

**Zeitschrift:** bulletin.ch / Electrosuisse  
**Herausgeber:** Electrosuisse  
**Band:** 102 (2011)  
**Heft:** 6

**Artikel:** Logiciel d'aide à la navigation pour bateau solaire  
**Autor:** Taillard, É. / Bailly, P. / Affolter, J.-F.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-856819>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 03.04.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Logiciel d'aide à la navigation pour bateau solaire

## Routage optimal du catamaran PlanetSolar

Trouver la meilleure voie de navigation pour un véhicule solaire implique de prendre en considération de nombreux paramètres variant dynamiquement dans le temps, comme l'ensoleillement et la vitesse du vent. Une équipe de l'HEIG-VD a mis au point un logiciel pour optimiser le routage de PlanetSolar, le catamaran qui est en train de réaliser le premier tour du monde mû uniquement à l'énergie photovoltaïque. La technique de calcul développée pourrait aussi être utilisée à l'avenir pour diminuer la consommation d'automobiles hybrides.

tenant compte des conditions et des contraintes intervenant dans le déplacement du véhicule.

### Une première dimension : la position

La problématique de base de l'aide à la navigation routière ne prend en considération qu'une seule dimension, la position  $x$  du véhicule sur un tronçon routier. En effet, le système est contraint à rester sur une route. Un algorithme de routage, tel celui de Dijkstra, doit décider s'il faut prendre à gauche ou à droite aux prochains carrefours, connaissant le point d'arrivée désiré. Toutes les données du problème sont connues a priori, ce qui permet à la fois de précalculer certains itinéraires pour diminuer les besoins en calcul et de stocker le tout dans la mémoire d'un appareil autonome.

### Deux dimensions : la position et l'heure

En plus de cette première dimension, les navigateurs routiers de la dernière génération sont capables d'en gérer une seconde, le temps, ou plus spécifiquement l'heure de départ  $h$ . En raison de la congestion du trafic à certains moments de la journée, l'itinéraire optimal peut grandement varier d'une heure à l'autre. Cependant, il est possible de raisonnablement modéliser les données du problème de façon statique. À la place d'associer pour chaque tronçon un temps de parcours fixe, il suffit de lui associer une fonction qui dépend de l'heure, fonction qui peut également être modélisée a priori.

### Trois dimensions : la longitude, la latitude et l'heure

La navigation sur mer ouverte est un problème un peu plus délicat puisqu'elle intervient dans un espace doublement continu : il n'est plus question ici de rester sur un tronçon, mais sur un plan d'eau navigable. La position du bateau étant donnée par sa longitude et sa latitude, il s'agit de décider du cap à suivre, et pendant combien de temps il devra être suivi. La vitesse du bateau dépend de plus des conditions météorologiques, donc de

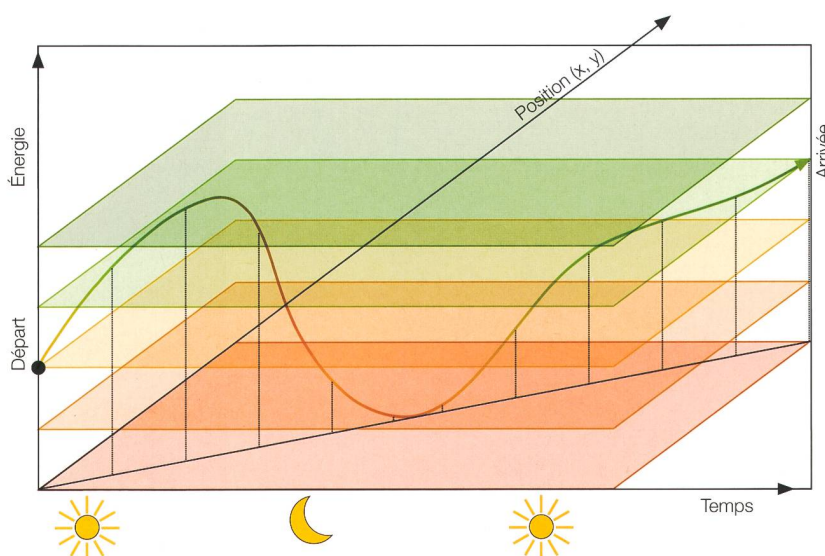
É. Taillard, P. Bailly, J.-F. Affolter, P. Goulpié, Ph. Morey

