Le Bol d'Or virtuel

Jacques Ambühl
26 Novembre 2013

Le projet présenté est simple: déterminer sur un lac la route optimale d'un voilier prenant en compte d'une part l'évolution de la météo, d'autre part la polaire de ce voilier, son diagramme de performance.

Introduction

Commençons avec un exemple et portons nos regards sur la figure 1. Un voilier navigue d'une bouée située dans la rade de Genève, à l'extrémité occidentale du lac Léman, et vise une autre bouée située au large du Bouveret, à l'extrémité orientale du lac. Le départ est donnée le 9 juin 2013 à 10 heures du matin. La route optimale est dessinée en bleu. Le vent sur le lac, tel qu'il se développe au cours de la course, est représenté par le champ des vecteurs violets. La navigation démarre dans le Petit Lac, bâbord amures au près sous le Séchard matinal. Le voilier passe tribord amure à la suite d'un virement effectué en face de Nyon et le vent adonne jusque vers Saint-Prex. Au delà, le Morget souffle du nord-ouest et contraint le voilier à abattre et à poursuivre sa course au milieu du Grand Lac, bâbord amures, au travers dans un courant de Bise favorable. Plus à l'est, la Bise tourne en Rebat qui forcit et adonne, imposant un empannage au large de Lutry. Dès lors dans le Haut Lac, le voilier file au Bouveret au largue, tribord amures dans le solide Rebat de la fin de l'après-midi. [pour les vents du lac, consulter André Guex, Ref. 1].

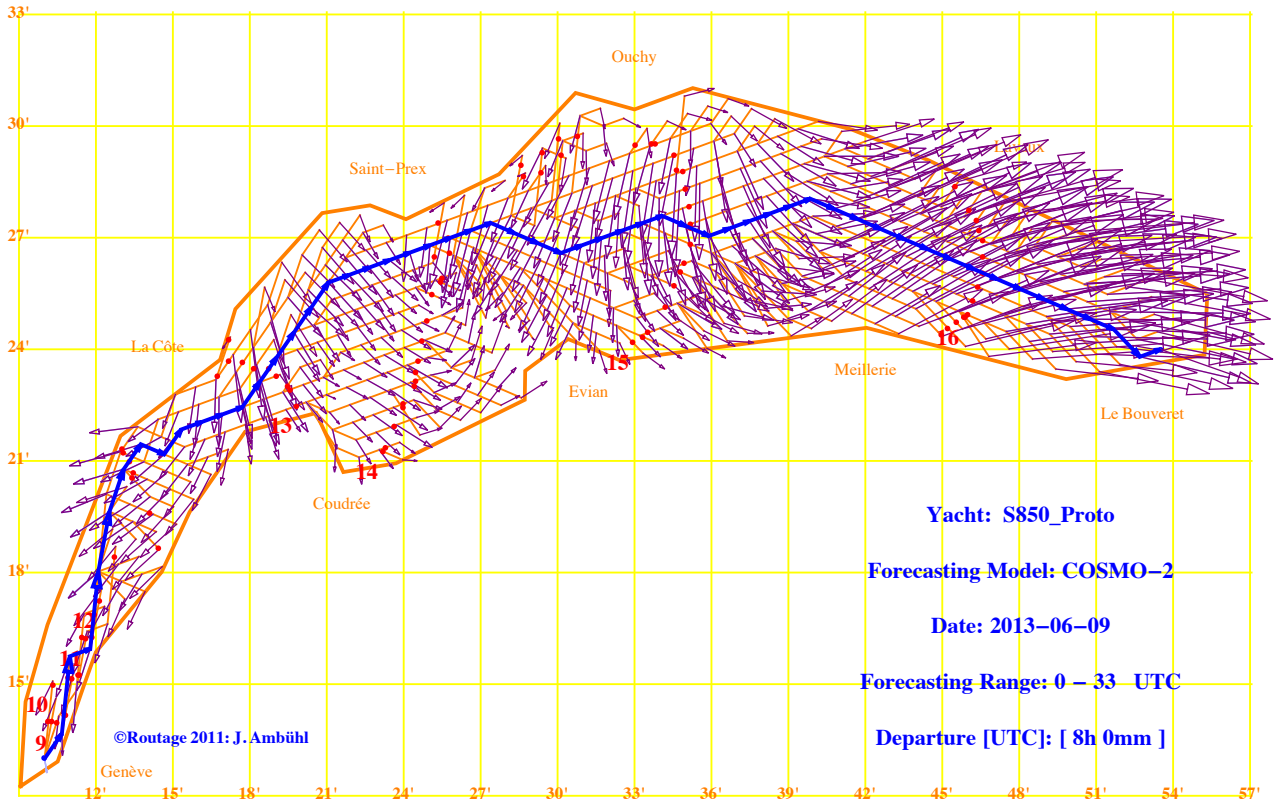

Figure 1. Navigation simulée de Genève au Bouveret

Ceci n'est qu'une simulation, basée sur des éléments réels. Le champ de vent est la prévision standard livrée par le modèle numérique COSMO-2 de Météo Suisse, le voilier - bien réel- appartient à la catégorie S850_Proto, enfin, cerise sur le gâteau, la figure 1 était disponible le 9 juin vers 7 heures du matin, soit 3 heures avant le coup de canon virtuel. L'explication suit, mais je vous raconte tout d'abord une histoire.

