenir à cause du caractère instationnaire du vent, mais déjà quelques conclusions partielles ont pu être tirées [1] en ce qui concerne la structure du mouvement des eaux. La figure 4 donne un exemple de trajectoires enregistrées pour un vent Nord-Ouest, de vitesse moyenne 6 m/s.

Pour avoir des informations plus quantitatives sur la circulation de l' eau à diverses profondeurs, quelques courantomètres de type "Aanderaa" vont bientôt être installés afin d' enregistrer en repère Eulerien la vitesse et la direction des courants. L' analyse spectrale des enregistrements, dont les codes de calcul ont été déjà composés, nous permettra de préciser davantage l' influence relative de la marée sur les courants dans le golfe.

II.2 MODELISATION NUMERIQUE ORIGINALE DE LA CIRCULATION TRIDIMENSIONNELLE.

La circulation générée par le vent est presque horizontale, mais les composantes de la vitesse $u(x, y, z, t)$ et $v(x, y, z, t)$ varient dans le sens de la profondeur, ce qui rend le phénomène essentiellement tridimensionnel. Si nous posons $\zeta(x, y, t)$ la surélévation de la surface libre et $h(x, y)$ la profondeur de l' eau, la conservation des quantités de mouvement et de la masse peut être exprimée à l' aide des équations suivantes:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(v \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_0^h u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_0^h v dz = 0 \quad (3)$$

où $f = 2\omega \sin\phi$ est le coefficient de Coriolis et ν la viscosité turbulente. Aux équations (1), (2) et (3) nous juxtaposons les conditions aux limites suivantes: (a) en

