



Jacques Bbl

CENTRE D'APPUI SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE
DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

RENCONTRES EPFL-ECONOMIE

Des compétences EPFL naviguent avec "MERIT" autour du monde

Judi 23 janvier 1992, 13h30 - 17h30

EPFL-Ecublens, auditoire CE 4

DOSSIER

Météorologie, optimisation de la route

**Jacques Ambuhl,
Institut suisse de météorologie
Service de prévision pour la Suisse romande**

1. Introduction

Le terme de *routage* recouvre l'ensemble des méthodes conduisant à déterminer la trajectoire d'un vaisseau en satisfaisant un critère optimal, qui peut être celui de la plus grande vitesse, de la consommation minimale de carburant, de la hauteur minimale des vagues. Dans le cadre de la course hauturière, c'est naturellement la durée minimale de parcours qui est retenue et, de la foule des paramètres susceptibles d'influencer la route d'un voilier, trois au moins sont indispensables :

La désignation formelle de la route, incluant les points de départ et d'arrivée ainsi que les obstacles géographiques devant être impérativement contournés (caps).

Les performances intrinsèques du voilier, caractérisées par sa *polaire*, diagramme spécifiant l'enveloppe des vitesses maxima à chaque allure et pour chaque force du vent.

Les champs météorologiques, spécifiant les vents soufflant à la surface de la mer en chaque instant de la course sur toute l'aire géographique sur laquelle une route est susceptible d'être choisie.

D'autres critères, tels que l'amplitude et l'orientation des vagues ou les courants marins, n'ont pas été retenus dans le cadre du présent travail.

Enfin, un processus d'optimisation doit être engagé, permettant de déterminer une route de durée minimale satisfaisant les contraintes géographiques, exploitant au mieux les caractéristiques du voilier et les développements météorologiques. La *programmation dynamique*, méthode classique de recherche opérationnelle conduisant à déterminer une *séquence de décisions optimales*, a été retenue.

Trois approches ont été successivement envisagées :

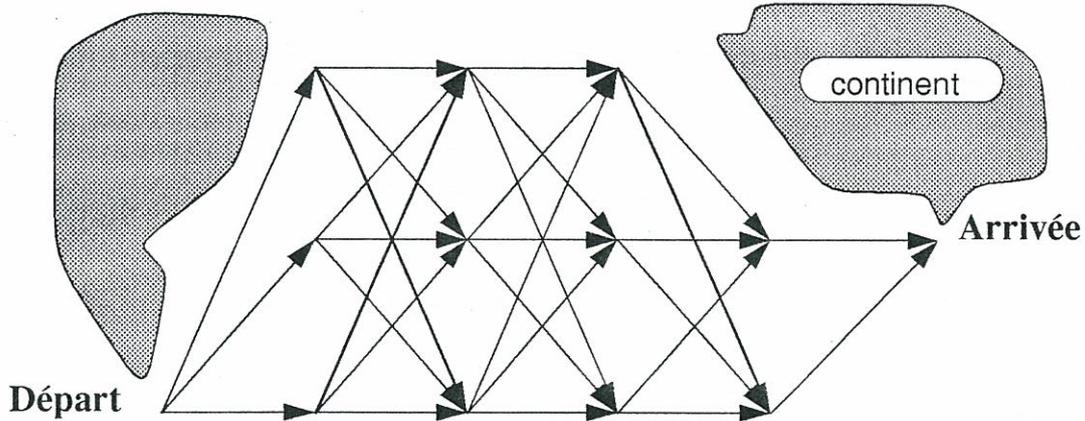
L'*approche climatologique*, fondée sur la simulation de courses à partir de situations météorologiques du passé, développée dès 1985 et utilisée pour UBS-Switzerland. Semi-heuristique, cette approche permet de discerner, à l'examen des cartes simulées, les options de course devant être envisagées.

Le *routage temps réel*, par lequel l'ensemble du dispositif est subordonné à un modèle numérique de prévision du temps. Le routeur, à terre, calcule chaque jour une séquence de décisions qu'il communique au skipper en course. Ce dispositif a fonctionné en 1987-89 avec Malboro (ex UBS-Switzerland).

L'*évaluation de la polaire*, variante de l'approche climatologique où l'on simule une course avec différentes polaires en espérant discerner la meilleure d'entre elles. Celle-ci est alors communiquée à l'architecte naval, avec le mandat de construire le voilier incarnant cette polaire. C'est l'approche retenue pour Merit, en parallèle avec l'approche climatologique.

2. Le graphe

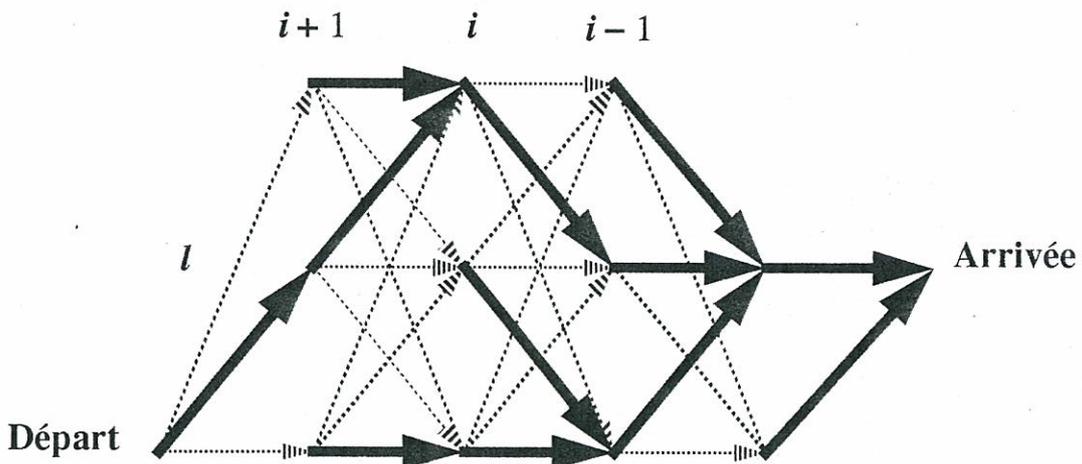
La région océanique sur laquelle une route est susceptible d'être choisie est recouverte d'un graphe analogue à celui qui est présenté ci-dessous. Composé d'une chaîne de graphes bipartis complets, il décrit *un ensemble fini de routes* liant un sommet de départ à un sommet d'arrivée. La surface couverte par le graphe est choisie "à la main" avant la course.



Du point de vue géométrique, les sommets du graphe sont sur la surface de la sphère terrestre et les arcs qui le composent sont des arcs de grands cercles (orthodromies).

3. Le processus de décision

Le processus de décision construit dans le graphe *un arbre* enraciné au sommet arrivée, formé de *toutes les routes de durées minimales convergeant à l'arrivée*. Une unique route conduit de chaque sommet à l'arrivée. Celle qui a le sommet de départ pour origine est la route cherchée.



L'algorithme construit cet arbre en sens rétrograde, de l'arrivée en direction du départ: désignons par i l'indice des colonnes du graphe, l celui des lignes et appelons :

T_{il} l'heure de passage du voilier au sommet il

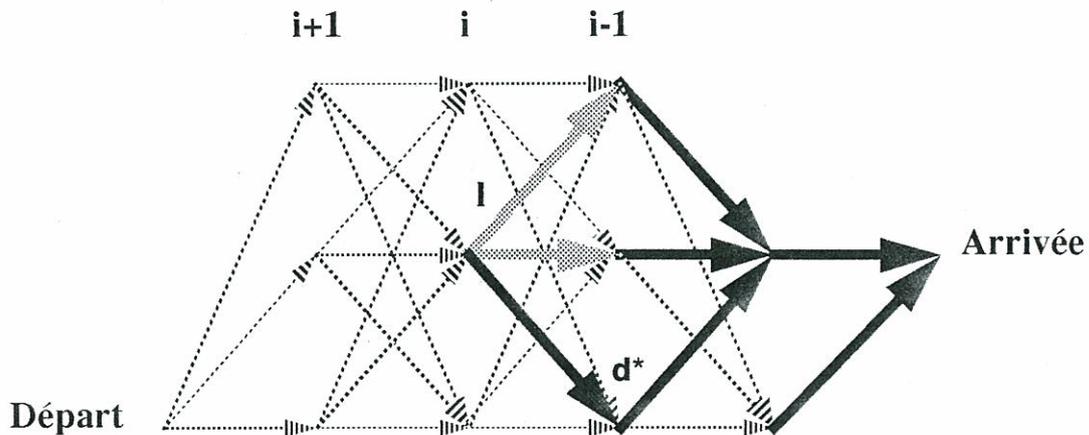
Δ_{il}^{i-1d} la durée de navigation du sommet il au sommet $i-1 d$

La durée de navigation est formée du quotient de la longueur de l'arc par la vitesse du voilier, elle même dépendant du vent via la polaire... Le calcul des ces éléments est abordé au §6. Examinons tout d'abord la construction de l'arbre.