Histoire

Tout commença en 1984. Le navigateur helvétique Pierre Fehlmann préparait la Course autour du monde à la voile, la redoutable Whitbread Round the World Race 1985-86. Son voilier, un maxi baptisé UBS-Switzerland, était en construction au chantier naval Décision à Morges. L'EPFL offrait du temps de calcul sur son CDC-Cyber, le monstre informatique de l'époque. En cet été 1984, Fehlmann visita un jeune météorologiste et mathématicien appliqué en poste à Genève, l'auteur, et l'apostropha pour savoir "*s'il n'aurait pas une astuce pour s'en sortir avec la météo du pot au noir*". A l'époque instructeur de vol à voile, notre scientifique connaissait une autre histoire, selon laquelle le vélivole Paul MacCready avait gagné les championnats du monde de vol à voile 1954 à Saint Yan, en France, en construisant et utilisant un calculateur analogique[1] directement monté sur le variomètre de son planeur. Cet engin prenait en compte le potentiel de la météo, le diagramme de performance ainsi que la vitesse verticale du planeur. MacCready inspira notre météorologue.

[1] Une règle à calcul circulaire.

A une tout autre échelle, un des premiers modèles de prévision météorologique planétaire avait démarré son activité au Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme ECMWF, à Reading. Les systèmes mondiaux de télécommunication informatique se mettaient en place (Internet était sur les fonts baptismaux). Baigné dans le contexte innovateur de l'époque, notre scientifique acquit rapidement la conviction qu'une technique d'optimisation mathématique nouvellement créée, nommée programmation dynamique, pouvait être appliquée au routage des voiliers, au plan global. Travaillant intensément avec Pierre Eckert et Bertrand Cardis, et avec le soutien de l'EPFL et Météo Suisse[2], la petite équipe transforma la vision en réalité. Un système complet de calcul et de décision basé sur les prévisions ECMWF fut mis en place avec le résultat que l'on connaît: UBS-Switzerland, Pierre Fehlmann et son équipage gagnèrent la Whitbread 1985-86 [Ref. 2]. Le routage en temps réel étant interdit à l'époque, seules des analyses climatiques globales pouvaient être réalisées avant une régate. Elles étaient utilisées pour discerner 'à l'oeil' des options optimales, par exemple dans le pot au noir. Une telle simulation, calculée à l'époque pour l'étape Punta Del Este - Perth (Amérique du Sud et Australie) de la Whitbread 1992, est présentée en projection à la figure 2. Le continent esquissé est l'Antarctique. L'étape correspond à une navigation sans escale dans l'atlantique sud, puis dans les 50èmes rugissants de l'océan indien austral. Du point de vue de l'engagement physique des marins, une espèce de Patrouille des Glaciers océanique qui aurait duré un mois.

Au début des années 1990, Bertrand Piccard entra en contact avec Pierre Eckert et l'auteur en vue de préparer un vol autour du monde en ballon. Pierre Eckert assuma le développement des algorithmes de décision adaptés au vol des ballons. Ses simulations permirent tout d'abord de convaincre les sponsors de la faisabilité d'un tel vol, puis de dimensionner le ballon, une tâche assumée par l'EPFL, enfin d'assurer le routage en temps réel. Après deux tentatives infructueuses, décollant de Châteaux-d'Oex le premier mars 1999, Piccard réussit son vol autour du monde en 20 jours, accompagné de son copilote Brian Jones.

Durant toutes ces années, la Coupe America était restée en ligne de mire d'une guilde de navigateurs, entrepreneurs et scientifiques romands. Ernesto Bertarelli releva le défi avec Alinghi. Parallèlement à l'immense effort technologique consistant à calculer, construire et tester les voiliers, le Professeur Robert Dalang de l'EPFL conçut avec ses assistants Laura Winckenbosch et Frédéric Dumas les algorithmes de routage satisfaisant les règlements rigoureux de la Coupe America. La méthode appliquée n'était plus la simple programmation dynamique des années 1980, mais l'optimisation stochastique, plus complexe[3]. Le résultat est connu. Alinghi, Ernesto Bertarelli et son équipage ramenèrent la Coupe America en Europe en 2003, et la défendirent avec succès à Valence en 2007 [Ref.3].