Avec l'avènement du GPS, l'aide à la navigation routière s'est grandement popularisée ces dernières années, au point que de nombreux véhicules en sont équipés en série. Le calcul du chemin le plus rapide entre un point de départ et un point d'arrivée dans un réseau routier se fait généralement à l'aide de variantes de l'algorithme de Dijkstra. Ce dernier est très efficace lorsque le temps qu'il faut pour parcourir chaque tronçon du réseau est connu a priori. L'utilisation d'une

autre caractérisation des tronçons, par exemple leur longueur ou encore la quantité de carburant qu'il faut pour les parcourir, permet de déterminer le plus court chemin ou le chemin correspondant à une consommation minimale.

### Les degrés de complexité de l'aide à la navigation

L'état du système à piloter est spécifié par un certain nombre de paramètres ou dimensions. Cet état doit être calculé en



**Figure 1** Trajet à vitesse constante dans l'espace position-temps-énergie. La puissance dépensée par les moteurs étant constante, le niveau d'énergie stocké dans les batteries dépend de l'irradiation solaire. De jour, cette énergie augmente, alors que la nuit, elle baisse puisque les panneaux solaires ne produisent pas d'électricité.



**Figure 2** Le catamaran solaire PlanetSolar lors de son escale fin mars à Papeete, en Polynésie française.

l'heure à laquelle il se trouve à une certaine position. Il est dès lors nécessaire de connaître les prévisions météorologiques, ce qui requiert des données externes. Finalement, il faut connaître les caractéristiques du bateau. Ce n'est qu'une fois tous ces paramètres connus qu'un itinéraire peut être calculé.

La problématique est assez bien résolue, mais il n'est plus possible d'intégrer l'aide au routage dans un appareil autonome. Il existe sur le marché des logiciels spécialisés pour la navigation à voile, logiciels qui sont gourmands en puissance de calcul. Ils s'appuient sur l'hypothèse que toute l'énergie à disposition (le vent) est utilisée immédiatement pour aller aussi vite que possible, ce qui est raisonnable pour un voilier, mais pas pour un bateau solaire.

#### La quatrième dimension : l'énergie stockée

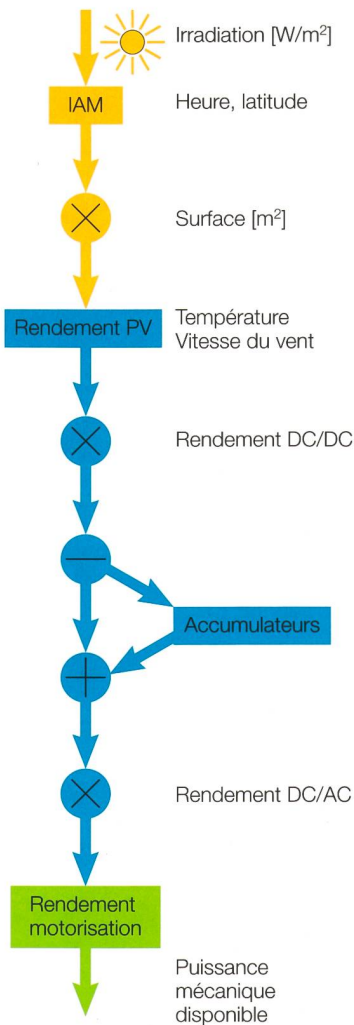
En effet, la navigation à l'énergie photovoltaïque doit intégrer une dimension supplémentaire. Certes, l'énergie principale ne provient pas du vent mais de l'ensoleillement. Toutefois, ce n'est pas ce qui complique notablement la situation. Une nouvelle dimension vient du fait que la vitesse du bateau peut être adaptée en fonction de la situation énergétique : si le catamaran va lentement (et qu'il y a du soleil!), il sera à même de stocker de l'énergie dans ses batteries.