Une heure arbitraire d'arrivée, appelons-la T_{arr} , est initialement assignée au sommet arrivée. L'algorithme procède alors par induction sur les indices i , en fait sur les colonnes du graphe, en affectant à chaque sommet l de la colonne i une heure de passage donnée par :

$$T_{il} = \underset{d \in S_{(i-1)}}{\text{maximum}} [T_{i-1d} - \Delta_{il}^{i-1d}] \quad T_{arr} \text{ fixé}$$

$S_{(i-1)}$ désigne l'ensemble des sommets de la colonne $i-1$. L'indice d^* choisi, pour lequel le maximum est réalisé, représente la *décision* prise au sommet il . La durée élémentaire de navigation $\Delta_{il}^{i-1d^*}$ du sommet il au sommet $i-1d^*$ est le *coût* associé à cette décision (figure ci-dessous).



La figure 1 présente un tel arbre, calculé pour la seconde étape de la Whitbread avec la polaire de Merit et une arrivée fixée au 25 novembre 1989 à 12 h. GMT. Le même arbre, sur lequel sont ajoutés les vents soufflant aux sommets de l'arbre aux instants où l'algorithme y fait passer le voilier, est présenté à la figure 2. La route optimale choisie, quittant le sommet de départ, est dessinée en bleu.

Dans cette formulation rétrograde, l'algorithme détermine en chaque sommet l'heure de départ la plus tardive de ce sommet qui soit compatible avec l'heure d'arrivée fixée. L'arbre des routes converge effectivement vers l'arrivée mais l'heure de départ du voilier ne peut être fixée. Cette approche est donc bien adaptée à l'étude climatologique des routes pouvant être empruntées à une certaine période de l'année, elle ne convient en revanche pas au routage en temps réel, pour lequel l'heure à laquelle le voilier passe le point de départ est déterminante.

Il convient, lors du routage temps réel, de choisir une *formulation duale* du problème, en enracinant l'arbre à l'endroit où se trouve le voilier en course, et en le faisant croître vers l'avant, en direction du but. Il s'agit alors de calculer :

$$T_{il} = \underset{d \in S_{(i+1)}}{\text{minimum}} [T_{i+1d} + \Delta_{i+1d}^{il}] \quad T_{dep} \text{ fixé}$$

Un arbre *direct* appliqué au routage en temps réel est présenté à la figure 7. Dans cette for-

mulation, l'algorithme détermine simplement la route de durée minimum au but.

Une décision est prise lors de chaque saut d'une colonne du graphe dans la suivante. L'état du processus, avant la prise de décision, est donné par la ligne considérée, indice l . La décision détermine la ligne d^* vers laquelle le voilier est astreint à naviguer. Le coût associé à la décision correspond à la durée de parcours sur l'arc choisi. C'est la somme de ces coûts que le processus minimise.

Les deux expressions du minimum et du maximum sont formulées de manière récursive. Elles mettent en évidence le fait que l'algorithme opère sur une séquence de décisions futures, rendues implicites par la récursivité. La solution d'un tel problème ne peut être envisagée que si l'on dispose d'une information complète sur les coûts associés à toutes les décisions possibles, à prendre dans le futur. Cette information est de nature climatologique lorsque l'arbre est rétrograde, elle est fournie par un modèle de prévision météorologique numérique lorsqu'il est direct.

4. La polaire

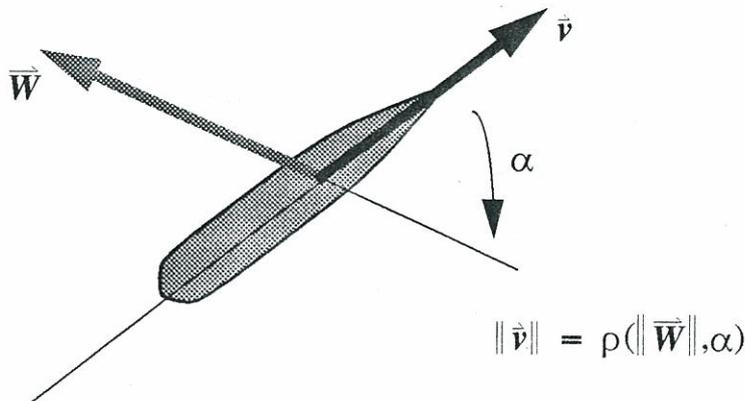
La polaire est la fonction qui décrit schématiquement les performances du voilier. Elle est notée ρ ci-après:

A chaque -

Allure (angle d'incidence du vent sur la trajectoire), notée α ,

Force du vent exprimée en noeuds,

- est associée la vitesse du voilier, exprimée en noeuds.



La polaire de Merit gréé en sloop est présentée à la figure 3.

Quelques remarques:

Le processus opère à partir du vent réel exprimé relativement au repère géographique, différent du vent apparent perçu sur le voilier, qui lui résulte de la composition des vitesses du voilier et du vent réel.

La polaire, en principe donnée par l'architecte naval sous forme de table ou d'abaque, est également mesurée expérimentalement lors de la mise au point du voilier.

Les performances du voilier ne sont en accord avec la polaire que si le réglage du grément est optimal. La responsabilité de ce réglage incombe à l'équipage.

L'état de la mer affecte naturellement les performances du voilier. Lorsqu'il navigue au près ($\alpha < 90^\circ$), les vagues diminuent sa vitesse, surtout si les airs sont forts. Cet effet est implicitement pris en compte lors de l'évaluation expérimentale de la polaire.

5. Les vents à la surface de la mer

Le Centre Européen de Prévision à Moyen Terme (ECMWF) élabore et diffuse chaque jour une prévision météorologique portant sur toute la planète pour les dix jours à venir. Le modèle de simulation mathématique utilisé à cette fin satisfait, entre autres, les propriétés suivantes :

Il est *global*: l'atmosphère de la planète est intégralement simulée. Les lois physiques prises en compte, exprimées sous forme d'équations aux dérivées partielles, comprennent l'équation de Navier-Stokes dans une formulation géophysique, une équation de bilan thermodynamique, une équation de bilan hydrique, une équation de bilan radiatif. Une foule de processus locaux incluant les échanges énergétiques dans la couche limite planétaire, les processus de convection, les effets liés à l'orographie, au cycle diurne, à l'albédo des sols, sont également paramétrés.

La discrétisation mathématique est *spectrale* pour les coordonnées horizontales, avec une troncature au nombre d'onde T213. 31 niveaux atmosphériques sont distingués, de la surface à la stratosphère, avec une discrétisation par différences finies dans la coordonnée verticale.

Une *condition initiale*, nécessaire à l'intégration des équations aux dérivées partielles, est élaborée chaque jour à partir des observations disponibles aux heures synoptiques, émanant de la quasi totalité des Etats de la planète, d'un bon nombre de navires commerciaux en route sur les divers océans, d'un bon nombre d'avions de ligne en vol, émanant enfin de plusieurs satellites artificiels. Ces observations sont constamment transmises au Centre via un réseau de télécommunication météorologique planétaire, le *Global Telecommunication System*.

Au Centre, un dispositif d'assimilation de ces données, faisant usage d'une méthode d'interpolation optimale multivariée couplée à un schéma d'initialisation non linéaire par modes normaux aboutit, quatre fois par jour, à la mise à jour de cette condition initiale, véritable image numérique en temps réel de l'atmosphère de la planète terre.

Outre leur application première au calcul de prévision, les conditions initiales sont également archivées au Centre, ceci depuis une douzaine d'années environ.

Les champs des vents à 10 m. utilisés pour le calcul des options climatologiques, recalculés à partir des archives, ont été transférés au Centre de calcul de l'EPFL.

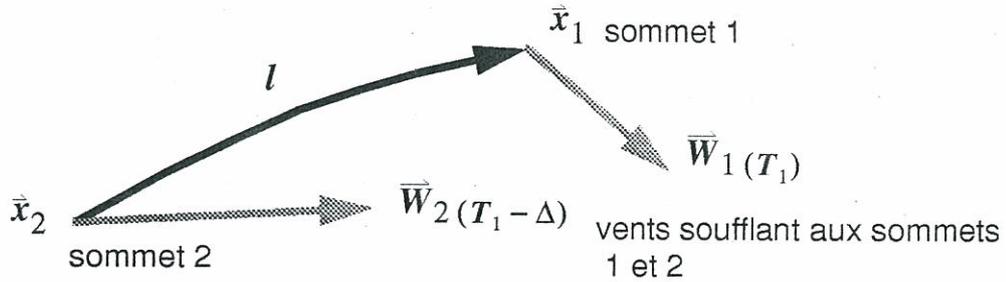
Lorsque le programme de routage est appliqué en temps réel, ce sont simplement les champs en prévision qui sont transférés, jour après jour tout au long d'une course.

Des exemples de champs de vents en prévision sont présentés aux figures 4, 5 et 6. Du point de vue du graphisme et de leur structure informatique, ces champs sont rigoureusement analogues à ceux qui émanent des archives.

6. Les durées élémentaires de navigation

Considérons un arc arbitraire du graphe, figuré ci-dessous, et abordons le calcul de la durée élémentaire Δ de navigation du sommet 2 au sommet 1, quotient de la longueur de l'arc par

la vitesse du voilier.