---

[2] A l'époque encore nommée Institut Suisse de Météorologie.

[3] L'optimisation stochastique est au coeur de la mathématique financière et joue un rôle clef dans la prise de décision automatique sur le marché des options.

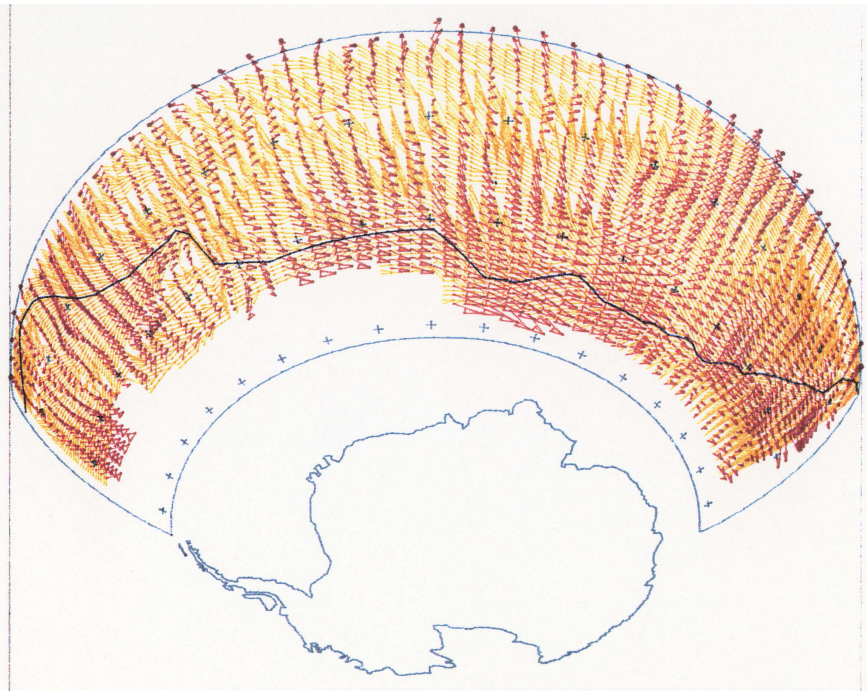

Figure 2. Simulation de l'étape Punta del Este - Perth de la course autour du monde 1992. Voilier: Merit 1. La vue est tridimensionnelle, depuis l'espace, le continent esquissé est l'Antarctique.

Note pour les informaticiens: le plotter utilisé à l'époque ne connaissait que trois instructions: "pen up", "pen down" et "move(x,y)". Tout le reste était programmé à la main.

Routage lacustre

Sur une base plus modeste, l'idée du routage lacustre des voiliers était présente dès le début de la saga, bien que les modèles numériques de l'époque n'aient pas été capables de prévoir les risées. La situation a évolué. Non seulement la puissance de calcul des machines a explosé, mais de nouveaux logiciels de développement autorisent la mise en oeuvre d'algorithmes plus sophistiqués que ceux de l'époque. En particulier, les modèles COSMO-2 et COSMO-1 de Météo Suisse livrent des prévisions fiables à l'échelle kilométrique. Ainsi, travaillant sur une base privée, j'ai mis à jour les anciens algorithmes en faisant usage des systèmes informatiques actuels. Le dispositif a été testé une première fois en 2011 sur le Lac de Constance au cours de la classique Konstanz-Bregenz pour la Yole de Marco Stoll, une deuxième fois au Bol d'Or 2013, en collaboration avec Philippe Jeanneret.

Le logiciel fait appel à trois modules principaux. Le premier, externe, est le modèle de prévision COSMO-2. Le second est le diagramme polaire du voilier, décrivant l'enveloppe de performance de celui-ci. Le troisième module forme l'algorithme de décision proprement dit. Abordons les détails.

COSMO-2

Ce modèle numérique a été développé dans le cadre du COnsortium for Small scale MOdelling et est actuellement exploité par Météo Suisse[4]. Il simule l'ensemble des phénomènes météorologiques physiques se déroulant dans un domaine rectangulaire couvrant la région alpine de Montpellier en France, au sud-ouest, à Brno en Tchéquie, au nord-est. Il opère sur une grille rectangulaire de 2.2 km de côté dans la dimension horizontale et sur 60 niveaux dans la verticale, jusqu'à la stratosphère. Il hérite ses donnée de bord d'un modèle plus vaste couvrant l'Europe, COSMO-7, lui même "niché" dans le modèle ECMWF global. Enfin, COSMO-2 est équipé d'un dispositif de "nudging" - un procédé d'apprentissage semblable à celui que l'on rencontre dans les réseaux neuronaux - conférant au modèle la faculté de prendre en compte en temps réel les données d'observation disponibles sur le domaine de prévision.
Pour le théoricien, COSMO-2 est un système dynamique non-linéaire de 78 millions de variables, la dimension de son espace de phase. Intégré en routine au Centre suisse de calcul scientifique, CSCS, à Lugano, il livre 8 fois par jour des prévisions à +32 heures sur le domaine précité[5]. L'immense complexité du dispositif laisse le néophyte pantois.