En allant vite, il devra décharger ces dernières. La 4<sup>e</sup> dimension qu'il faut intégrer est donc le niveau de charge des batteries. Ainsi, l'état du bateau est spécifié par sa longitude, sa latitude, l'heure et l'énergie disponible dans les batteries. Un bon logiciel d'aide à la navigation devra donc intégrer correctement ces 4 dimensions s'il ne veut pas envoyer le bateau directement dans la 5<sup>e</sup>, par le fond!

La **figure 1** illustre un trajet à vitesse constante dans cet espace position-temps-énergie. Lorsque le soleil brille, le niveau d'énergie stockée dans les batteries peut augmenter, alors que la nuit, il faut puiser dans les réserves. En l'absence de vent et de courants, il est judicieux de naviguer à une vitesse aussi régulière que possible, car l'énergie nécessaire augmente avec le cube de la vitesse.

#### Étude du comportement de PlanetSolar

PlanetSolar est un catamaran de 31 m de long sur 15 m de large, mû uniquement grâce à l'énergie photovoltaïque (**figure 2**). Il est alimenté en énergie grâce aux 38 000 cellules solaires recouvrant son pont. De jour, elles permettent non seulement de fournir de l'énergie pour propulser le bateau, mais également d'en emmagasiner dans les 6 blocs de 12 batteries lithium-ion placés dans ses coques. Le bateau peut ainsi se déplacer égale-



**Figure 3** Modèle simplifié de la chaîne énergétique du bateau.

ment la nuit ou puiser de l'énergie supplémentaire si nécessaire.

Afin de pouvoir développer un logiciel permettant d'optimiser sa trajectoire, il a fallu étudier soigneusement les comportements énergétique et dynamique de PlanetSolar.

#### Comportement énergétique

Une équipe de l'Institut d'énergie et systèmes électriques de la HEIG-VD (Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, qui fait partie de la HES-SO, la Haute École Spécialisée de Suisse occidentale) a proposé différents modèles de rendement pour la chaîne énergétique, de l'irradiation en un certain endroit à une certaine heure jusqu'à la puissance de propulsion fournie par les hélices. Ces modèles doivent intégrer des dizaines de paramètres. Les principaux composants de cette chaîne sont les pan-

neaux photovoltaïques, les convertisseurs de tension, les batteries, les commandes des moteurs, les moteurs et finalement les hélices.

L'énergie qui peut être transformée en électricité par les panneaux solaires dépend de la position géographique et de l'heure, mais également des conditions météorologiques. Naturellement, la présence de nuages diminue l'irradiation, mais il faut aussi prendre en considération la température extérieure et la vitesse du vent pour tenir compte de la baisse de rendement des panneaux solaires avec l'élévation de leur température.

La **figure 3** illustre la modélisation simplifiée de la chaîne énergétique utilisée dans ce projet. Le premier étage d'électronique est constitué par le régulateur de charge, composé lui-même de plusieurs convertisseurs DC/DC mis en parallèle pour améliorer le rendement sur une large plage de puissances. L'énergie électrique est ensuite répartie sur les accumulateurs et l'électronique de commande du moteur. Vu que les courants de charge ou de décharge des batteries sont très faibles par rapport à leur capacité (la puissance des panneaux et des moteurs est limitée à une centaine de kW), les batteries ne s'échauffent pratiquement pas et le rendement d'un cycle de charge/décharge peut être considéré comme constant.