Etant donnés \bar{x}_1 et \bar{x}_2 les coordonnées de ces deux sommets dans l'espace, R le rayon terrestre, la longueur l de l'arc est simplement:

$$l = R \arccos (R^{-2} \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2)$$

La vitesse du voilier est en revanche difficile à estimer: l'algorithme de programmation dynamique fait passer le voilier au temps T_1 connu au sommet 1, au temps $T_1 - \Delta$ inconnu au sommet 2, où Δ est justement la durée à calculer. Désignons par:

$$\bar{W}(T_1, \Delta) = \frac{1}{2} (\bar{W}_1(T_1) + \bar{W}_2(T_1 - \Delta))$$

le vent moyen soufflant sur l'arc à l'époque où le voilier le parcourt. La durée élémentaire de navigation sur cet arc est alors :

$$\Delta = \frac{l}{\rho(\|\bar{W}(T_1, \Delta)\|, \alpha(\bar{W}(T_1, \Delta)))}$$

Le choix de chaque arc de l'arbre implique donc le calcul d'un point fixe $\Delta=f(\Delta)$, où f est hautement non linéaire. Dans le programme de routage, ce calcul est effectué en deux temps, tout d'abord selon un processus classique de relaxation, puis par descente newtonienne. Les conditions de convergence (d'existence d'un tel point fixe) ont été étudiées: le calcul diverge si les vents sont faibles, si une navigation vent debout doit être tentée, ou enfin si le champ de vent est très variable. Afin de pallier ces inconvénients, l'algorithme est équipé d'un dispositif de contrôle de la convergence permettant en fait d'exclure les arcs sur lesquels une navigation par vent debout devrait être tentée, et ceux qui conduisent dans les anticyclones. On ne peut dès lors exclure, dans une situation pathologique, qu'aucune convergence ne soit réalisée et que l'algorithme échoue simplement dans sa tentative de construire une route traversant le graphe. Une telle situation ne s'est jamais produite en pratique.

Les vecteurs vent dessinés sur les figures 2 et 7 représentent le vent soufflant en chaque sommet de l'arbre à l'instant où l'algorithme y fait passer le voilier, après que la relaxation ait convergé. Ces champs de vent sont donc dynamiques: ils ne représentent pas une situation figée à un instant donné, mais au contraire un *champ évolutif* correspondant à la séquence de toutes les décisions optimales dont l'arbre sous-jacent est la représentation.

Enfin, la programmation dynamique étant une méthode combinatoire, la route optimale construite est une ligne brisée anguleuse. Cette propriété permet au système de simuler et de décider de la position des virements, des empannages, et même d'optimiser des bords de large, grâce auxquels les routes au vent arrière, défavorables, sont évitées.

7. Les structures informatiques

Le premier programme a été écrit en 1984-85 en Pascal, et tous les développements ultérieurs ont été réalisés dans ce langage. Initialement développé sur une station de travail HP, ce premier programme a été transféré sur le Cyber 855 qui fonctionnait encore à l'époque au Centre de calcul de l'EPFL et c'est dans cette version que tous les calculs relatifs à UBS-Switzerland ont été conduits. Ce programme a ensuite évolué en étant adapté aux versions successives des Crays installés à l'EPFL. Dans sa version actuelle, il est composé de six modules principaux:

1. *Le générateur de graphe*, auquel on spécifie les points de départ et d'arrivée de l'étape, l'aire géographique devant être recouverte et sur laquelle une route est susceptible d'être choisie, enfin les contraintes imposées par les caps et les continents. Ce générateur calcule tous les éléments du graphe complet et les conserve dans un fichier utilisé ultérieurement.

2. *Le programme d'interpolation des vents*. Les champs de vent du Centre européen, qu'ils émanent des archives ou du modèle de prévision, sont donnés aux sommets d'un maillage rectangulaire latitude-longitude fixé par le Centre. Les sommets du graphe généré ne coïncidant naturellement pas avec ceux de ce maillage, un dispositif d'interpolation bilinéaire est engagé, qui recalcule pour chaque échéance temporelle de l'archive, respectivement pour chaque échéance de prévision numérique, le vent soufflant (deux composantes) en chaque sommet du graphe construit par le générateur. A ce stade du calcul, l'interpolation est strictement spatiale: les interpolations temporelles sont effectuées lors des relaxations associées à la construction de l'arbre (§6).

3. *Un éditeur de polaire*, permettant de manipuler et contrôler les fichiers représentant les polaires, avec lequel le graphe de la figure 3 a été réalisé.

4. *Un programme de dessin des vents* émanant des archives, respectivement des prévisions numériques.

5. Enfin, *les modules principaux de calcul des routes*. L'un d'entre eux est rétrograde, l'autre direct. L'un et l'autre prennent en compte -

Le graphe généré

Le champ de vent interpolé aux sommets du graphe

La polaire

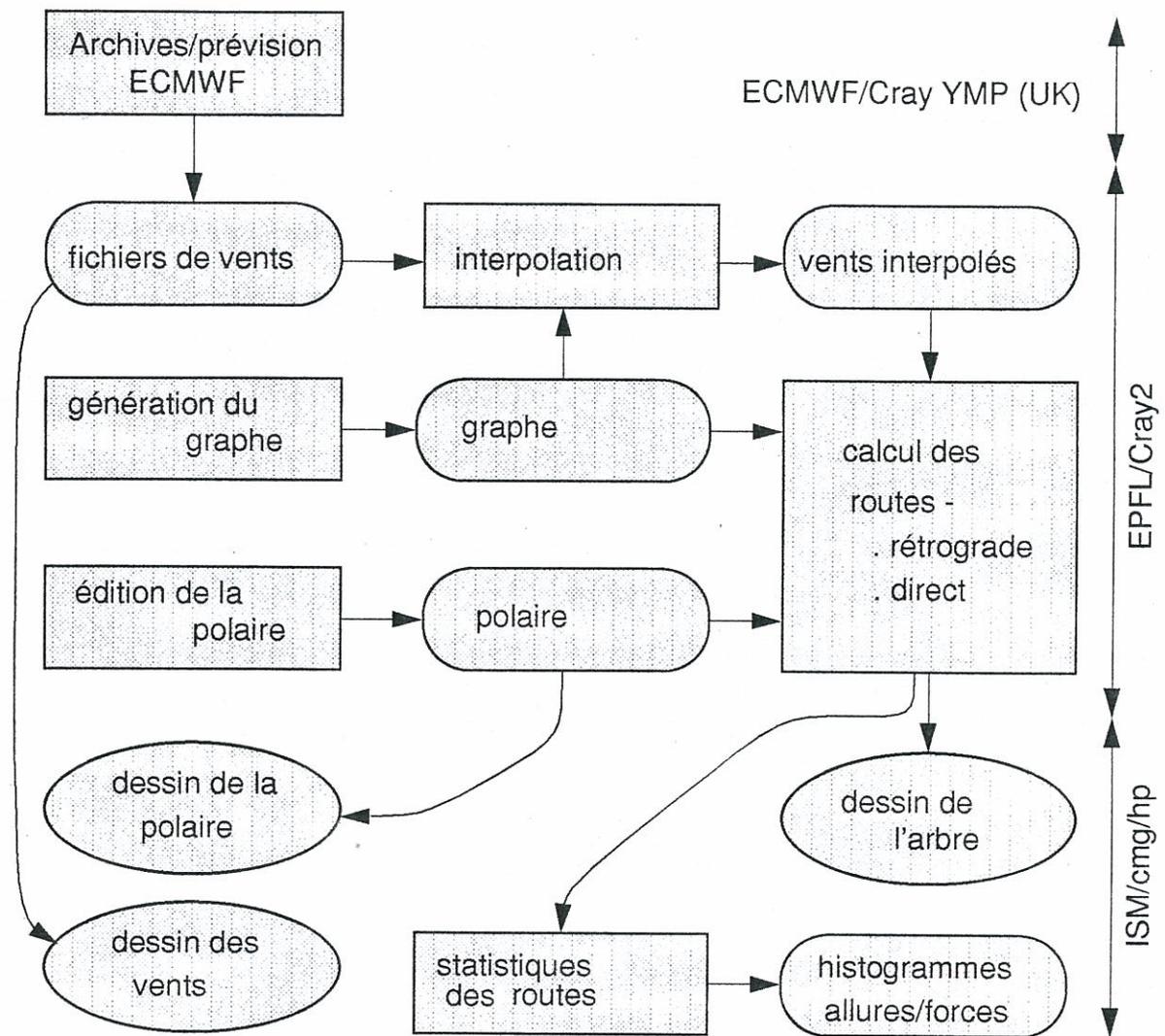
- et livrent des cartes analogues à celles qui sont présentées aux figures 2 et 8 pour le programme rétrograde, respectivement à la figure 7 pour le programme direct.

Outre l'arbre, les vents et la route, le programme direct calcule et dessine les *isochrones* relatives à chaque échéance de prévision. Ces courbes sont formées du lieu des points atteints à chaque échéance de prévision par des voiliers ayant tous quitté le sommet de départ simultanément et qui se distribueraient sur toutes les branches de l'arbre. Elles donnent donc une vision globale de l'enveloppe des progressions possibles en direction du but.

De plus, le programme rétrograde élabore un livre de route (log book) pour chaque course simulée.