Les champs de vent à 10 mètres au dessus de l'eau ou du terrain calculés par COSMO-2 le samedi 15 juin 2013 à 0 h. UTC (GMT) pour les échéances de 14 UTC (panneau supérieur) et 23 UTC (panneau inférieur) sont présentés sur la figure 3. Le champ des vecteurs verts émane du modèle, celui des vecteurs bleus résulte d'une interpolation sur la maille plus fine d'un réseau de décision décrit plus loin.

---

[4] COnsortium for Small scale MOdelling: www.cosmo-model.org;
Modèles COSMO: www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/wetter/modelle.html

[5] www.cscs.ch

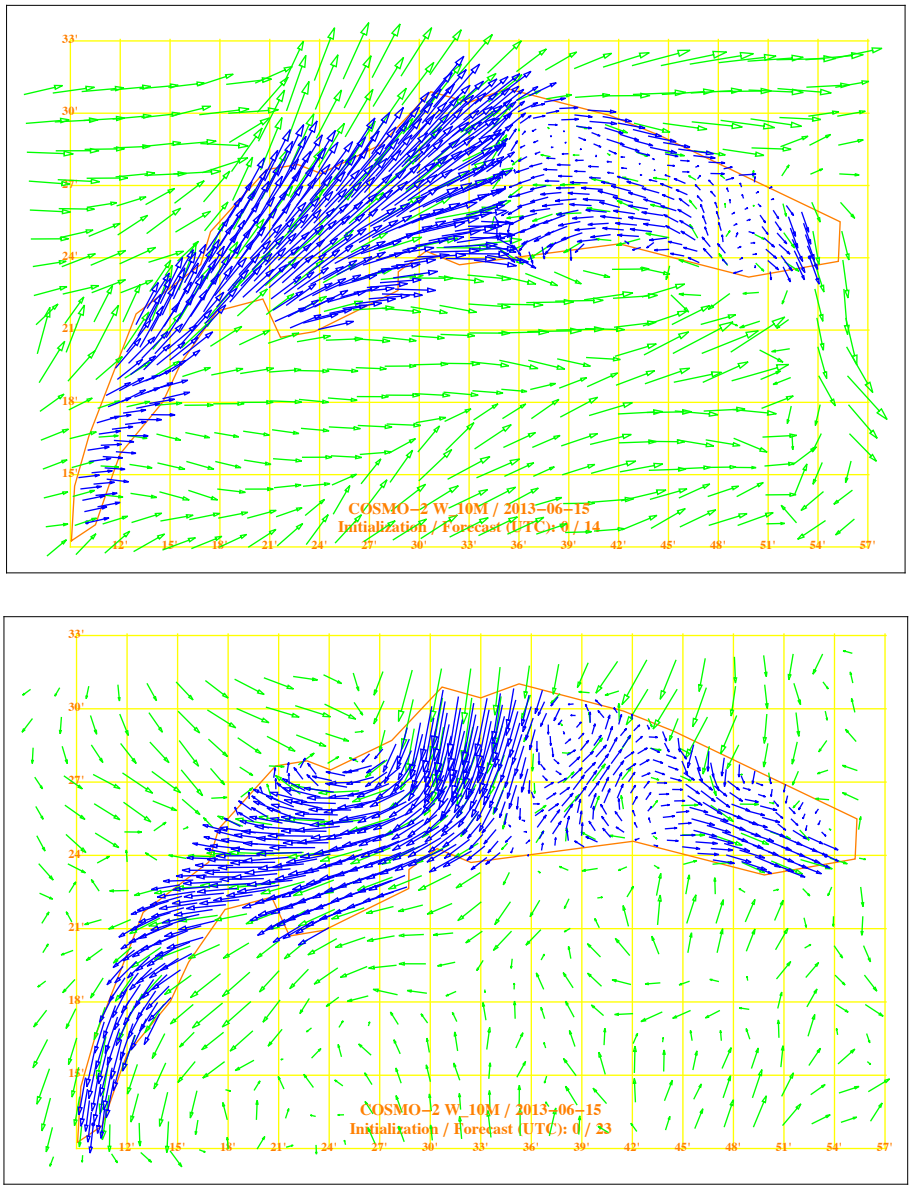

Figure 3 Prévision COSMO-2 des champs de vent du samedi 15 juin 2013 à 0 h. UTC. Vecteurs verts: modèle. Vecteurs bleus: interpolation sur une maille plus fine.

