



UTILISATION DE CARTES-FLOTTEURS POUR L'ÉTUDE DES DÉRIVES DE SURFACE ET APPLICATION A LA PRÉVISION DES POLLUTIONS CÔTIÈRES

par **J.-N. PASQUAY**

Ingénieur en chef de l'Armement
Service Hydrographique de la Marine

et **J. BONNOT**

Ingénieur principal de l'Armement
Service Hydrographique de la Marine

Préambule

Depuis 1954, le Service Hydrographique de la Marine fait lancer à la mer de façon systématique, par l'ensemble des bâtiments de guerre, des cartes flotteurs.

Une carte flotteur, est tout simplement une carte postale placée dans une pochette plastique étanche qui sert de flotteur. Lancées à la mer par les bâtiments, ces cartes dérivent au gré des vents et des courants et finissent par atterrir à la côte.

Un certain nombre d'entre elles sont découvertes par des estivants, des promeneurs ou des pratiques locaux qui les renvoient au Service Hydrographique en signalant le lieu et la date de la découverte.

L'association point de lancement - point de découverte devait à la longue permettre l'étude des courants de surface et ceci fut pendant longtemps le but de ces opérations de lancement.

La catastrophe du *Torrey-Canyon* en mars 1967 ayant sensibilisé l'opinion sur ce fléau moderne qu'est la « marée noire », nous nous sommes demandés s'il n'y aurait pas moyen d'utiliser la carte flotteur pour prévoir les zones littorales menacées par une marée noire en cas de naufrage de pétrolier.

L'exploitation primaire de l'ensemble de l'information carte flotteur que nous possédions fut donc directement orientée vers cette application.

Nous verrons :

— comment cette exploitation nous a amené à organiser des campagnes périodiques de lancers simultanés ;

— et comment les résultats de ces campagnes utilisés comme moyen de réglage d'un modèle des côtes occidentales françaises permettent d'élaborer un schéma de la circulation de surface suffisamment intéressant pour que l'on puisse se demander si la carte flotteur, un peu anachronique et généralement méprisée, ne constitue pas en fait un moyen d'investigation océanographique de qualité.

L'information fournie par la carte flotteur Son archivage

1 La collecte.

Les lancers sont effectués de façon systématique tous les 200 milles en Méditerranée et en Atlantique nord par l'ensemble des bâtiments de la flotte.

Un lancer consiste à jeter à la mer dix cartes flotteurs à la fois. On note alors à bord les numéros des cartes lancées, la position et la date du point de lancement ainsi que l'état de la mer, la direction et la vitesse du vent.

Le personne qui retrouve une carte au rivage, note directement sur celle-ci le lieu, la date et l'heure de la découverte et la renvoie au Service Hydrographique de la Marine, ce qui ferme la boucle, les cartes étant imprimées et émises par ce dernier.

2 Le traitement.

Le seul élément permettant l'association entre la carte découverte et le lancer correspondant, est le numéro de la

carte. Autrefois cette association se réalisait par tri mécanique des cartes perforées issues des comptes rendus de lancement et de celles provenant du dépouillement des renseignements inscrits sur les cartes découvertes. Ce procédé a été abandonné depuis l'an dernier et la fusion est effectuée maintenant par l'ordinateur IBM 360-30 du Service Hydrographique. L'automatisation de cette opération a permis de constituer par ailleurs un fichier sur bande magnétique qui contient l'ensemble des lancers et des découvertes obtenus depuis 1954.

3 Le fichier.

3.1. — Il représente actuellement 26 450 lancers et 11 700 découvertes. On note ainsi à ce propos que le pourcentage global des découvertes est de 4,5 % environ. Il est actuellement plus fort et voisin de 10 % depuis que nous avons limité les lancers aux zones océaniques occidentales.

3.2. — Le fichier est constitué d'une succession d'enregistrements de 705 octets, chaque enregistrement qui correspond à un lancer peut être divisé en 11 sous-enregistrements :

- le premier décrivant le lancer;
- les 10 suivants correspondant aux 10 possibilités de découverte des différentes cartes lancées. On conserve de cette façon la liaison existant entre les différentes cartes d'un même lancer.

3.3. — Le passage sur bande magnétique a permis d'insérer sur celle-ci un certain nombre de renseignements qu'il n'était pas possible d'archiver de façon simple sur carte perforée :

a) Ainsi, à chaque point de lancer ou de découverte est associé de façon systématique le numéro de sous-carreau Marsden de 1° auquel appartient ce point.

Ceci permet en particulier de trier facilement et d'extraire ensuite les lancers par zones géographiques de 10° de côté ou de 1° de côté.

b) A chaque point de découverte, on a la possibilité d'inscrire en clair directement le nom du lieu le plus connu dans un rayon de 5 km, ce qui permet éventuellement une exploitation rapide et aisée d'un listing de la bande fichier.

c) Enfin pour chaque découverte on calcule la distance séparant le point de lancement du point de découverte, la durée de la dérive, enfin la vitesse moyenne en milles/jour.

3.4. — Par contre, et ceci représente une des particularités essentielles de ce fichier, les différents enregistrements de ce dernier sont *obligatoirement* rangés dans l'ordre des numéros croissants des cartes, cet ordre est en effet nécessaire pour réaliser la mise à jour du fichier à partir des cartes perforées correspondant aux lancements et découvertes, opération qui réalise l'association lancement-découverte. Nous butons là sur une des principales difficultés d'exploitation de ce fichier car sous cette forme il ne se prête à aucune forme d'exploitation.

Ainsi il est nécessaire avant toute opération d'exploitation de trier le fichier suivant des arguments de position ou d'époque si bien que la manipulation du fichier est assez gourmande en heures-calcul, les tris sur de grandes collections étant relativement pénibles sur IBM 360/30.

L'exploitation de l'information carte flotteur

1 Introduction.

L'accident du *Torrey-Canyon* et la marée noire qui a suivi ont montré de façon très nette que les nappes de mazout dérivait principalement en fonction du vent local.

Si l'on admet à priori que les cartes flotteurs dérivent de la même façon (nous verrons par la suite ce qu'il faut penser de cette hypothèse) les cartes flotteurs doivent permettre de répondre à la question suivante :

« Connaissant la position d'une nappe d'hydrocarbures, pouvons-nous prévoir quelles sont les zones littorales susceptibles d'être polluées ? »

Nous pouvons proposer à l'heure actuelle deux types de réponses :

- une réponse rapide et expéditive par le « Dictionnaire de la pollution » ;
- une réponse plus élaborée par un modèle de pollution faisant intervenir en particulier les prévisions météorologiques.