6. Ces log books sont exploités dans un dernier module, celui des *statistiques des routes*, à partir desquelles sont construits les histogrammes des durées de navigation pour chaque allure/force, utilisés pour l'évaluation des polaires.

Le diagramme de la page suivante illustre tout le dispositif :



8. Expériences et conclusions

Abordons les trois approches mentionnées dans l'introduction.

L'approche climatologique.

Chacune des étapes d'une course, typiquement d'une Whitbread, fait l'objet de vingt à trente simulations effectuées avant la course, conduites sur l'aire géographique caractérisant l'étape. Les champs de vents extraits des archives du Centre européen portent sur les années précédant celle de la course, à l'époque où l'étape est effectivement parcourue. La polaire prise en compte pour ces simulations, livrée par l'architecte, est corrigée en fonction des essais et réglages du voilier. Le résultat des simulations est communiqué avant la course au skipper sous la forme d'un dossier de cartes dont sont extraites les figures 2 et 8.

Les deux figures 8.a et 8.b datent de 1985. Embarquées à l'époque sur UBS-Switzerland pour la quatrième étape Punta del Este - Porthmouth de la Whitbread, elles mettent en exer-

gue quelques traits saillants apportés par ces simulations :

Il apparaît tout d'abord que l'algorithme ne choisit systématiquement jamais certaines options; pour le voilier et la climatologie de l'étape, à l'époque où elle est parcourue. Pour UBS-Switzerland par exemple, excellent voilier au près, l'option consistant à contourner l'anticyclone des Açores par l'ouest afin de gagner les latitudes plus septentrionales où circulent les dépressions atlantiques associées au front polaire n'était jamais prise à l'époque où cette quatrième étape de l'ancienne Withbread était parcourue, soit à la fin du printemps. Des simulations effectuées plus tôt dans la saison, à la fin de l'hiver, montraient en revanche que l'option par le nord-ouest conservait quelque plausibilité.

L'examen global de toutes les cartes conduit également à discerner les régions dans lesquelles une ou plusieurs décisions vont impérativement devoir être prises, typiquement, sur les cartes des figures 8, dans la région des Iles du Cap Vert.

L'étude conjointe des routes choisies et des situations météorologiques correspondantes permet, dans une certaine mesure, d'expliquer les choix de l'algorithme. Il est apparu, par exemple pour cette quatrième étape, que la route passant au voisinage des Canaries, puis au large du Portugal, était associée à la présence d'une faible dépression stationnaire au large du Portugal, elle-même couplée à un anticyclone bloquant sur l'Europe. La stabilité d'une telle situation, présente à l'époque de cette quatrième étape, a convaincu le skipper d'abandonner le contrôle des autres voiliers en course pour suivre l'option suggérée par les cartes et arriver finalement 40 h. avant le second.

La possibilité de simuler un grand nombre de routes aboutit donc à l'élaboration d'un dossier d'informations relatives à chaque étape qu'il est difficile d'obtenir par quelques navigations effectuées dans la région concernée. Ce dossier ne doit pas être considéré comme un instrument de décision automatique pouvant être substitué au jugement du skipper. Il s'apparente plutôt à un ensemble d'informations passives qui, lorsqu'elles sont consultées, peuvent affiner le jugement du consultant.

A l'évidence, les options éventuellement suggérées par la carte de la figure 2, couvrant l'Atlantique austral et le sud de l'Océan Indien, sont loin d'être aussi remarquables que celles des figures 8.

Il apparaît en effet à l'expérience que, si l'approche climatologique est féconde dans la zone comprise entre 40° S et 40° N environ du fait de la stabilité climatologique qui y prévaut, la réponse donnée par cette approche est nettement plus diffuse lorsque des choix doivent être établis aux latitudes plus australes ou plus septentrionales, où circulent les dépressions associées aux fronts polaires.

Les navigateurs expriment cela en affirmant que les étapes australes et septentrionales de la course sont tactiques, alors que les options stratégiques prédominent au voisinage des tropiques.

La solution, aux latitudes élevées, consiste à inféoder l'algorithme de programmation dynamique à un modèle de prévision météorologique numérique.

Le routage temps réel.

En temps réel, la responsabilité de la navigation est partagée entre le skipper et le routeur: Un dialogue radiotéléphonique est établi en principe une fois par jour, au cours duquel les options de courses devant être envisagées durant les 24 heures suivantes sont discutées.

La séquence des opérations journalières conduisant à l'élaboration d'un routage est la sui-

vante :

La prévision élaborée au Centre européen, couvrant la planète et portant sur les dix jours à venir, est disponible chaque jour à 0 h. GMT au Centre. Un premier programme, exécuté sur un ordinateur du Centre, extrait les champs des vents prévus à 10 m. sur l'aire géographique concernée par l'étape en cours. Ces champs sont transférés automatiquement en Suisse à 2 h. GMT via les lignes établies entre le Centre et l'ordinateur de l'Institut Suisse de Météorologie, puis de ce site, sis à Zürich, à l'EPFL via Switch. Le routeur dessine tout d'abord ces champs (figures 4 à 6), afin de juger des développements météorologiques en cours sur l'aire de la course. Disposant d'une estimation de la position actuelle du voilier, ou téléphonant au quartier général de la course pour l'obtenir, il commence par générer un graphe enraciné en cette position, orienté en direction du but. Un séquençement automatique des opérations en machine enchaîne alors l'interpolation des vents et le calcul de l'arbre. Disposant du dessin d'une option de route, figure 7, il la compare à l'option calculée le jour précédant et à la route réelle du voilier, afin d'évaluer la fiabilité de la prévision qu'il a dans les mains, et élabore enfin un protocole de routage.

Lors du dialogue radiotéléphonique, le skipper communique les conditions météorologiques qui règnent en course, puis le routeur fait un rapport portant sur la situation générale et son évolution, les options de route devant être envisagées au cours des 24, voire 48 heures suivantes, et il tente enfin de porter un jugement sur la fiabilité de ce qu'il vient d'affirmer. Cette conversation a lieu vers 10 - 12 h. GMT.

Le routage en temps réel, outre qu'il contrevient au règlement actuel de la Whitbread et qu'il ne peut donc pas être appliqué dans cette course, hormis pour les départs, est affecté de deux défauts au moins, qui ne peuvent être éludés:

La fiabilité de tout le processus est naturellement subordonnée à celle du modèle de prévision. On peut considérer que, dans sa version actuelle, le modèle numérique ne parvient pas à livrer des prévisions de vents à 10 m. utilisables au delà de quatre jours environ aux latitudes moyennes et élevées, de deux jours sous les tropiques et l'équateur.

De manière générale, la fiabilité d'une prévision est largement dépendante de la qualité de la condition initiale disponible, elle-même affectée par les aléas d'observation. Plus encore, d'importants travaux actuellement conduits en météorologie théorique tendent à montrer que la *prédictabilité de l'atmosphère*, système dynamique non linéaire, est elle même sujette à des fluctuations.

Le fait qu'il ne soit pas possible, ne disposant que d'une prévision utilisable à quatre jours, de définir un graphe couvrant toute une étape, oblitère l'optimalité du processus: un objectif intermédiaire doit être choisi a priori. Dans le cadre du présent travail, cet objectif intermédiaire est simplement le sommet terminal du graphe le plus proche de l'arrivée.

L'évaluation de la polaire.

Dans les deux perspectives, climatologique et temps réel, la route doit être optimisée pour un voilier donné par sa polaire. Le développement ultime de la méthode consiste naturellement à optimiser le voilier à la course, en définissant sa polaire avant qu'il ne soit construit, en fonction des caractéristiques climatologiques attendues.

Cette approche s'est imposée en 1986, après que les organisateurs de la Whitbread aient décidé de modifier le parcours en introduisant les six étapes nouvelles de Porthmouth-Punta Del Este, Punta-Perth, Perth-Auckland, Auckland-(Horn)-Punta, Punta-Fort Lauderdale, Fort Lauderdale-Porthmouth.

Nombre d'expériences accumulées lors des courses précédentes ne furent par conséquent plus représentatives des conditions qui allaient régner sur ce nouveau parcours, essentiel-

lement caractérisé par des vents portants.

Tous les outils informatiques étant disponibles, nous avons alors, au cours de l'été 1987, fait naviguer la polaire d'UBS-Switzerland sur ce qui allait être la future Whitbread, en accumulant une statistique des fréquences de navigation à chaque allure, pour chaque force du vent et pour chacune des étapes. D'autres calculs furent encore conduits avec plusieurs variantes de polaires. C'est l'essence de ces résultats qui fut communiquée à l'architecte naval Néo-Zélandais Bruce Farr, avec le mandat de dessiner les plans de ce qui allait devenir Merit.

L'optimisation de la polaire est de notre point de vue l'approche ouvrant les perspectives les plus intéressantes. Il lui manque toutefois un fondement théorique, qui pourrait être donné par une méthode variationnelle. Dans cette perspective, la polaire ne serait plus donnée par une table, mais par une fonction paramétrée. Le gradient des durées de parcours serait alors évalué relativement aux paramètres de cette fonction.