Sur chaque panneau, le champ de vecteurs bleus illustre le vent sur le lac à 10 mètres au dessus de l'eau, à 14 UTC sur le panneau supérieur, à 23 UTC sur le panneau inférieur.

Diagramme polaire

Le diagramme polaire d'un voilier prescrit sa vitesse sur l'eau, pour chaque angle d'incidence et intensité du vent sur sa course.

Le diagramme, présenté sur la figure 4, est paramétré d'une part en termes d'angle d'incidence du vent sur la route du voilier, de 30 à 180 degrés, et d'autre part en termes de la vitesse du voilier, selon les cercles concentriques de rayons 1 à 16 noeuds. Le réseau de courbes rouges dessinées en filigrane paramétrise la vitesse du vent réel, mesuré par rapport à une référence géographique fixe. La courbe de vent réel 17 noeuds est mise en exergue. Ainsi, si le voilier navigue sous un vent de 17 noeuds, au largue sous un angle d'incidence de 115 degrés, sa vitesse mesurée sur le rayon polaire vaut 10.5 noeuds. Cette vitesse est reportée en tant que vecteur sur l'axe d'ordonnée. "Allure", en langage marin, ne désigne pas seulement la vitesse d'un voilier, mais également l'angle d'incidence du

vent sur sa course. Celui-ci est gréé “tribord amures” si le vent le touche de la droite, “bâbord amures” si le vent le touche de la gauche. Le diagramme polaire est symétrique et vaut *mutatis mutandis* pour bâbord amures, il correspond à un voilier judicieusement gréé, une responsabilité incombant à l’équipage.

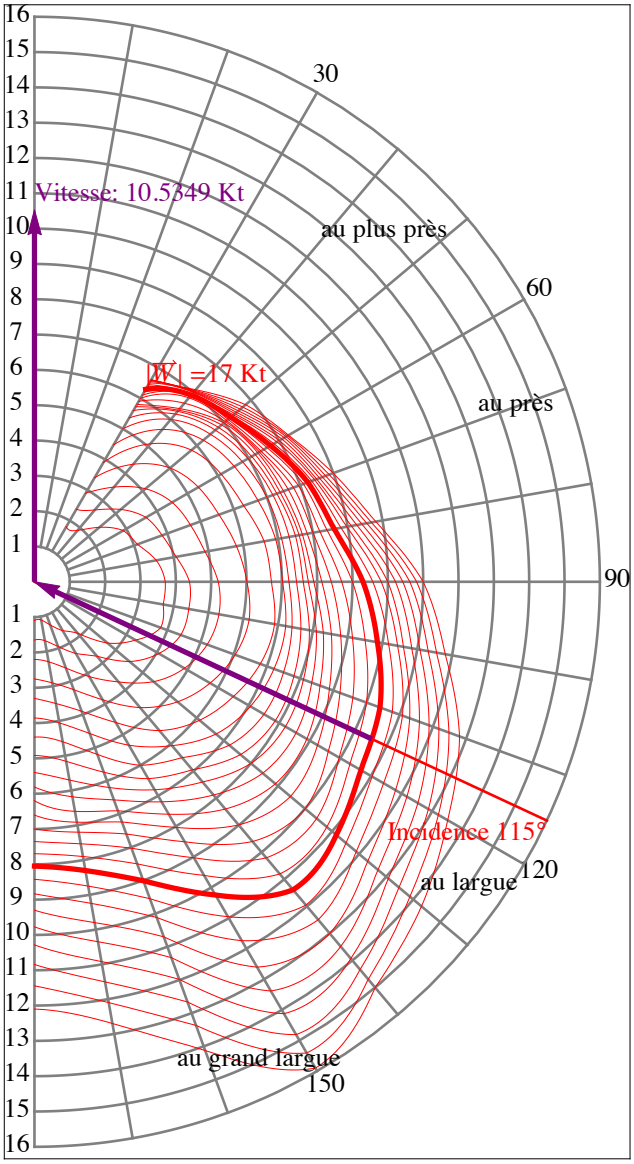

Figure 4. Diagramme polaire d’un voilier. Coordonnées: angle polaire: incidence du vent sur la course du voilier. Rayon polaire: vitesse du voilier exprimée en noeuds.
Dans le cas de figure, le voilier “file 10.5 noeuds au largue tribord amures sous 17 noeuds de vent réel”.

Décision

Le schéma de décision fait appel à la méthode de mathématique appliquée déjà évoquée, nommée “Programmation Dynamique”. Mise en oeuvre dans de nombreux domaines, elle consiste a définir une séquence de décisions élémentaires portant sur l’évolution d’un “processus”, tenant compte d’une part des progrès réalisés jusqu’ici, d’autre part des options à venir. Le “processus” peut par exemple être un portefeuille financier ou un réseau électrique sur lequel la charge doit être optimisée en tenant compte d’une part des perspectives de consommation, d’autre part des sources d’énergie renouvelable, fluctuantes en fonction de la météo.