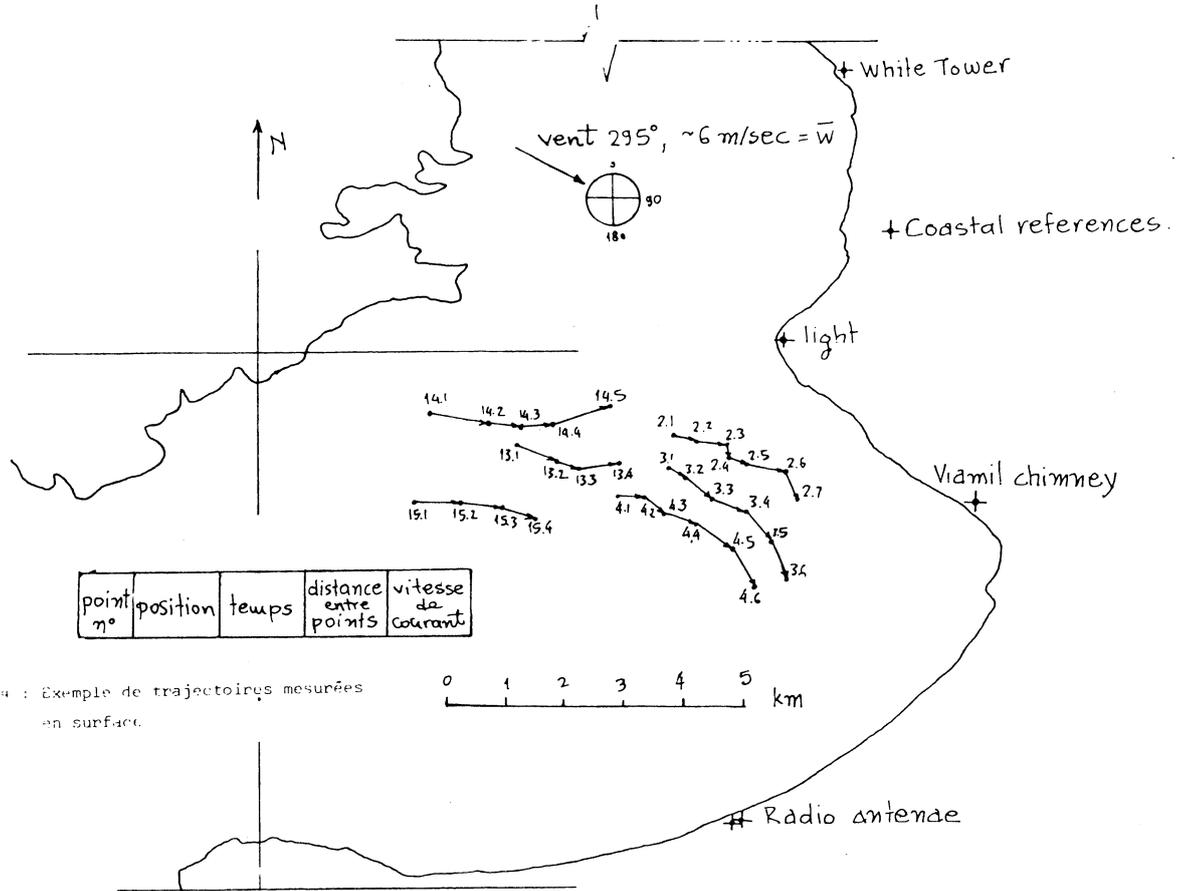


FIG. 4 : Exemple de trajectoires mesurées en surface.

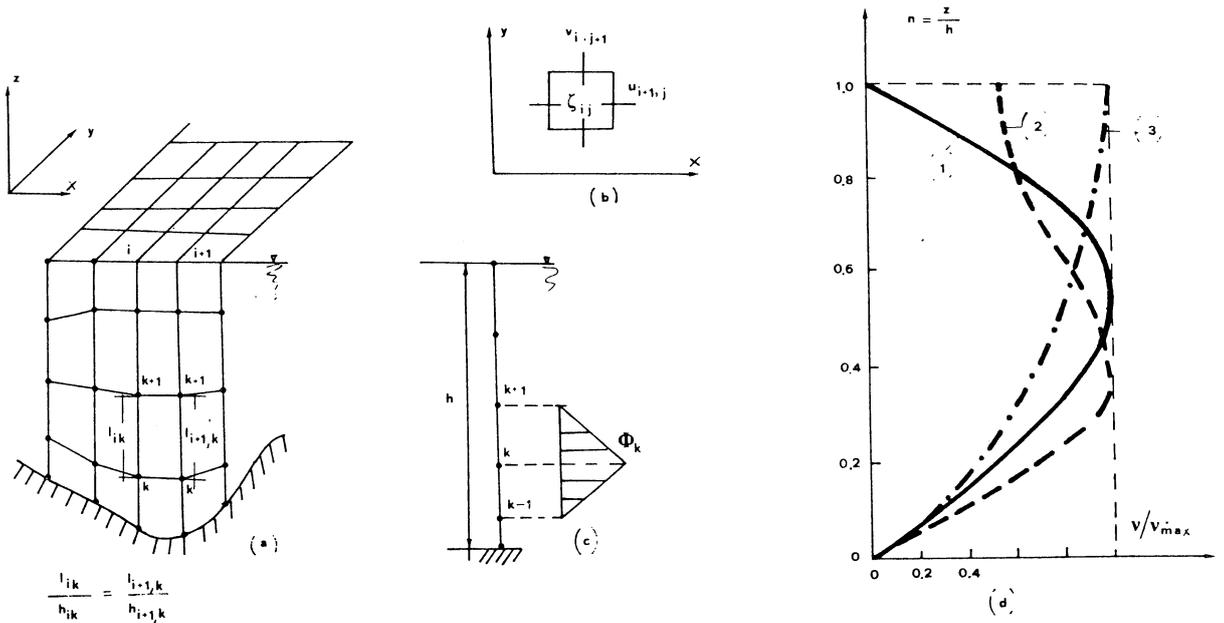


FIG. 5 : Définition des éléments finis verticaux (a), maillage décalé horizontal (b), fonction d'interpolation linéaire Φ_k (c) et trois formes différentes de distribution verticale de la viscosité turbulente adimensionnelle v/v_{max} (d).

surface libre la contrainte de frottement est celle produite par l' action du vent
 b) sur le fond de la baie les composantes de la vitesse sont nulles (c) le long des
 côtes, il y a glissement en annulant seulement la vitesse perpendiculaire à la côte
 d) sur les limites fictives de mer ouverte nous supposons que les fluctuations de
 la surface libre dues à la marée sont connues.