9. Bibliographie

Alquier M., 1986 : Navigation et intelligence artificielle. **Pour la Science**, Août 1986, 78-87.

Ambuhl J. Eckert P. 1987: Calcul de la route optimale d'un voilier. Application à la course autour du monde 1985-86 du voilier UBS-Switzerland. **Rapport de travail de l'Institut Suisse de Météorologie.**

Ambuhl J. Eckert P. 1986 : A study of optimal routes for a sailing boat. Application to the case of UBS-Switzerland during the 1985-86 Whitbread round the world race. **ECMWF Newsletter**. 35, 3-9.

Bernot J.Y. 1985a : Routage. **Course au large**, 33 36-41.

Bernot J.Y. 1985b : Navigation à temps minimum. **Course au large**, 34, 86-88.

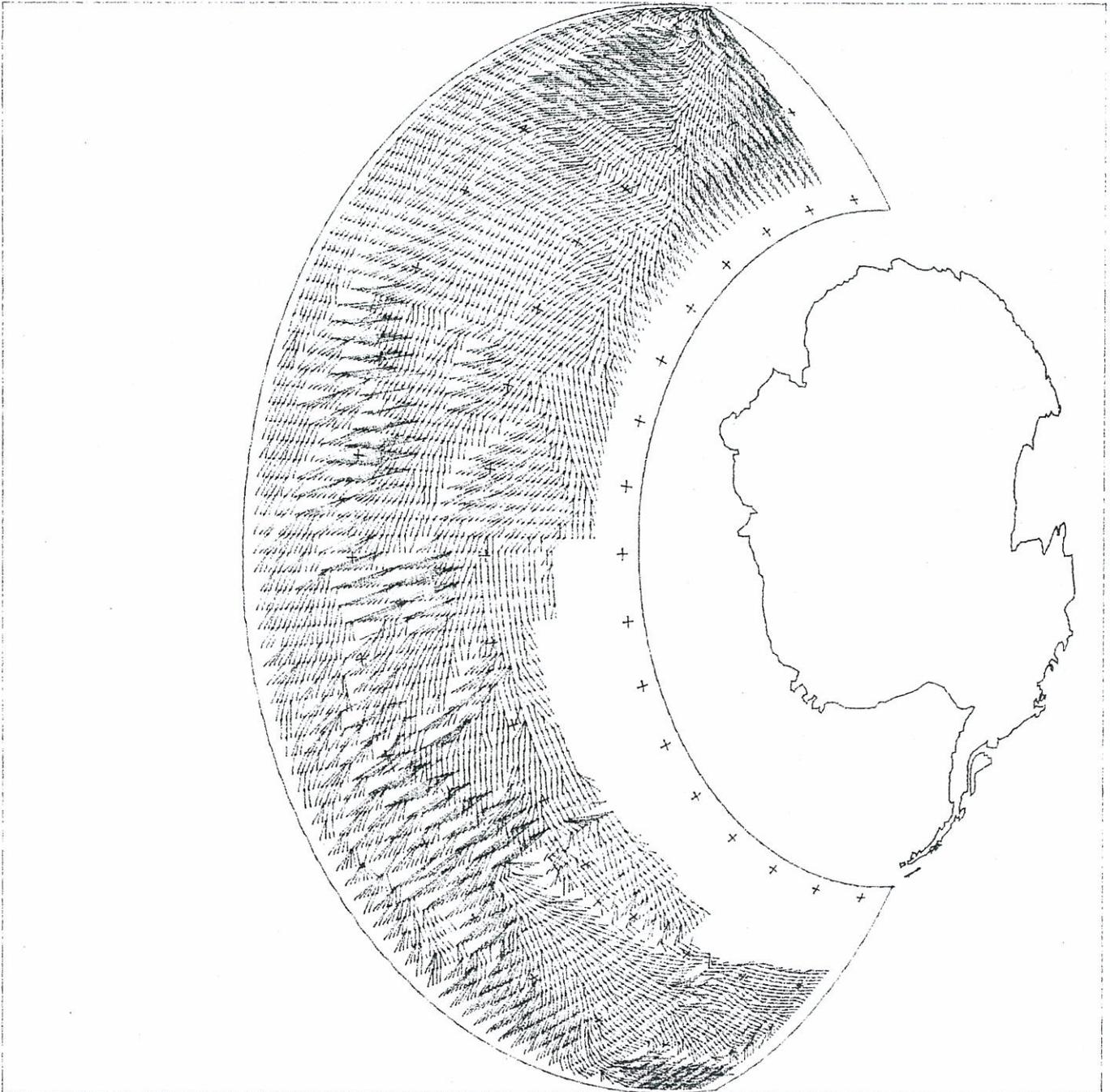
Billard C. 1989: Le routage des voiliers. **La Météorologie. VII série**, 30, 17-22.

Figure 1.

Deuxième étape Punta Del Este - Perth de la Whitbread.

Arbre des routes optimales généré par programmation dynamique. L'arbre, rétrograde, est enraciné à Perth, et une seule route quitte Punta.

La polaire utilisée est celle de Merit, et le voilier arrive à Perth le 25 novembre 1989 à 12 h. GMT après 25 jours, trois heures et 9 minutes de navigation.



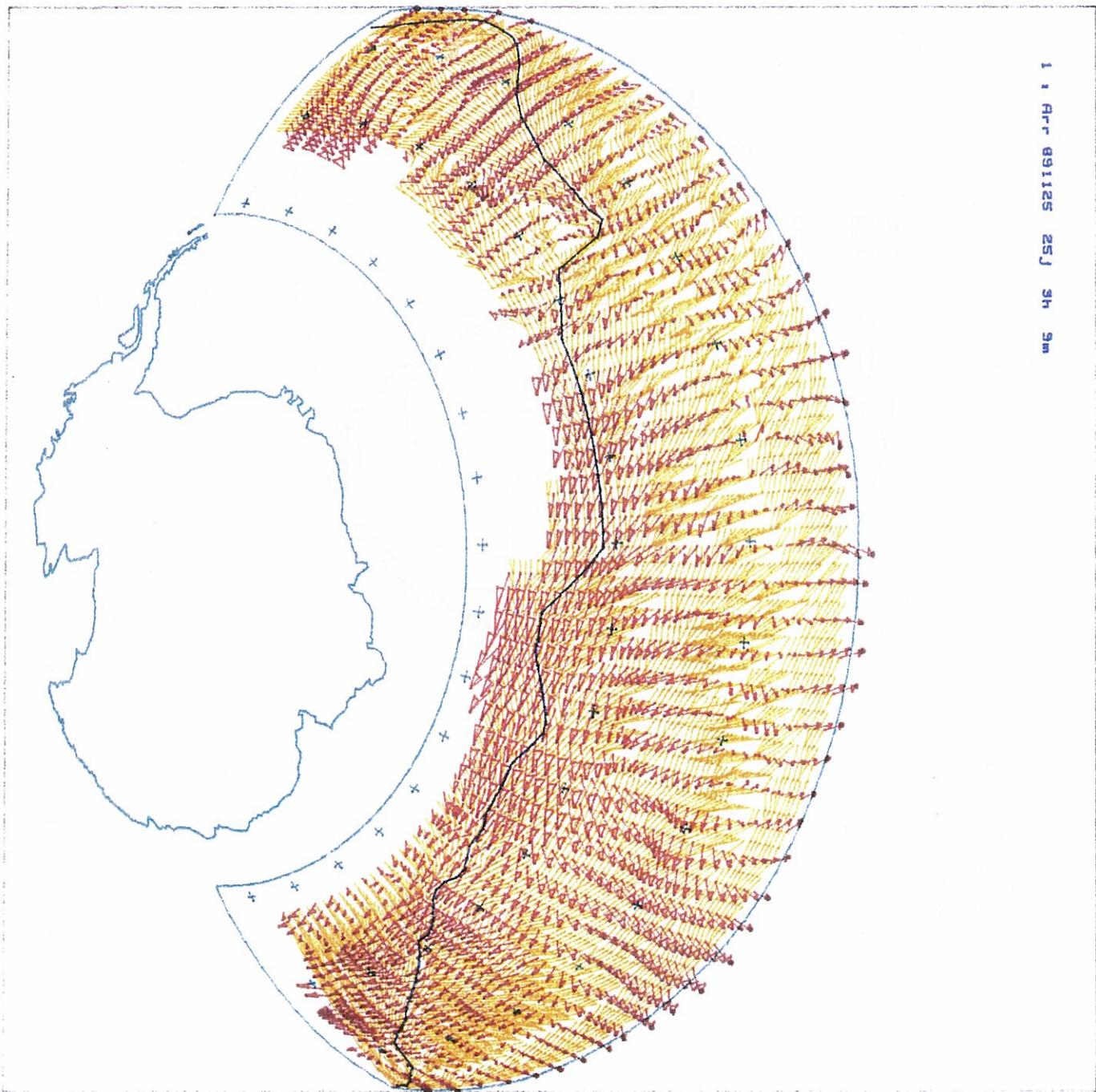


Figure 2.

Vents soufflant aux sommets de l'arbre de la figure 1 aux instants où le voilier passe en ces sommets.