Un coût partiel, qui peut être virtuel, est associé à chaque décision élémentaire. Le processus est optimisé lorsque la séquence des décisions élémentaires est choisie de telle sorte que la somme des coûts partiels soit minimale. Dans notre cas, le coût virtuel n'est autre que la durée de navigation.

La méthode est illustrée sur la figure 5 à l'aide un exemple simple. Un véhicule navigue à vitesse constante d'un point de départ à un point d'arrivée, tous deux notés sur le graphe. Le domaine géographique sur lequel une route peut être envisagée est couvert d'un réseau dessiné en arrière plan en rouge. Chaque arc de ce réseau représente une option possible de route, d'un sommet appartenant à une tranche, perpendiculaire à la direction générale de la route, vers un sommet appartenant à la tranche suivante, située immédiatement à droite. L'algorithme construit l'arborescence croissant progressivement de gauche à droite dans le réseau.

Assimilons chaque tranche du graphe à une génération biologique. Une décision élémentaire est prise en chaque noeud d'une génération, nommé ici "noeud enfant". Cette décision consiste, pour chaque enfant, à déterminer le noeud parent, appartenant à la génération précédente, tel que le temps d'arrivée à ce parent ajouté à la durée de parcours du parent à l'enfant soit minimale. Chaque enfant choisissant, dans cette bizarre société, son unique parent, la structure engendrée est un arbre dont les branches sont toutes des routes de durée minimale. Chaque branche à son origine au point de départ, une seule joint le point de départ à celui d'arrivée: la solution optimale. Dans cet exemple, les points de départ et d'arrivée sont choisis en Europe, respectivement en Nouvelle Zélande. La vitesse du véhicule étant constante, la route calculée est l'orthodromie, la plus courte route sur la sphère.