Le bateau est doté de 4 moteurs électriques pour sa propulsion, 2 dans chacune de ses coques. Une paire de ces moteurs est optimisée pour la vitesse de croisière, vitesse correspondant à l'énergie disponible en moyenne sous de faibles latitudes, et l'autre paire permet de disposer de plus de puissance, notamment pour les manœuvres. Le rendement des moteurs dépend de nombreux facteurs, comme les pertes dans les fers (hystérésis), la vitesse de rotation, les pertes dans le cuivre et les frottements.

Les hélices sont très particulières. Pour obtenir un rendement allant jusqu'à 80%, elles ont été conçues avec un pas variable et fonctionnent en n'étant qu'à moitié immergées. La **figure 4** montre une de ces hélices photographiée lors de la première présentation publique du bateau dans sa halle de fabrication, à Kiel (D) en février 2010.

### Comportement dynamique

Pour l'optimisation de la trajectoire du bateau, il est essentiel de pouvoir estimer la puissance nécessaire pour faire avancer le bateau dans une direction et à une

vitesse donnée. Cette puissance est fortement tributaire des conditions météorologiques. En effet, la surface apparente du bateau face au vent est conséquente, impliquant une forte résistance en cas de vent de face et une dérive non négligeable par vent de côté puisqu'il n'est pas équipé de dérive afin de diminuer sa résistance hydrodynamique.

À cette dérive s'ajoutent les courants de surface. Il faut se rendre compte que le bateau, dont le poids peut avoisiner les 90 t une fois chargé, ne dispose en régime de croisière que d'une puissance équivalente à celle d'une mobylette. Il faut donc être particulièrement attentif à ne pas se trouver dans des situations incontrôlables.

### Calcul d'une trajectoire optimale

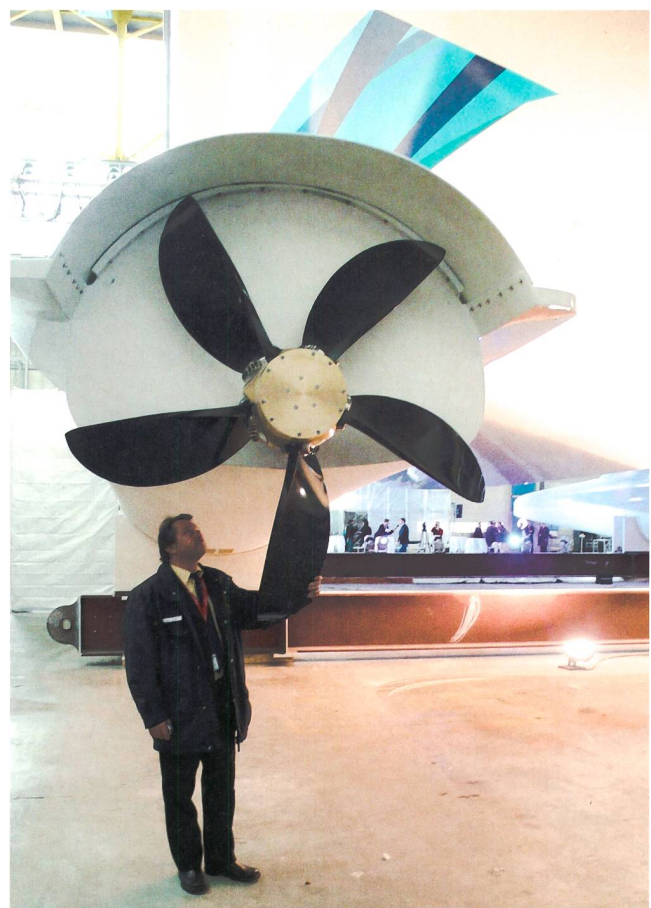
Le calcul d'une trajectoire permettant d'atteindre le plus rapidement possible une destination à partir d'un point de départ donné, se fait en appliquant un algorithme relativement standard de recherche de chemins optimaux. Comme cela a été mentionné plus haut, la première difficulté à prendre en considération consiste en le fait que le bateau ne

se déplace pas dans un réseau de transport avec des tronçons discrets, mais dans un espace bidimensionnel continu.