L'unique route quittant Punta et arrivant à Perth, de durée minimale pour l'évolution météorologique considérée, est tracée en bleu.

La polaire utilisée est celle de Merit, et le voilier arrive à Perth le 25 novembre 1989 à 12 h. GMT, après 25 jours, trois heures et neuf minutes de navigation.

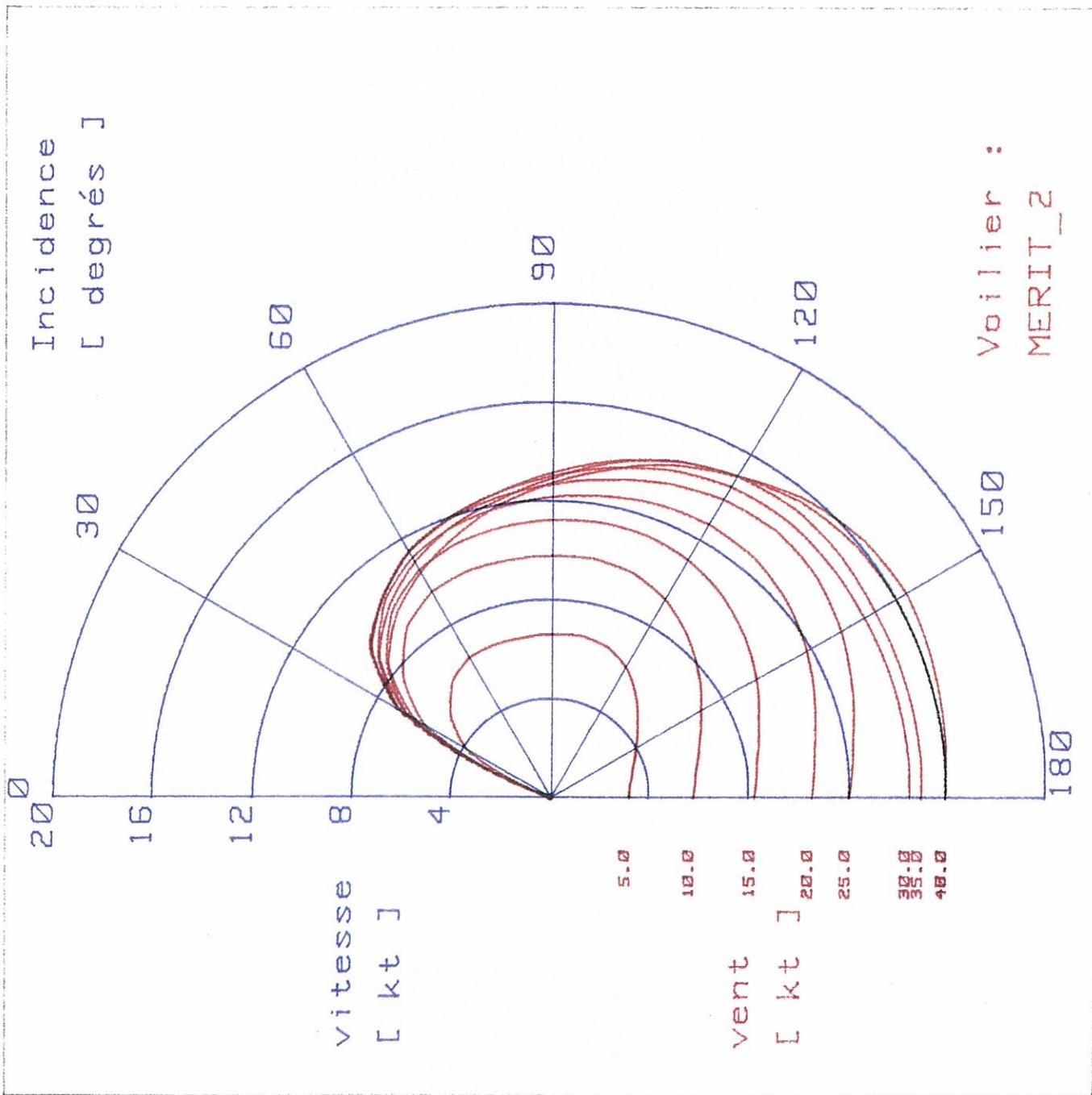


Figure 3.

Polaire de Merit gréé en sloop.

A l'angle d'incidence correspond l'allure du voilier, du près serré, à 30°, au grand large, à 150-180°.

Le rayon polaire donne la vitesse du voilier exprimée en noeuds (kt).

Les courbes rouges sont paramétrées en termes de vent réel. Ainsi, en suivant la courbe 5 noeuds du vent réel, on constate que le voilier file 4 noeuds au grand large, à 150° d'incidence.

Représentée ici pour tribord amures, la polaire est évidemment symétrique et vaut également pour babord amures.

Les *figures 4,5 et 6* exhibent les vents soufflant à 10 m. au dessus du niveau de la mer, et de l'orographie du modèle, tels qu'ils ont été prévus par le modèle numérique du Centre Européen pour le lundi 6 janvier 1992, le mardi 7 et le vendredi 10 à partir de la condition initiale du 5 janvier à 12 h. GMT.

Le lundi et le mardi, une dépression est centrée au voisinage de 40 N, 27 W. De plus, une zone frontale stationnaire s'étend de 45 N 27 W à 55 N, 8 W, au nord de l'Irlande. Un afflux d'air d'air tropical a lieu au sud de cette ligne. Le mardi, cette zone frontale stationnaire s'est transformée en un front froid en mouvement en direction du sud-est. Un puissant afflux d'air polaire s'est de surcroît établi au centre de l'Atlantique. Le vendredi, sur la prévision à +120 h., la dépression entre dans le golfe de Gascogne, et une dorsale anticyclonique couvre la région atlantique qui s'étend de 38 N, 23 W à 50 N, 17 W.

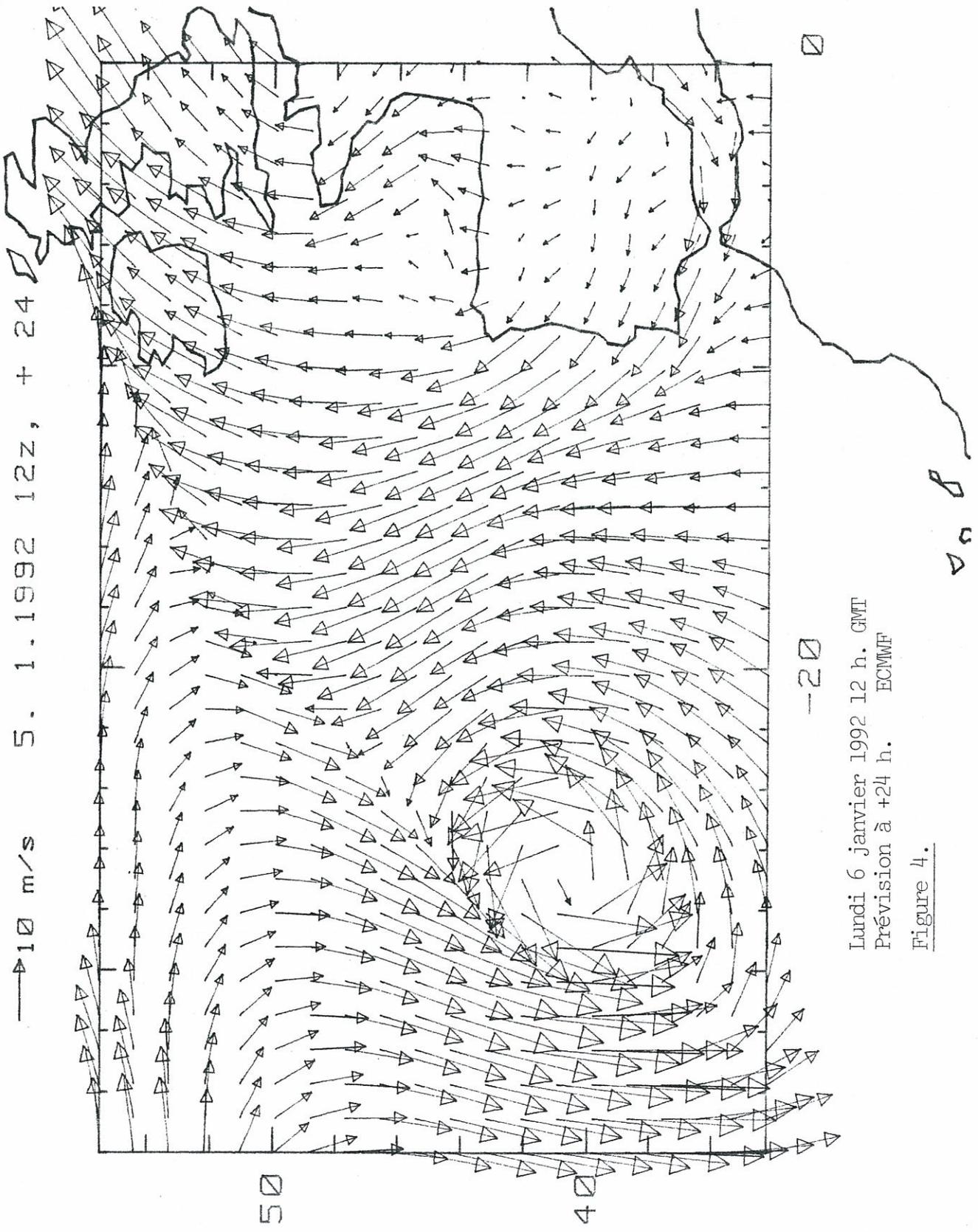
La *figure 7* illustre un routage temps réel de Merit dans la situation présentée ci-dessus. Lors de cette simulation, le voilier est supposé se trouver à 42 N, 34 W le 5 janvier à 12 h. GMT, naviguant en direction de Lorient en Bretagne. L'arbre est direct et les vents soufflant en chacun de ses sommets sont représentés aux instants où l'algorithme y fait passer le voilier. Les isochrones, à intervalles de 12 h, sont formées des orbes dessinées à l'aide des petits cercles noirs.