2 Le dictionnaire de la pollution.

2.1. — Le principe de la méthode utilisée est extrêmement simple. Il consiste à extraire du fichier la collection des cartes qui ont été lancées dans les sous-carreaux Marsden dans lequel se trouve la nappe et pendant le mois en cours. L'étude globale de la répartition par sous-carreau Marsden, des points d'atterrissage de ces cartes, permettra d'avoir une idée très approximative des zones menacées par cette nappe.

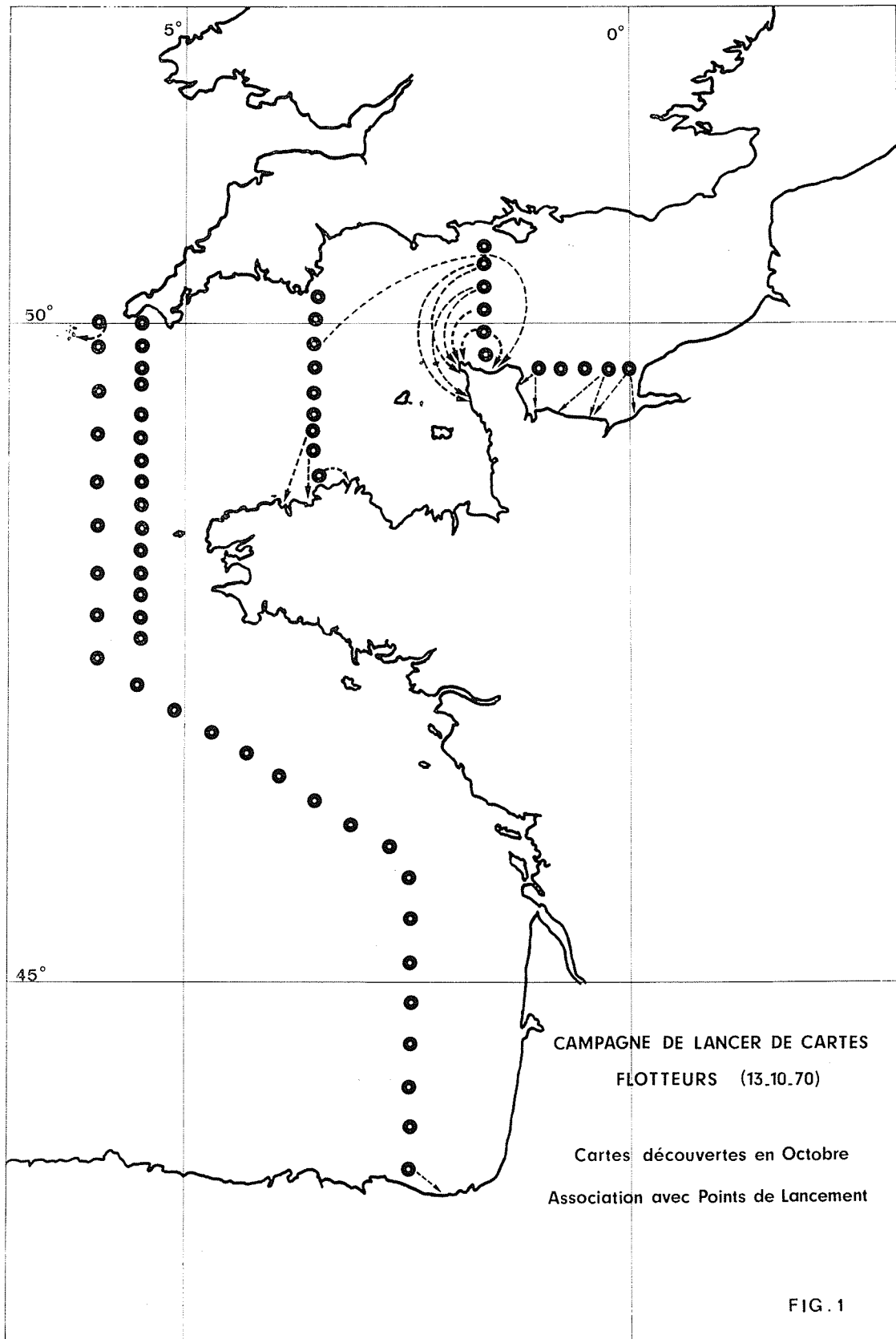
En effet, pour un mois donné et une zone donnée, on peut admettre que, si l'on dispose d'une collection suffisamment importante de cartes lancées et découvertes sur une période d'une dizaine d'années, tous les types de conditions météorologiques courants et même accidentels pour cette zone et ce mois ont influencé la dérive des cartes et par suite, la répartition des points d'arrivée de ces cartes le long de la côte est représentative d'une probabilité de pollution.