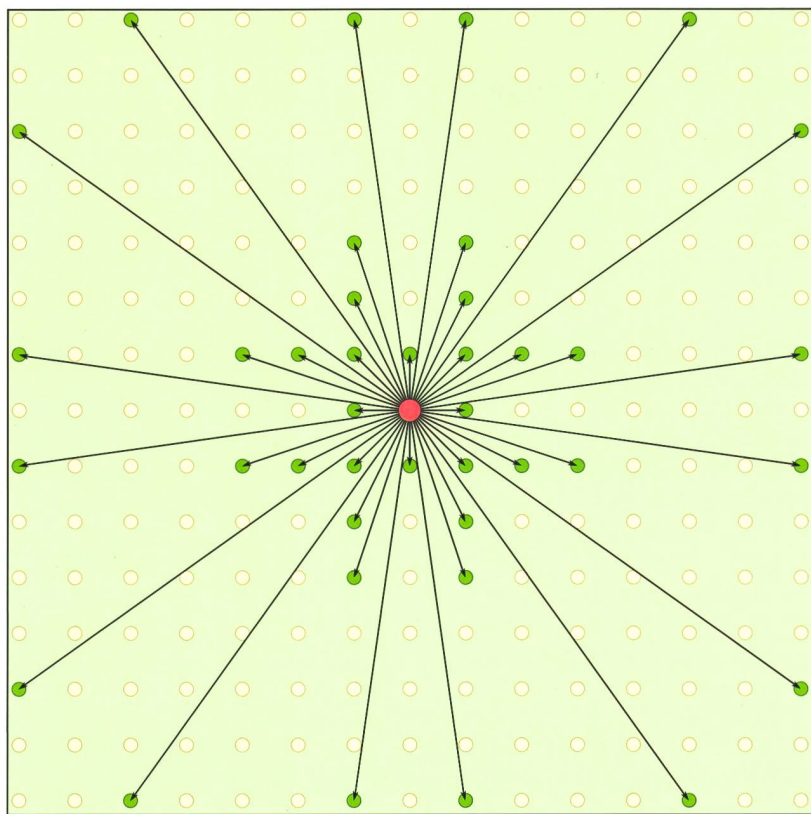
### Utilisation d'un maillage pour la position

Cette difficulté peut être contournée en considérant un maillage de la surface sur laquelle le bateau doit se mouvoir. Un maillage de 1/30° de degré (soit un carré de 3,7 km de côté à l'équateur) a été choisi pour permettre une précision suffisante dans les calculs. Seuls sont considérés des trajets élémentaires reliant deux nœuds de ce maillage. Pour un nœud donné, 40 trajets élémentaires judicieusement choisis sont évalués. Deux contraintes ont présidé au choix de ces trajets élémentaires: ils devaient être courts et aussi bien répartis que possible angulairement parlant. La **figure 5** illustre les trajets élémentaires retenus, qui permettent d'atteindre n'importe quel nœud du maillage en composant des trajets rectilignes d'une trentaine de kilomètres au maximum (ce qui correspond en principe à quelques heures de navigation).

À partir d'une situation spécifiée par la position du bateau (un nœud du maillage), l'heure et l'énergie disponible



**Figure 4** Une des hélices de PlanetSolar. Ces hélices, d'un diamètre de 2 m, ont des pales orientables et leur fonctionnement semi-immérgé leur assure un rendement très élevé, allant jusqu'à 80% selon les conditions d'utilisation.