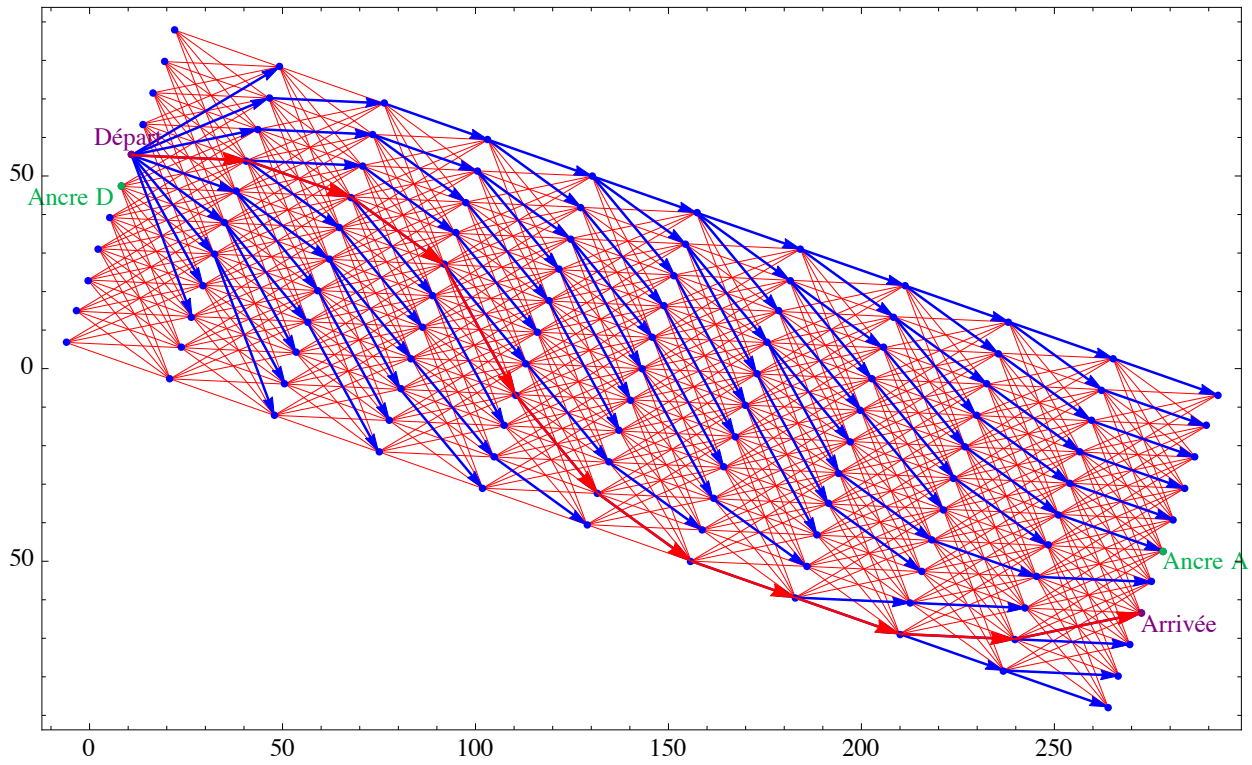

Figure 5. Réseau (en arrière plan en rouge) et arbre de décision, en bleu. Route rouge: décision optimale. Abscisse: Longitude sur la sphère terrestre, ordonnée: longitude. La route optimale est l'orthodromie entre le point de départ, situé en Europe, et le point d'arrivée situé en Nouvelle Zélande. Les ancres de départ et d'arrivée spécifient la position du réseau.

Bol d'Or

Les trois composantes de notre "processus" sont désormais disponibles: l'évolution météorologique du vent sur le lac, le modèle du voilier et le processus de décision. Leur intégration en un logiciel informatique cohérent demande un rude effort. Le résultat est présenté à la figure 6.

Le panneau supérieur de la figure 6 est l'exact correspondant de la figure 5, où le réseau de décision sous-jacent est taillé à la géographie du lac. La vitesse du véhicule - notre voilier - n'est plus constante mais dépend d'un paramètre extérieur fluctuant à chaque instant en chaque endroit du lac, le vent. L'interaction entre le voilier et le vent, non linéaire, est décrite par le diagramme polaire, figure 4. Les orbes formés des points rouges, perpendiculaires à la direction générale de la course, sont des isochrones indexées en heures UTC. Elles révèlent les positions qu'atteindraient des clones de notre voilier dans les toutes branches de l'arbre, et livrent une information portant sur la progression générale de la régate dans le graphe. Les isochrones sont également riches d'enseignement sur la figure 1.

Dans cette simulation du 15 juin 2013, l'arbre, est divisé en deux sous-domaines distincts, un premier croissant depuis le Petit Lac jusqu'au large d'Ouchy, un second naissant devant Evian et croissant dans le Haut Lac. Une césure sépare ces deux sous-domaines d'Evian en direction de Lavaux. Une unique connexion, ténue, est établie entre les sous-domaines en face d'Evian. L'algorithme l'exploite en prenant une option peu après 11

heures au large de Saint-Prex. Cette structure, ainsi que la prise d'option correspondante, est guidée par le champ de vent prévu par le modèle, tel qu'il est décrit sur la figure 3. Ainsi, l'option prise à 11 heures devant Sant-Prex porte ses fruits 3 à 6 heures plus tard, dans le Haut Lac.

Le panneau inférieur de la figure 6 présente le même diagramme. Le réseau de décision est cependant effacé et un champ de vent ajouté. Une précision s'impose: le champ de vent est dynamique, il n'est pas dessiné à une heure fixe. Chaque vecteur vent est ancré en un noeud de l'arbre et représente le vent en ce noeud à l'heure à laquelle l'algorithme y ferait passer le voilier. L'examen du panneau inférieur de la figure 6 permet ainsi de discerner sous quelle allure naviguerait un voilier à un instant donné en un noeud de l'arbre. C'est cette propriété qui m'a permis de décrire la régate virtuelle de la figure 1. Cette carte, il convient de le répéter, est une prévision. Elle était dans les mains du skipper de S850-Proto, Philippe Jeanneret, samedi 15 juin 2013 vers 7 heures du matin. La carte correspondante, portant sur la navigation de retour Bouveret-Genève, était également disponible.

Philippe Jeanneret conclut son rapport de course dans les termes suivants: "*Nous avons été agréablement surpris par la conformité générale des airs avec les prévisions de COSMO-2, exception faite des vents d'orage en fin de journée et de l'absence de vent du nord en soirée et dans la nuit sur la côte suisse. Nous avons été particulièrement surpris par les options proposées par le routage. Elles se sont avérées très pertinentes, en particulier le 15 juin entre 17 h. 30 et 20 h. sur le Haut Lac.*" .

Ma conclusion: La navigation s'inspire depuis la nuit des temps des progrès de la technologie. Les temps ne sont-ils pas mûrs pour l'autorisation du routage automatique, généralisé, accessible en temps réel via Internet aux régatiers?

Je remercie Philippe Jeanneret pour sa collaboration lors de la préparation de la régate, Maëlle Zimmermann pour la relecture attentive du texte, ainsi que Météo Suisse pour la mise à disposition des données de prévision numérique.