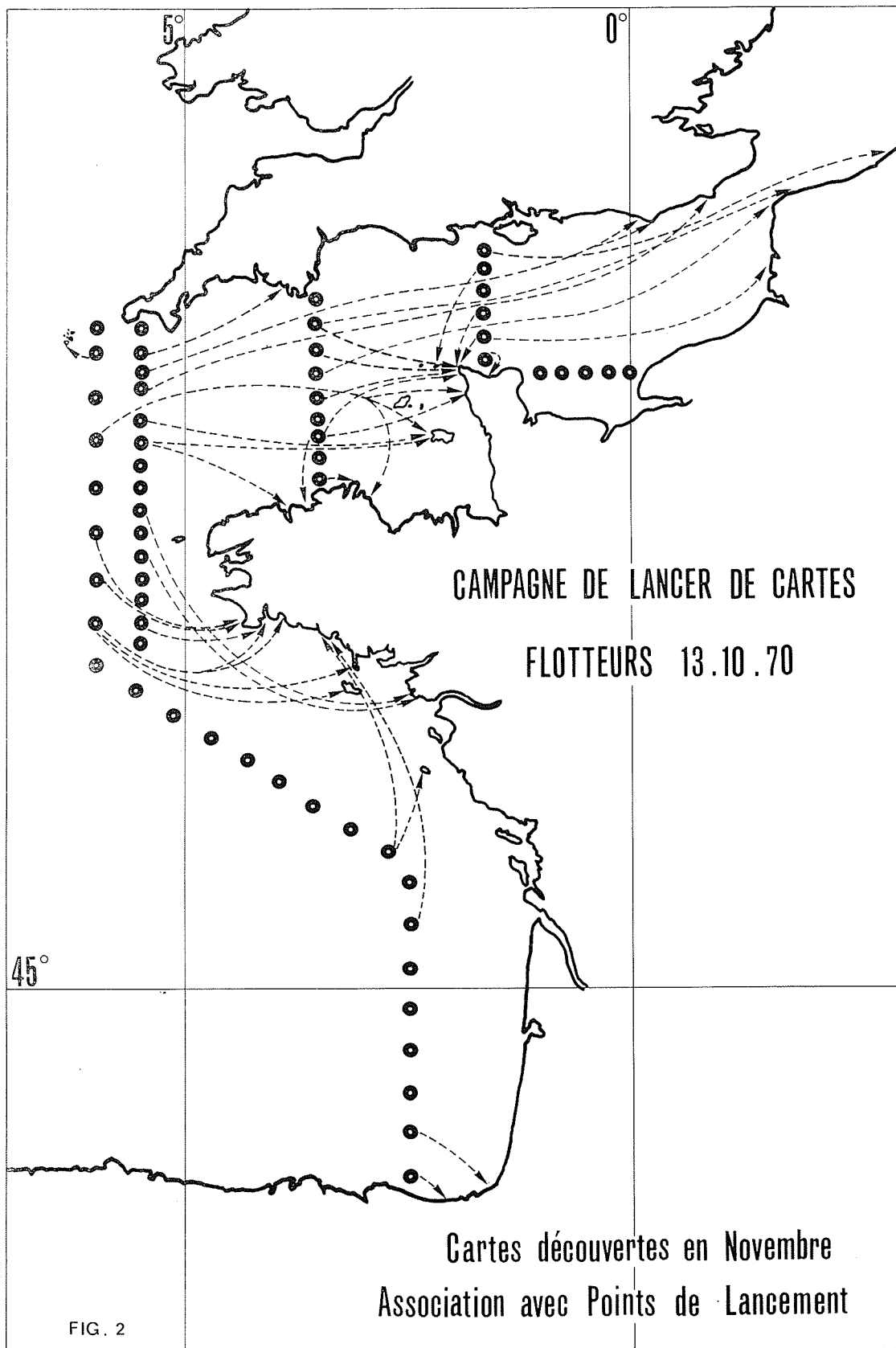
Actuellement le volume du fichier carte flotteur n'est pas suffisant pour obtenir ce résultat de façon valable. Toutefois il permet de fournir des indications précieuses, nous avons en particulier vérifié que les zones polluées par le mazout du *Torrey-Canyon* figurent bien sur la liste des zones menacées fournies de façon globale par le fichier.

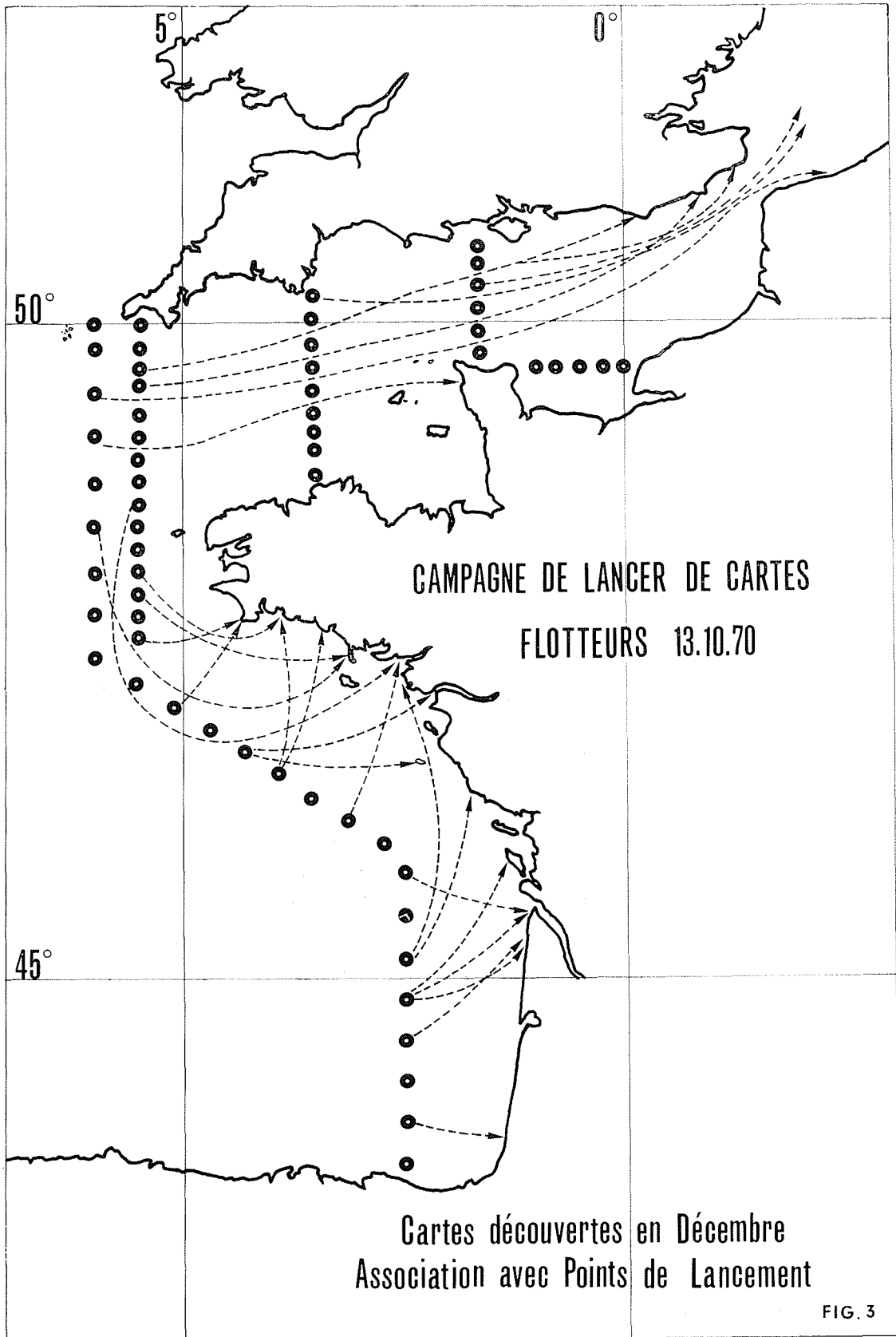
2.2. — Lorsqu'il y a naufrage de pétrolier et danger de marée noire, les mouvements de la nappe de mazout sont suivis de très près, de sorte que si l'on interroge le fichier pour les différentes positions de la nappe sur une dérive de plusieurs jours on peut espérer mettre en évidence des convergences qui indiqueront les zones les plus fortement menacées.