**Figure 5** Un chemin est décomposé en une suite de petits trajets reliant les nœuds d'une grille, dont les mailles sont espacées de  $1/30^\circ$  de degré. Chaque nœud joue le rôle d'un carrefour d'où partent 40 tronçons répartis aussi régulièrement que possible sur  $360^\circ$ . Le logiciel calcule l'énergie nette dépensée ou collectée pour chacun de ces tronçons lorsque le bateau les parcourt à différentes vitesses.

dans les batteries, il est possible de calculer l'heure à laquelle chacun des 40 nœuds du maillage peut être atteint par un trajet élémentaire, dès lors que l'énergie résiduelle qui doit encore être disponible à l'arrivée a été fixée. Pour faire ce calcul, il est évidemment nécessaire de connaître les conditions météorologiques qui seront rencontrées durant le trajet.

### Discretisation de l'énergie

L'énergie dans les batteries est aussi une grandeur continue. Elle peut donc prendre une infinité de valeurs. Pour pouvoir appliquer un algorithme standard de recherche de chemins optimaux, il faut également discrétiser les états d'énergie, comme cela a été fait pour les positions. Un maillage tridimensionnel longitude-latitude-énergie est ainsi obtenu. Pour pouvoir se déplacer dans la dimension énergétique, il faut multiplier les 40 trajets élémentaires par le nombre d'états discrétisés d'énergie. Ce dernier doit être de l'ordre de la centaine pour une simulation suffisamment fine.

### Un routage complexe

Sachant que la météo pour les 4 ou 5 prochains jours a été déterminée de façon relativement fiable et que le bateau avance en moyenne à moins de 20 km/h, il est possible d'estimer à quelques millions le nombre de nœuds du maillage, soit un nombre du même ordre de grandeur que celui des carrefours du réseau routier européen. Cependant, le nombre de connexions à chaque nœud est autrement plus conséquent que pour un réseau

HEIG-VD

routier: en effet, le nombre moyen de routes arrivant à un carrefour est à peine supérieur à 3, alors que le nombre de nœuds potentiellement atteignables par des trajets élémentaires dans ce maillage s'exprime plutôt en milliers.

Par rapport à la quantité de calculs effectués pour trouver un plus court chemin dans un réseau routier, le routage d'un bateau solaire en nécessite des milliers de fois plus. Il faut en effet tenir compte du fait que le temps pour effectuer un trajet n'est pas une donnée statique, mais doit être estimé de façon dynamique, en prenant en considération des modèles de rendement énergétique et de comportement du bateau plus ou moins élaborés ainsi que les prévisions météorologiques.

### Le logiciel

À l'aide de techniques d'optimisation, une des spécialités de l'équipe de l'Institut de systèmes embarqués de la HEIG-VD, il a été possible de développer avec succès un logiciel intégrant les modèles énergétiques et calculant un itinéraire optimal pour le bateau solaire PlanetSolar, ceci pour une plage de temps correspondant à celle pour laquelle la situation météorologique peut être connue de manière relativement fiable. La **figure 6** illustre une capture d'écran de ce logiciel, représentant un trajet reliant Miami à Saint-Domingue. La couleur du trajet varie en fonction de l'état de charge des batteries. Comme le trajet va prendre plus de jours que la durée pour laquelle les prévisions météorologiques peuvent être déterminées, la fin du trajet est simulée en supposant une situation standard fixée d'avance, à l'exception des courants qui ne varient que très lentement dans les océans.