Références

- Guex A. 1947. Voiles et Carènes, le Léman et les vents du lac. (Collection Bertil Galland "Visages sans frontières" Edition 24-Heures 1982).
- Ambühl J. Eckert P: 1987. Calcul de la route optimale d'un voiler. Application à la course autour du monde du voilier UBS-Switzerland. (Arbeitsbericht no. 141 der schweizerischen meteorologischen Anstalt).
- Dumas F. 2010. Stochastic Optimization of Sailing Trajectories in an America's Cup Race. (Ph.D. thesis 4884. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland)

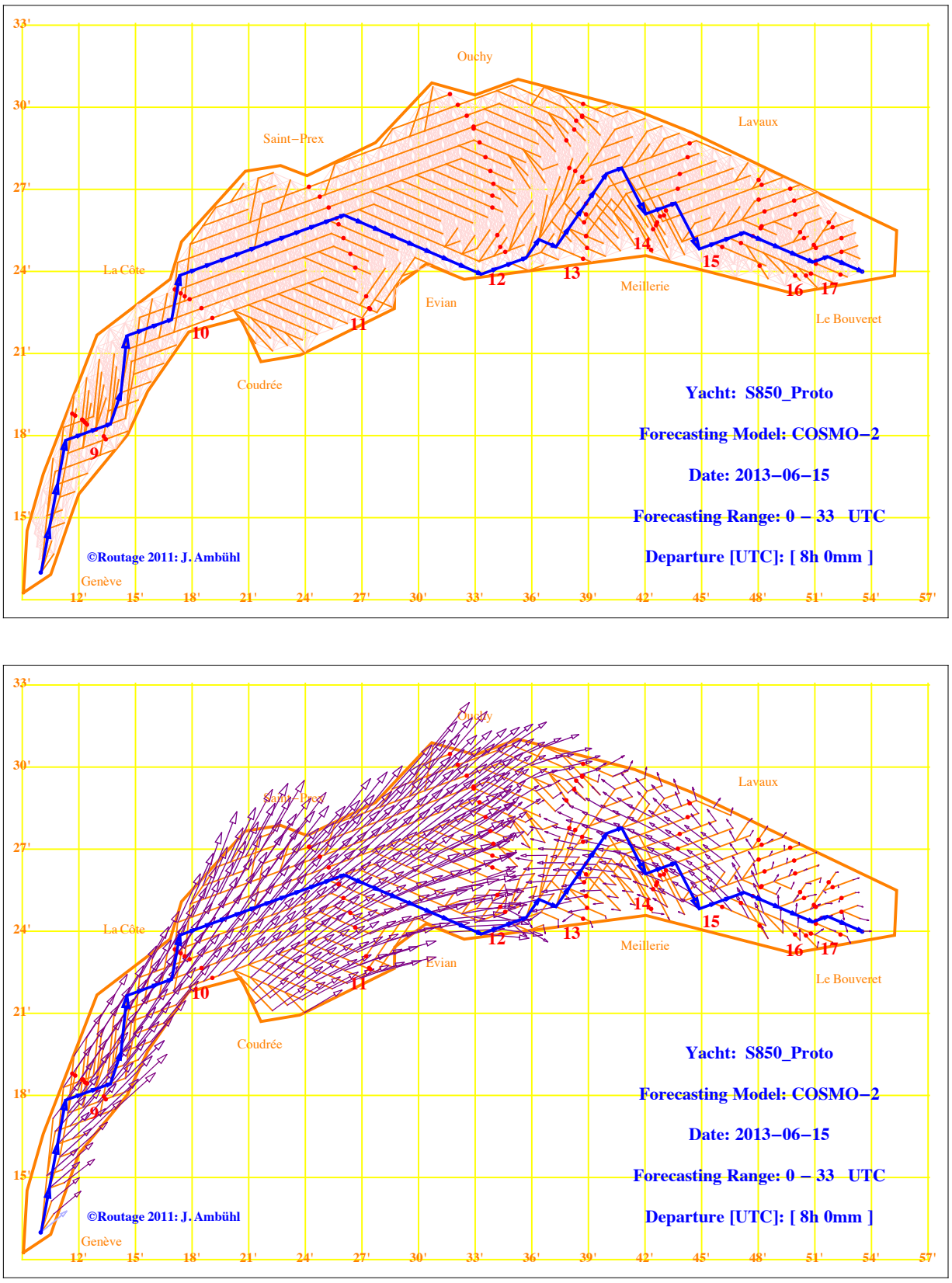

Figure 6. Simulation du Bol d'Or du 15 juin 2013. Route directe Genève-Bouveret faisant usage des prévisions COSMO-2 de ce jour, calculée pour le voilier dont la polaire est présentée à la Figure 4. Panneau supérieur: réseau de décision sous-jacent, arbre de décision et isochrones (perpendiculaires à la direction générale de la course, indexées en heures). Panneau inférieur: même présentation, sans le réseau de décision, mais avec le champ de vent tel qu'il se déroule au cours de la course.