2.3. RÉALISATION PRATIQUE D'UNE PRÉVISION EXPÉDITIVE.

Les opérations de tri, d'extraction et de listing qu'il serait nécessaire de faire effectuer par l'ordinateur, en cas de sinistre, étant apparues trop longues et surtout trop onéreuses pour une simple prévision, nous avons confectionné à partir du fichier un document baptisé « Dictionnaire de la pollution ». Ce dictionnaire permet de formuler une prévision globale en quelques minutes.







En effet, il fournit sous forme de tableaux :

- le nombre de cartes lancées dans chaque sous-carreau par mois;
- la liste des sous-carreaux Marsden côtiers dans lesquels une partie de ces cartes a atterri en précisant pour chacun de ces sous-carreaux le nombre de cartes découvertes ainsi que la durée minimum des dérives.

Ce dictionnaire est refait chaque année. Sa fabrication par l'ordinateur ne nécessite qu'un temps machine à peu près équivalent à celui que demande l'exécution d'une seule prédiction à partir du fichier de base.

3 Modèle de dérive établi à partir de l'exploitation de campagnes de lancer de cartes flotteurs.

3.1 — Le principal inconvénient de la prévision expéditive, que nous venons de décrire, est de fournir la liste de toutes les zones menacées. Or il est bien évident que cette liste s'allonge en même temps que le fichier.

Pour affiner les prévisions, il faut faire intervenir les conditions de vent. Or il n'est pas matériellement possible de lier *a posteriori* les déplacements de toutes les cartes du fichier aux conditions météorologiques. Cela reviendrait à exploiter les observations de vents faites sur de vastes zones depuis seize ans !

D'où l'idée de restreindre ces études de dérive à un certain nombre de cartes lancées de façon simultanée en Manche et dans le proche Atlantique de façon à réduire le volume des données de vent à prendre en considération.

Un programme de campagnes systématiques de lancers simultanés a été démarré en 1970. Voyons sur celle du 13 octobre 1970, les études qui ont été menées et les premiers résultats obtenus.

La figure 1 indique les positions des cartes flotteurs découvertes dès le mois d'octobre, associées aux points de lancer. On voit que seules les cartes lancées en des points proches de terre ont été découvertes au cours des quinze premiers jours qui ont suivi le lancer. En particulier les cartes lancées sur le parallèle de Barfleur ont été toutes retrouvées sur le littoral de la Baie de Seine dès le mois d'octobre.

Avec le mois de novembre, on voit apparaître, sur la figure 2 des points d'atterrissage en Bretagne, en Angleterre et sur les côtes de Flandres et de Picardie. On remarque une ligne de séparation du « trafic » des cartes flotteurs sur le parallèle de l'Aberwrach. Les cartes parties au nord de ce parallèle entrent dans la Manche, celles qui partent au sud aboutissent sur la côte sud de Bretagne.

On constate que parmi les cartes flotteurs lancées au milieu du golfe de Gascogne, peu d'entre elles ont eu le temps d'atteindre la côte en novembre. Ce n'est qu'au cours du mois de décembre (fig. 3) qu'elles finiront par toucher terre.

Dans ce que nous venons de dire, *il n'est pas question de trajectoires de cartes flotteurs*, mais simplement d'association entre point de lancer et point de découverte.

Passons maintenant de ces simples constatations à une étude quantitative faisant intervenir les vents observés, étude qui nous permettra de trouver des *lois schématiques* de dérive et un modèle de courants permanents dans les zones traversées par les cartes flotteurs découvertes.

3.2. MODE DE CALCUL D'UNE TRAJECTOIRE DE CARTE FLOTTEUR.

3.2.1. Principe.

Pour l'étude de la trajectoire d'une carte flotteur on est amené à ajouter un vecteur courant de dérive (fonction du vent) à un vecteur courant permanent.

Pour le calcul du vecteur courant de dérive on peut utiliser le schéma d'Ekman ou un schéma voisin. Dans tous les cas nous admettons que le module du vecteur courant de dérive est proportionnel au module de la vitesse du vent.

Les courants permanents sont des *inconnues* qui sont déterminées de manière à ce que les trajectoires calculées passent, dans leur ensemble, aussi près que possible des points de découverte.

3.2.2 Programme de calcul.

On est parti de ces hypothèses simples pour établir un programme de calcul sur ordinateur de trajectoires de cartes flotteurs. Une représentation graphique de ces trajectoires sur table traçante a été réalisée.

Les données d'entrée utilisées sont :

- les vents régnant dans 80 sous-carreaux Marsden (carreau de 1°) ;
- le rapport $K = \text{module courant de dérive} / \text{module de vitesse du vent}$;
- la déviation A , angle entre la direction du vent et la direction de dérive. A est : soit une constante que l'on se fixe *a priori*, soit calculé avec la formule d'Ekman. Dans ce dernier cas, il faut faire intervenir la profondeur de frottement, ainsi que la profondeur moyenne de la mer par sous-carreau Marsden ;
- les coordonnées géographiques du point de lancer ;
- les courants permanents (inconnus au départ, déterminés par approximations successives).

Ce programme, très souple, a été utilisé pour l'étude des trajectoires de trente cartes flotteurs lancées le 13 octobre 1970 et récupérées avant le 27 novembre 1970.

Examinons plus en détail le travail de préparation et d'essai du programme.