L'algorithme exploite parfaitement la présence de la dépression, en forçant le voilier dans son sillage, dans l'afflux d'air polaire subséquent. La première partie de la route est parcourue babord amures au près, jusqu'à 22 W, puis au près serré, juste à l'arrière du front froid. A la fin de sa vie, soit en entrant dans le Golfe de Gascogne, la dépression ralentit en s'occluant et le voilier traverse alors le front en passant de babord à tribord amures lors d'un empannage effectué à 8 W. L'arrivée a lieu au grand large, puis finalement au large, par tribord amures.

Une propriété intéressante de la programmation dynamique apparaît sur la figure 7: L'arbre est en effet grossièrement divisé en deux sous-arbres, l'un croissant en direction du nord-ouest de l'Irlande, l'autre en direction du Golfe de Gascogne. Cette césure en deux sous-arbres est induite par le contrôle de la convergence lors du calcul des durées élémentaires de navigation (§6). Elle met en évidence ce que l'on pourrait nommer, en utilisant une analogie hydrologique, des *bassins d'accumulation de décisions*, séparés par des lignes de crêtes, qui correspondent aux régions ambivalentes dans lesquelles les décisions sont incertaines.

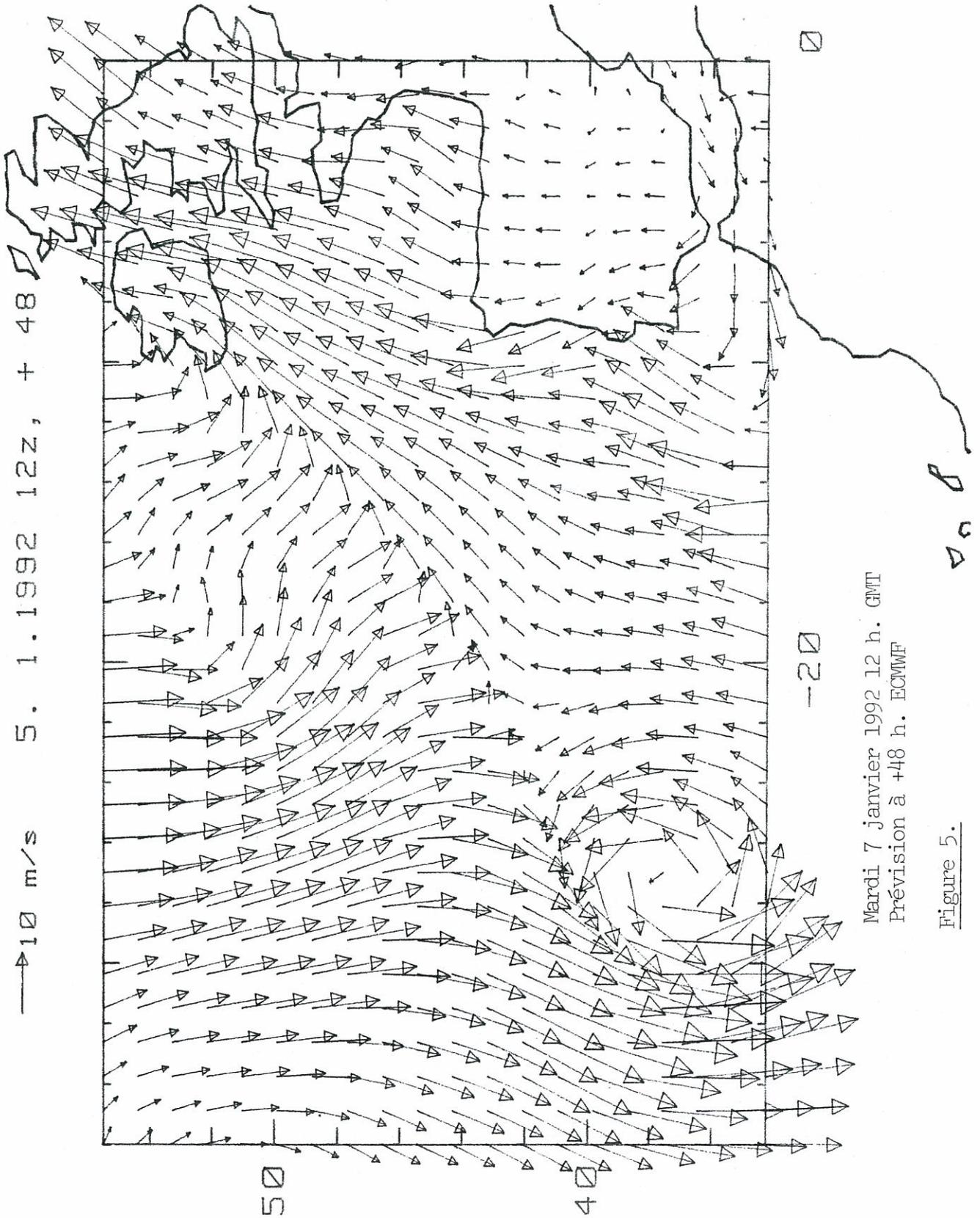
De tels bassins apparaissent également lorsque l'arbre est rétrograde, dans le cadre des simulations climatologiques. Dans ces cas cependant, les bassins convergent en direction de l'arrivée et sont sources d'enseignements pour la définition des stratégies de course.

Les deux *figures 8* décrivent des routes simulées en 1985, avec la polaire d'UBS-Switzerland. Elles mettent en évidence l'option consistant à naviguer sur le flanc est de l'anticyclone des Açores, au près par airs faibles, pour gagner une zone faiblement dépressionnaire favorable située au large du Portugal.



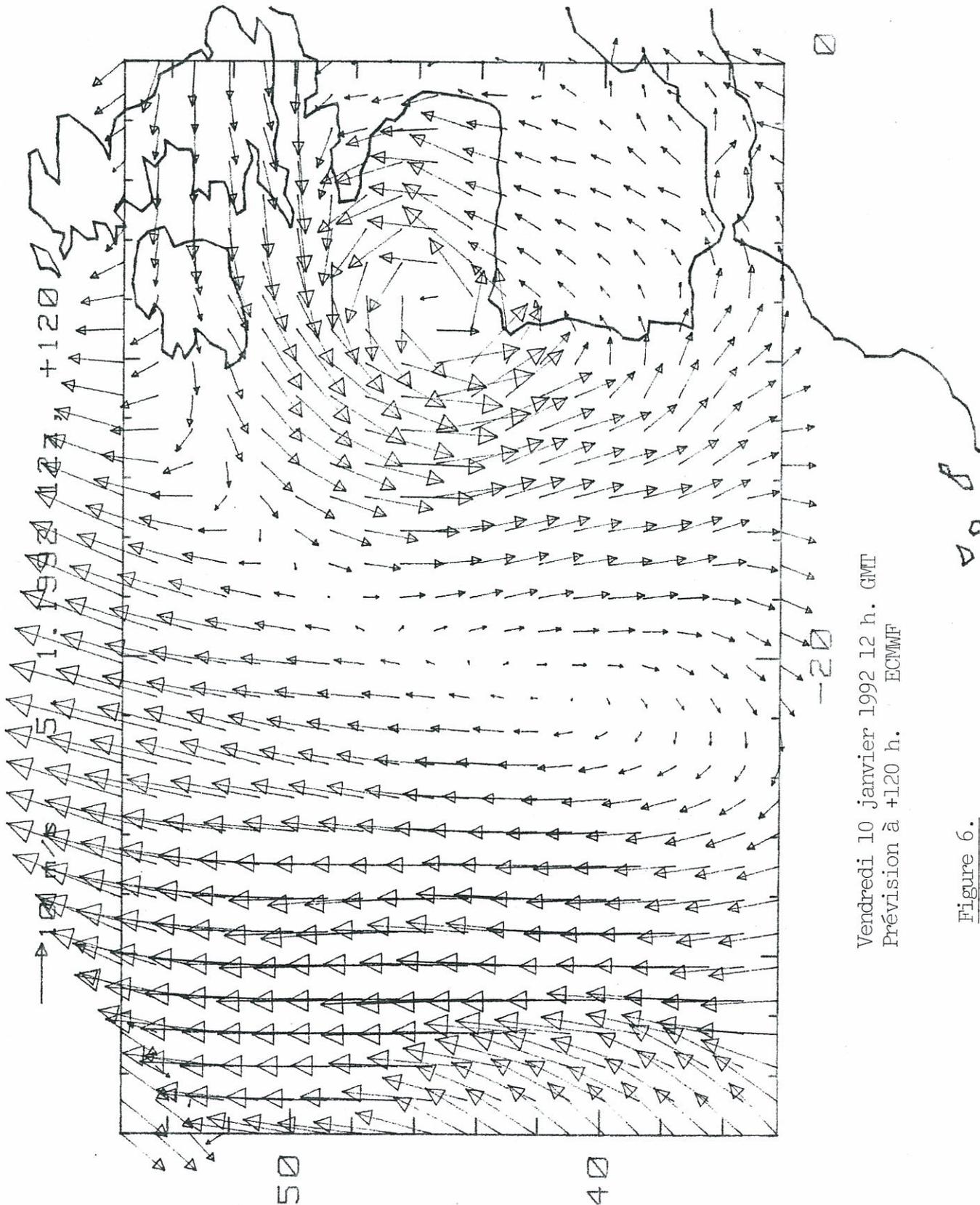
Lundi 6 janvier 1992 12 h. GMT
Prévision à +24 h. ECMWF

Figure 4.