### Perspectives

La technique de calcul d'une route optimale pourrait s'adapter à la gestion

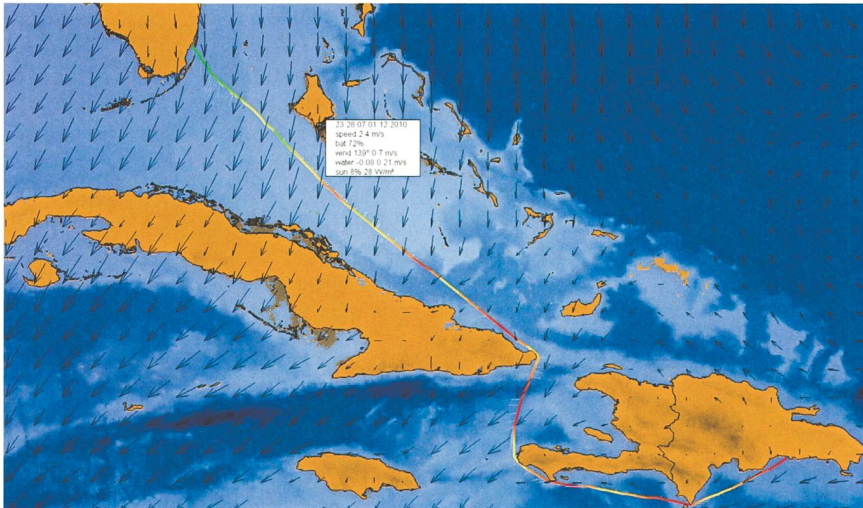
### Zusammenfassung

#### Navigationsoftware für Solarboot

#### Optimale Routenplanung des Katamarans PlanetSolar

Bei der Ermittlung der optimalen Route eines Solarfahrzeugs sind zahlreiche Parameter zu berücksichtigen, die zeitlich bedingt dynamischen Schwankungen unterliegen, wie Sonneneinstrahlung und Windgeschwindigkeit. Jetzt hat ein Team der Hochschule für Technik und Wirtschaft Waadt (HEIG-VD) eine Software zur Optimierung der Routenplanung des Katamarans PlanetSolar entwickelt, der sich zurzeit auf der ersten Weltumsegelung eines nur durch Sonnenenergie angetriebenen Boots befindet. In Zukunft könnte das entwickelte Berechnungsverfahren auch zur Verringerung des Verbrauchs von Automobilen mit Hybridtechnik eingesetzt werden.

CHe



**Figure 6** Trajet optimal pour rejoindre Saint-Domingue, au départ de Miami, selon les prévisions météorologiques du 30 novembre 2010. Le trajet est indiqué par un trait dont la couleur est modulée par l'état de charge des batteries (la pleine charge est en vert, et le niveau minimum en rouge). Les flèches noires indiquent la situation des vents le 3 décembre à midi, alors que les petits traits clairs le long du trajet indiquent la direction et la force des vents et des courants lors du passage du bateau. Le cartouche, qui peut glisser le long du trajet, précise les conditions de navigation locales.

d'un véhicule automobile hybride. À court terme, des avancées spectaculaires dans les capacités des batteries ne semblent pas prévues. Par conséquent, l'autonomie d'un véhicule tout électrique n'est pas compétitive face à celle d'une voiture disposant d'un moteur thermique.

Pour diminuer la consommation de carburant, il est cependant possible d'agir sur plusieurs niveaux. Tout d'abord, le moteur thermique doit fonctionner à son régime optimal. Ensuite, le véhicule doit être léger. Finalement, il faut récupérer l'énergie cinétique et potentielle. Plutôt que de coupler mécaniquement le moteur thermique aux roues via une boîte à vitesse plus ou moins compliquée et lourde, il peut être préférable de l'utiliser pour produire de l'électricité qui sera au

besoin stockée dans des batteries. Ainsi, le moteur thermique peut fonctionner à sa puissance optimale, c'est-à-dire légèrement supérieure à celle consommée en moyenne par le véhicule. La propulsion est assurée par des moteurs électriques, qui ont un rapport puissance/poids extrêmement élevé et qui permettent de récupérer l'énergie de freinage.

Pour diminuer le poids du véhicule, la capacité des batteries doit être limitée. Théoriquement, il est inutile de pouvoir stocker plus d'énergie que celle qui peut être récupérée lors de la descente d'un long col. Mais pour que cette énergie puisse être récupérée, il faut que les batteries soient déchargées au sommet du col. Par conséquent, la diminution des besoins énergétiques passe par une anticipation et

une gestion intelligente de ceux-ci. Le projet « PlanetSolar » a montré que ces techniques de calcul sont désormais au point.