3.2.3 Détermination des vents.

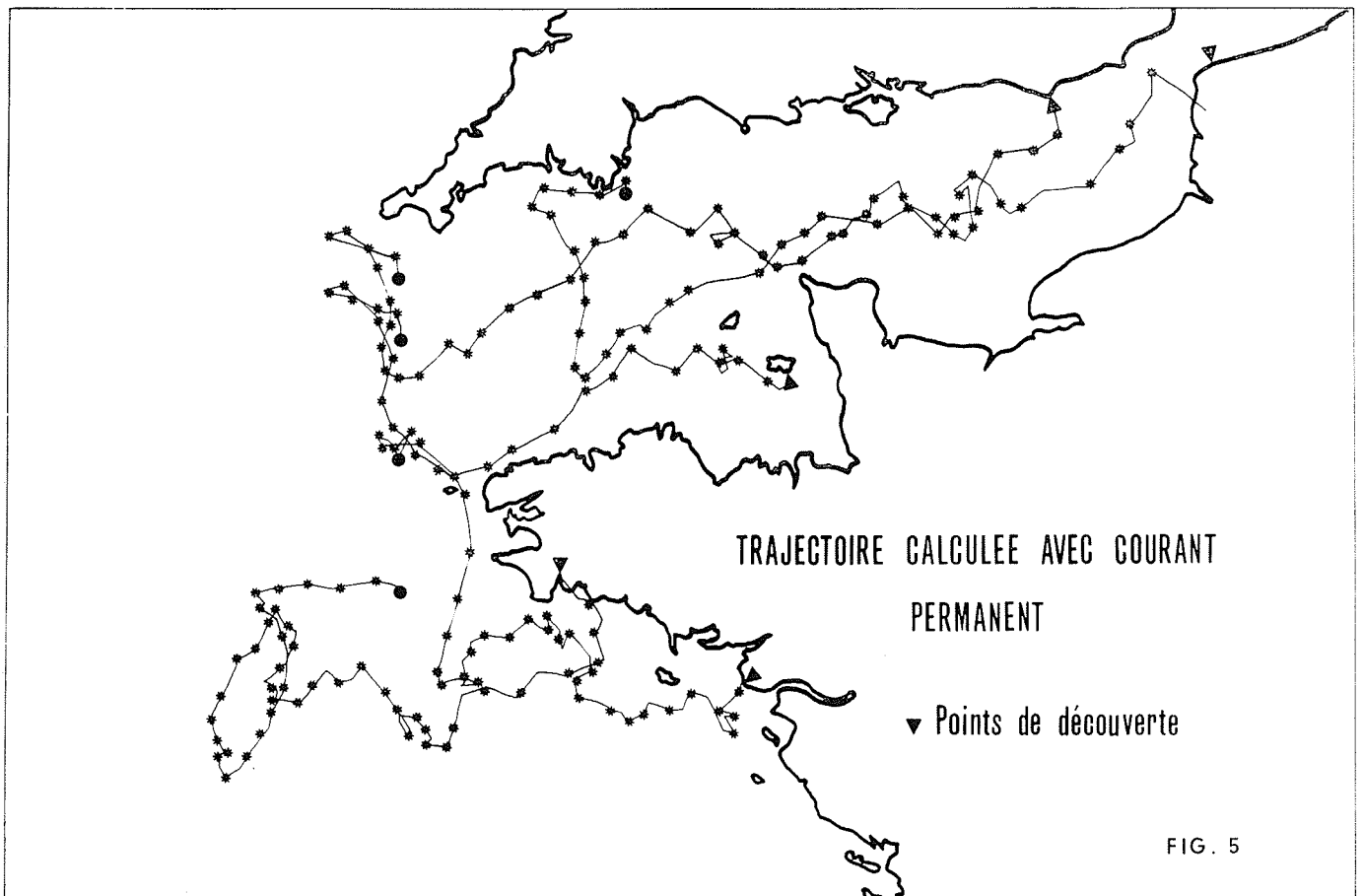
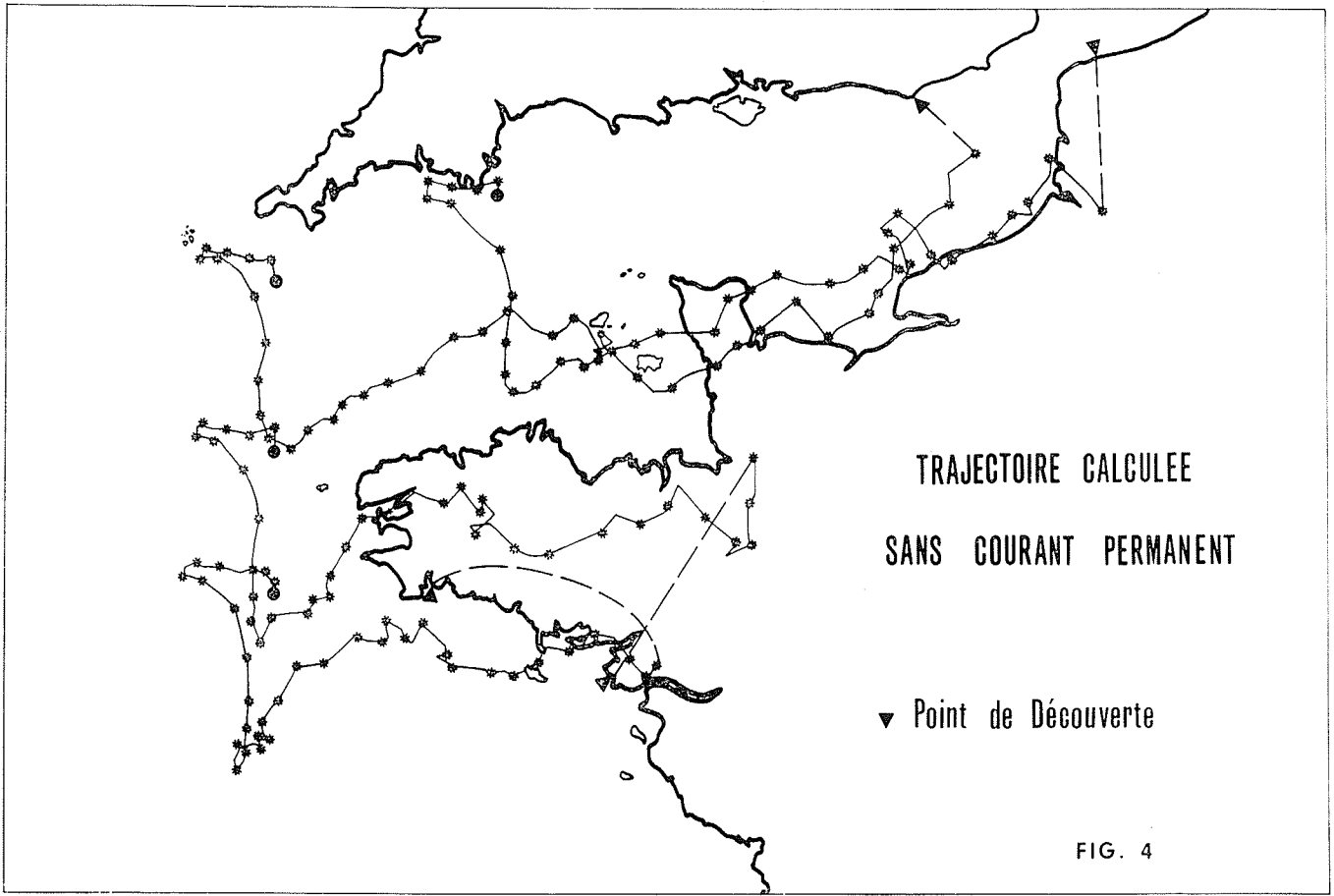
Des documents disponibles à la Météorologie nationale permettent de connaître, aux heures synoptiques, les mesures de vents faites chaque jour dans des stations côtières, à bord de bateaux-feux et de bâtiments à la mer.