Pour intégrer numériquement les équations (1), (2) et (3) avec les conditions aux limites ci-dessus, nous avons construit un algorithme original, combinant les différences finies aux éléments finis basés sur la méthode de Galerkin. Cet algorithme présente deux caractéristiques essentielles: (i) en exprimant les vitesses inconnues sous forme de produits des fonctions de base et des coefficients inconnus, il permet d' éviter l' utilisation d' un maillage tridimensionnel (ii) il permet de tenir compte aisément de la topographie du fond, en contenant une transformation intrinsèque de l' écoulement réel à un écoulement à fond plat.

Dans le plan horizontal, le golfe est couvert d' un maillage orthogonal, dont chaque cellule a des dimensions 1 km X 1 km . C' est sur cette grille que les différences finies sont utilisées. La décomposition spectrale des vitesses inconnues peut être effectuée en faisant intervenir comme fonctions de base des fonctions trigonométriques [2]. Dans ce travail les fonctions de base sont les fonctions linéaires ϕ_k des éléments finis unidimensionnels (fig. 5c), ayant la forme:

$$\phi_k = \frac{z_{k+1} - z}{l_k} \quad , \quad l_k = z_{k+1} - z_k$$

Les coefficients inconnus sont les valeurs que prennent les vitesses sur les nœuds des éléments finis.

Sur les lignes verticales passant par les points caractéristiques où les vitesses u et v sont calculées, nous considérons des éléments finis unidimensionnels (fig. 5a). A chaque point de l' écoulement nous appliquons la décomposition:

$$\hat{u} = \sum_{j=k}^{k+1} \phi_j \left(\frac{z}{l_k} \right) u_j(x,y,t), \quad \hat{v} = \sum_{j=k}^{k+1} \phi_j \left(\frac{z}{l_k} \right) v_j(x,y,t) \quad (4)$$

où u_k , u_{k+1} et v_k , v_{k+1} sont les vitesses nodales inconnues. D' après la figure 5.a, les longueurs des éléments finis sont en similitude géométrique, selon l' expression:

$$\frac{l_{ik}}{h_{ik}} = \frac{l_{i+1,k}}{h_{i+1,k}} \quad \text{pour tout } i \text{ et } k \quad (5)$$

ce qui implique une transformation du domaine d' écoulement à un écoulement à fond plat.

En introduisant les expressions (4) dans les équations (1) et (2), les résidus R_{ex} , R_{ey} apparaissent, qui sont ensuite minimisés selon la méthode de Galerkin:

$$\int_0^h R_{ex} \phi_k dz = 0 \quad , \quad \int_0^h R_{ey} \phi_k dz = 0 \quad , \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

Dans le plan horizontal les variables sont définies en maillage décalé (fig. 5b). Plus de détails concernant la mise en oeuvre de l'algorithme sont donnés dans le travail [3]. Un point important concernant la valeur quantitative des résultats obtenus est la distribution verticale de la viscosité turbulente. La figure 5.d montre trois formes différentes de distribution, qui ont été testées au cours des expériences numériques. Dans le cas où la turbulence est générée en surface par l'action du vent, ce qui est le cas pour la circulation dans le golfe de Thessaloniki, nous avons trouvé que la distribution du type (1) de la figure 5.d, donne les résultats les plus significatifs.