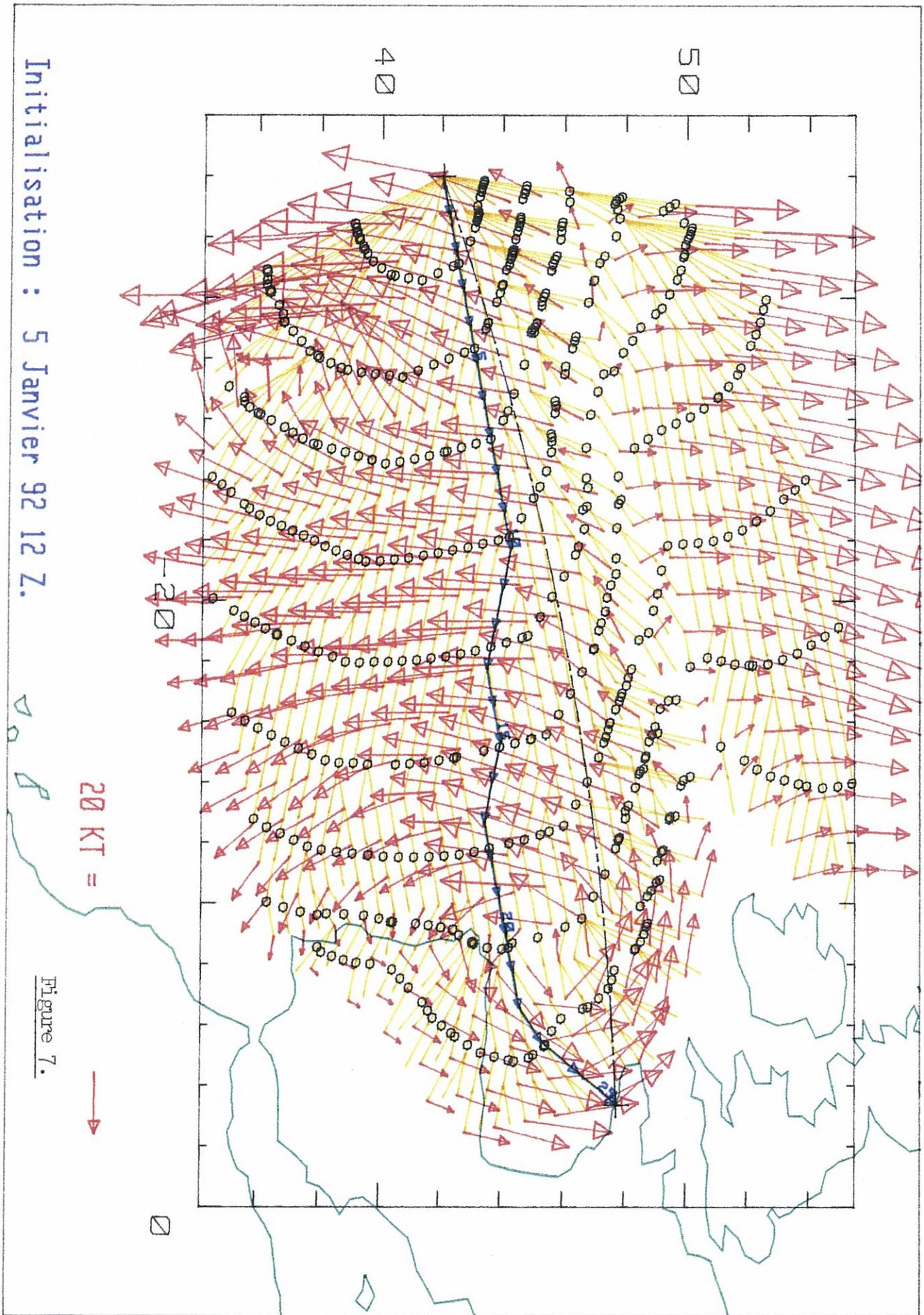
Mardi 7 janvier 1992 12 h. GMT
Prévision à +48 h. ECMWF

Figure 5.



Vendredi 10 janvier 1992 12 h. GMT
Prévision à +120 h. ECMWF

Figure 6.



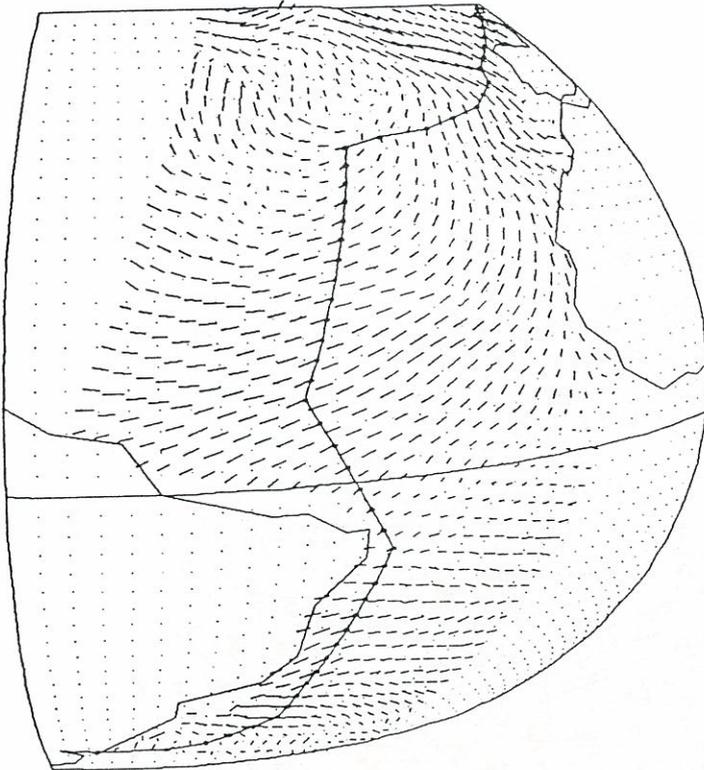


Figure 8.a.

Quatrième étape
Punta-Porthmouth de
la Whitbread 1985-86.
Polaire d'UBS-Switzer-
land.

Dans les deux cas,
l'algorithme choisit
un virement au sud-est
de l'anticyclone des
Açores suivi d'un bord
de près serré babord
amures.

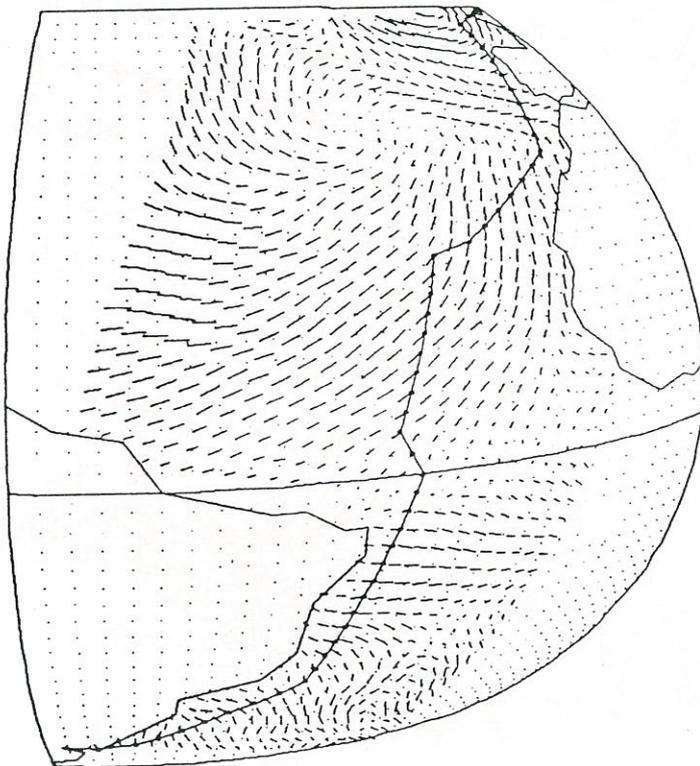


Figure 8.b.