Ces documents ont été dépouillés en ne s'intéressant qu'aux mesures faites à 6 h et à 18 h : on suppose que ces mesures sont représentatives des vents moyens sur une période de 12 h. Des interpolations ont été nécessaires pour représenter les vents dans chacun des 80 sous-carreaux Marsden. Aucune méthode rigoureuse n'étant pratiquement utilisable, ces interpolations ont été faites à vue.

Les observations en Manche étant denses, la méthode fournit vraisemblablement une appréciation valable des vents dans cette zone. Par contre, dans le golfe de Gascogne, les interpolations ont été plus délicates et les résultats sont certainement moins précis.

3.2.4 Détermination de K et A .

La théorie d'Ekman (en régime stationnaire) a d'abord été appliquée avec $K = 0,015$, et profondeur de frottement $D = 600 K \times V$, où V est la vitesse du vent en mètre par



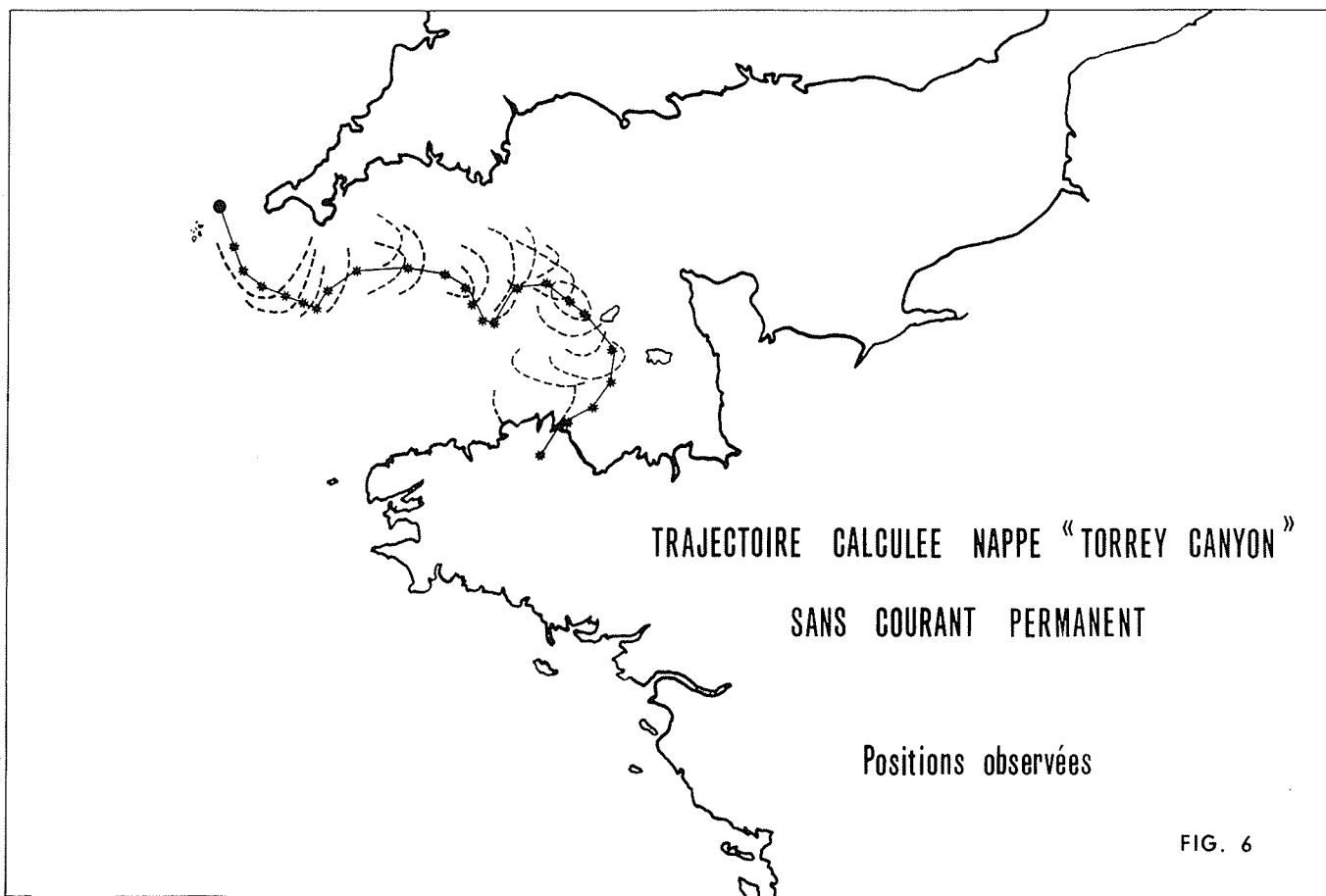


FIG. 6

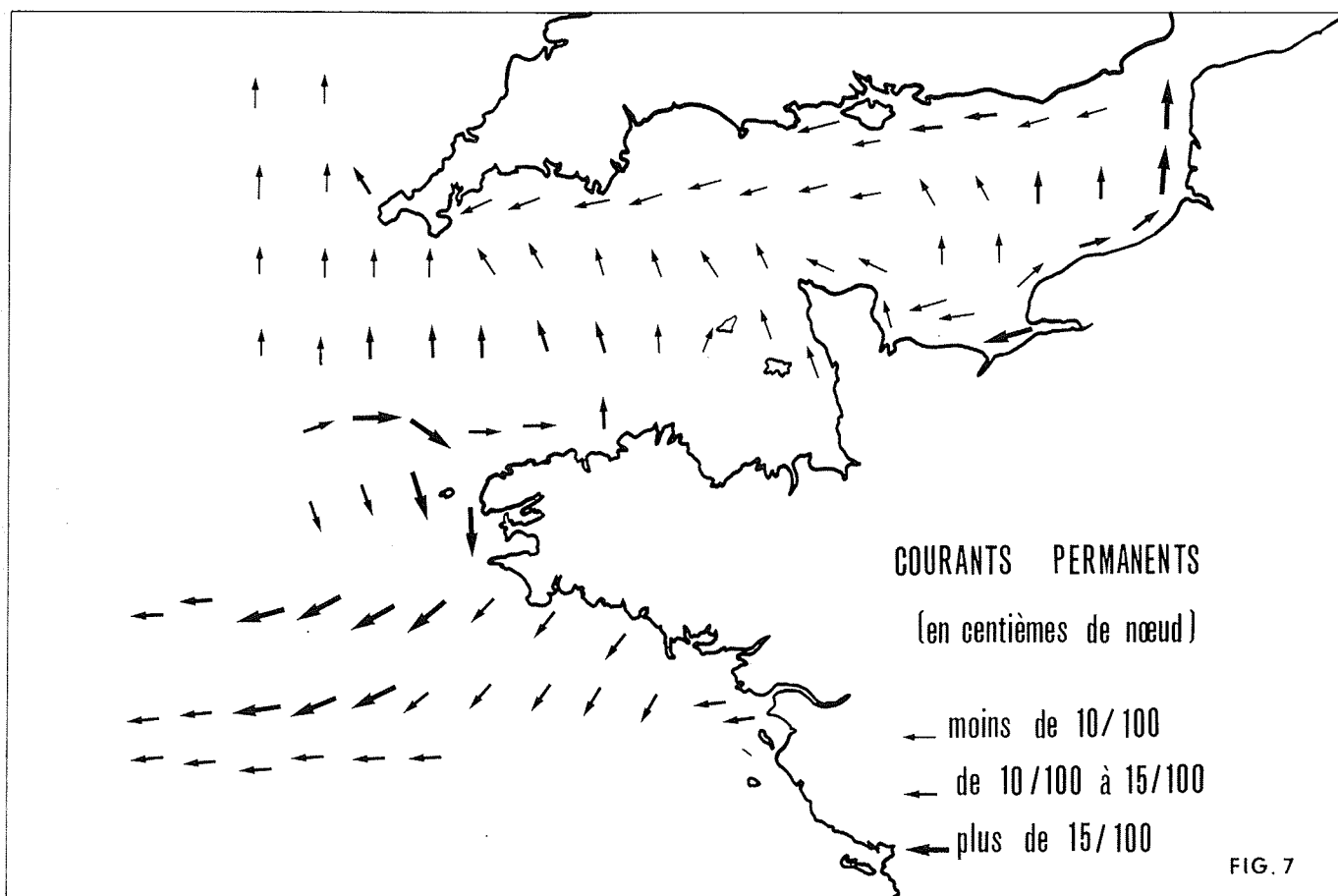


FIG. 7

seconde (voir Cours d'océanographie physique de M. Lacombe, p. 150). Les résultats sont décevants : pour faire parvenir les cartes au point de découverte, il est nécessaire de faire intervenir des courants permanents très importants masquant l'influence du vent, ce qui est infirmé par d'autres observations (notamment de la dérive des nappes de mazout). Il apparaît que K est trop faible et que, surtout en Manche, la déviation calculée est trop importante.

Les calculs effectués avec $K = 0,035$ et $A = 0$, les courants permanents étant supposés nuls, montrent que la plupart des trajectoires calculées aboutissent à droite du point de découverte, ce qui est en contradiction avec une éventuelle déviation vers la droite. Cette déviation, si elle existe, est très faible et ne pourra pas être mise en évidence (fig. 4). Ces valeurs de K et de A seront adoptées pour la suite de l'étude.