III.- SYNTHESE DES RESULTATS

L'observation des courants in situ à l'aide des drogues flottantes ne a permis d'avoir une première image du phénomène physique. Quelques résultats partiels des campagnes hydrographiques concernant l'organisation de la circulation des eaux dans la baie et la corrélation entre les courants marins et le vent sont donnés dans le rapport [1]. Ce genre d'observations se poursuivent actuellement afin de couvrir toutes les situations possibles. Elles sont très utiles pour comprendre les mécanismes du phénomène physique et peuvent conduire, en combinaison avec le mc

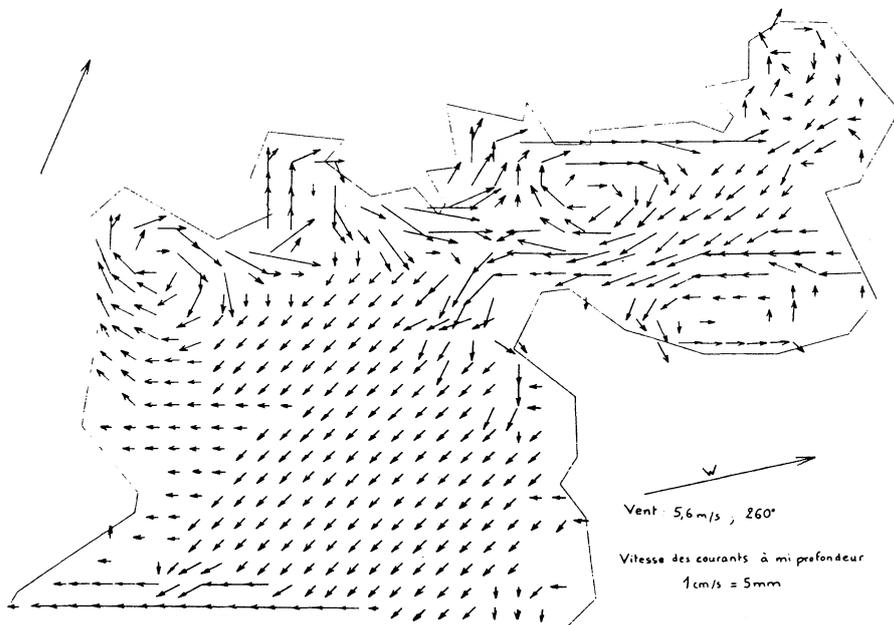


FIG. 6 Vecteurs - vitesse des courants calculés en surface

IV.- CONCLUSIONS

À l' aide d' observations simples du mouvement de drogues flottantes en surface, nous avons étalonné un modèle hydrodynamique à trois dimensions, capable de prévoir la circulation de l' eau dans le golfe de Thessaloniki. Cet étalonnage sera complété en mesurant les courants en profondeur à l' aide de courantomètres.

- L' algorithme numérique original composé de différences finies et d' éléments finis permet de calculer aisement un champ d' écoulement côtier tridimensionnel sur un fond irrégulier. Ce modèle couplé au modèle de la dispersion turbulente de polluants peut être appliqué à la prévision du système optimal d' assainissement de la ville de Thessaloniki.

REFERENCES

- [1] GANOULIS (J) : Hydrodynamic study of Thessaloniki bay area, Summary report, IOC/UNEP pilot project MED-VI (March 1980).
- [2] KOUTITAS (C): Numerical solution of the complete equations for nearly horizontal flows, Adv. in Water Res., Vol. 1, No 4, pp. 213-217 (1978).
- [3] KOUTITAS (C), O'CONNOR (B.A.): Modelling 3-D wind induced flows, J. ASCE HY (to appear, 1980).
- [4] GANOULIS (J), KOUTITAS (C), TOLIKAS (D): Review of in situ measurements and analytical methods for the prediction of the water movement in Thessaloniki bay, Greek-U.S. Working Conference on Oceanography, Egina 7-11 July 1980.