3.2.5 Détermination des courants.

On ne tient pas compte des courants de marée : on admet que leur influence au cours d'un cycle de marée (semi-diurne) est nulle.

Des atlas allemands et américains et les pilot-charts présentent des courants moyens à différentes époques de l'année.

Les courants permanents pourraient en être déduits en retranchant l'influence des courants de dérive dus aux vents moyens. Cette opération suppose que les vents moyens et les courants moyens soient connus avec une grande précision, ce qui n'est jamais le cas dans les documents existants, qui sont d'ailleurs très souvent en contradiction entre eux.

La suite de l'étude a consisté en la mise au point d'un modèle de courants permanents permettant de faire parvenir les cartes aux points de découvertes.

Ce travail « d'ajustement » a été fait par approximations successives. Le modèle proposé est présenté sur la figure 7. Toutes les trajectoires calculées à l'aide de ce modèle passent à moins de 10 milles marins du point de découverte, ce qui peut être considéré comme satisfaisant, compte tenu de l'incertitude sur les vents et du découpage arbitraire par carreaux de 30 mn (on est obligé d'introduire des discontinuités artificielles).

3.3 DISCUSSION.

Les résultats obtenus ne constituent nullement un rejet de la théorie élémentaire d'Ekman qui a fait l'objet de vérifications expérimentales, notamment par M. Lacombe, à bord de la bouée-laboratoire, mais à notre connaissance, aucune étude de ce genre n'a été faite au voisinage immédiat de la surface. Rappelons de plus que la théorie élémentaire d'Ekman s'applique en mer ouverte et en régime stationnaire. Par ailleurs, au voisinage immédiat de la surface, les vagues, dont ne tient pas compte la théorie d'Ekman,

jouent un rôle prépondérant. Ceci pourrait peut-être expliquer la dérive des cartes dans le lit du vent.

Les résultats les plus récents du nivellement général de la France, indiquent que le niveau moyen de la mer à Dunkerque est au-dessus du niveau moyen de la mer à Cherbourg, c'est-à-dire que la surface moyenne de la Manche orientale présente une pente par rapport aux surfaces équipotentielles de la pesanteur. Il doit normalement en résulter un courant portant au N.N.W. d'environ 0.05 nœud, ce qui est en accord avec le champ du courant que nous avons trouvé.

Par contre, toujours selon le nivellement général de la France, il y aurait une singularité à l'extrémité ouest de la Bretagne, le niveau moyen à Brest est plus haut qu'à Cherbourg. Le tourbillon mis en évidence au large de Brest semble effectivement indiquer un « point haut » à quelques dizaines de milles à l'ouest de Brest.

Conclusion

1 Trajectoires des nappes de mazout et trajectoires des cartes flotteurs.

La question fondamentale qui se pose est la suivante : le schéma de dérive des cartes flotteurs peut-il expliquer les trajectoires réelles des nappes de mazout?

On a pris pour exemple les déplacements observés de la nappe de mazout issue du naufrage du *Torrey-Canyon* (fig. 6). A partir des observations du vent faites journellement sur zone après l'accident, nous avons reconstitué la trajectoire schématisée en supposant le courant permanent nul. On voit que cette trajectoire n'est pas totalement confondue avec le lieu du point central de la nappe de mazout. Un courant de 0.05 à 0.10 nœud (ordre de grandeur que nous avons obtenu par l'étude des trajectoires des cartes flotteurs) portant au nord, donne une bonne coïncidence moyenne de deux lieux.

2 Perspectives.

Il est trop tôt pour que l'on puisse indiquer nettement les perspectives en matière de prévision de dérive des nappes de mazout.

De nombreuses campagnes de lancer sont encore nécessaires afin de vérifier si les schémas de calcul et les modèles de courant établis sont suffisants pour une telle prévision. N'oublions pas que les prévisions de vent, qui sont le point de départ de tout calcul, ne sont pas aisées même à court terme (quelques jours). Elles sont l'affaire de la Météorologie.

Il semble cependant que les premiers résultats obtenus sont de nature à encourager la poursuite de l'effort.

Voir la Discussion à la page suivante

M. le Président remercie MM. BONNOT et PASQUAY de leur intéressante communication et ouvre la discussion.

M. de ROUVILLE pose la question suivante :

Les conférenciers ont-ils essayé de comparer leurs résultats et théories avec l'expérience acquise par la recherche des aviateurs américains en dérive à la surface du Pacifique pendant la seconde guerre mondiale, compte tenu de ce qu'un canot flottant n'est pas identique à une carte lancée dans l'eau ?

En effet, répond M. PASQUAY, un canot offre une prise au vent non négligeable et cela produit une dérive bien plus importante que celle à laquelle sont soumises nos cartes-flotteurs. De plus, en Manche, nous ne sommes pas en « mer ouverte » et profonde comme cela est généralement le cas dans le Pacifique.

M. STERLING s'étonne de ce qu'il n'ait pas été tenu compte de l'influence de la marée dans les essais relatés; il a retenu de ses propres essais sur modèle que les trajectoires suivies par des cartes flotteurs fictives observées de demi-heure en demi-heure étaient très complexes et certainement pas « stationnaires ».

Nous avons admis, en effet, répond M. PASQUAY, qu'au bout d'un cycle de marée, en raison du caractère alternatif du courant dans la Manche, le flotteur revenait à son point de départ. Cela n'est pas tout à fait exact mais est admissible si l'on s'intéresse à l'effet de la circulation générale et à la dérive à l'échelle d'un mois ou d'un mois et demi. Cela ne serait plus possible pour une nappe de mazout située à une dizaine de miles de la côte car cette dernière pourrait être atteinte en une seule marée.

M. CHABERT D'HIERES apporte les précisions suivantes :

En ce qui concerne les courants permanents dont a parlé M. PASQUAY, on doit rappeler les courants que l'on observe sur le modèle réduit de la Manche, construit sur la plaque tournante de Grenoble. Le modèle ne donne que les courants moyens le long d'une verticale mais on peut constater qu'il y a concordance des résultats, en baie de la Seine et en Manche occidentale. La concordance est passable le long des côtes anglaises. Par contre, les résultats sont de sens opposé au large de Cherbourg et Barfleur.

D'autre part, l'abaissement des eaux dans la région de Cherbourg s'explique parfaitement par les effets dynamiques de la marée pour laquelle cette région est une région nodale d'amplitude. Les courants y sont très importants. On démontre, et le modèle réduit le vérifie très bien, que les effets du second ordre d'approximation engendrent un abaissement du niveau moyen.

M. PASQUAY observe que les conditions de vent extrêmement variables même au cours d'une même saison jouent un rôle essentiel dans la dérive et la prédiction des déplacements des flotteurs.

Pourquoi la mer est-elle plus haute à Dunkerque qu'à Cherbourg, demande M. CABANNES ? M. CHABERT D'HIERES en a donné, dit M. PASQUAY, la raison principale liée à la dynamique des mers. Mais d'autres phénomènes peuvent intervenir pour expliquer la pente quasi permanente observée du Danemark vers l'Espagne. Cette pente est, en partie, due au fait que la pression atmosphérique dans le nord de l'Europe est *en moyenne* inférieure à celle existant dans le sud. La distribution des densités et des températures dans l'eau de mer doit aussi intervenir.

Un échange de vues intervient alors entre M. le Président, M. PASQUAY et M. REMENIERAS sur la possibilité de prévoir la trajectoire d'une nappe polluante à partir des résultats fournis par les lancers de cartes-flotteurs. Il en ressort que le nombre et la densité des observations sont encore trop faibles pour émettre à l'intention du grand public des prévisions sur ce genre de phénomène; mais les résultats, d'ores et déjà obtenus, sont précieux pour les spécialistes et se préciseront en même temps que les prévisions météorologiques.

Quel est le rapport entre le module du courant permanent moyen (courant total) et celui du courant de dérive, demande M. le Président ?

Le rapport k entre la vitesse du courant de dérive et la vitesse du vent a été trouvé égal à 0,035 environ (la composante de dérive est égale à 3,5 % de la vitesse du vent) alors qu'il était estimé classiquement à 0,015 (en mer ouverte, il est vrai).

Personne ne demandant la parole, M. le Président clôt la discussion en remerciant tous ceux qui ont contribué à l'animer.