**Informations sur les auteurs**

**Éric Taillard** est professeur en informatique à la HEIG-VD depuis 1999. Il a obtenu son diplôme d'ingénieur informaticien à l'EPFL en 1988, où il a également soutenu une thèse de doctorat au département de mathématiques dans le domaine des méthodes générales pour l'optimisation de problèmes difficiles. Il a par ailleurs obtenu en 1998 une habilitation à diriger des recherches à l'Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (F).

Institut MIS-TIC, HEIG-VD, 1401 Yverdon-les-Bains, eric.taillard@heig-vd.ch

**Patrick Bailly** est ingénieur informaticien diplômé de la HEIG-VD. Depuis 2006, il y est ingénieur de développement à l'Institut de systèmes embarqués et technologies de l'information et de la communication. Il a intégralement codé le logiciel de routage optimal de PlanetSolar.

Institut MIS-TIC, HEIG-VD, 1401 Yverdon-les-Bains, patrick.bailly@heig-vd.ch

**Jean-François Affolter**, M. Eng. et membre d'Electrosuisse, est professeur en énergie et systèmes électriques à la HEIG-VD depuis 1995. Son expérience professionnelle se situe dans les réseaux, la production et le transport d'énergie électrique. Ses sujets de recherches sont actuellement focalisés sur l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux et dans la mobilité, avec une spécialisation dans la navigation solaire et à hydrogène.

Institut IESE, HEIG-VD, 1401 Yverdon-les-Bains, jean-francois.affolter@heig-vd.ch

**Pascal Goulpié** est directeur opérationnel et coordinateur scientifique de PlanetSolar, dont il est l'un des 3 cofondateurs. Après un Master en énergie à l'EPFL, suivi d'un doctorat en mécanique des fluides environnementaux, il a travaillé pour le producteur de cellules solaires flexibles VHF Technologies.

PlanetSolar SA, 1400 Yverdon-les-Bains, pgoulpie@planetsolar.org

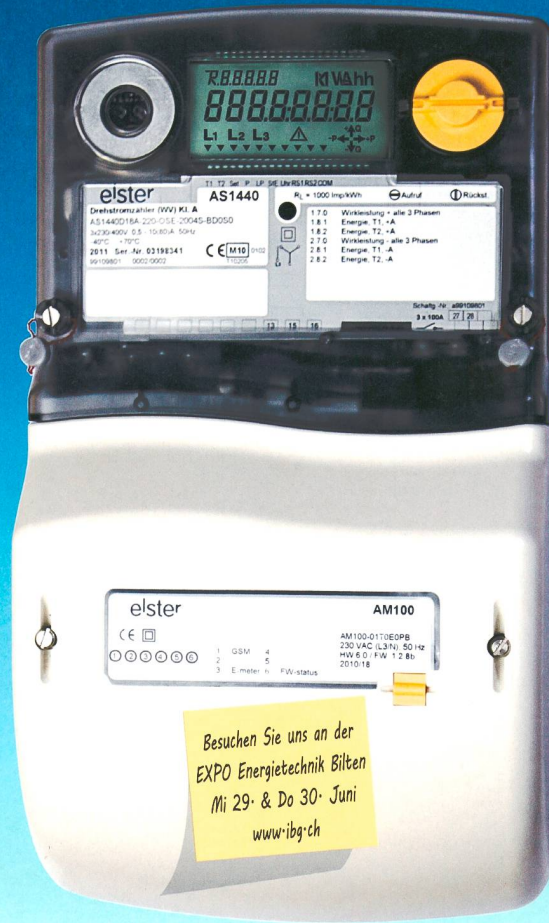
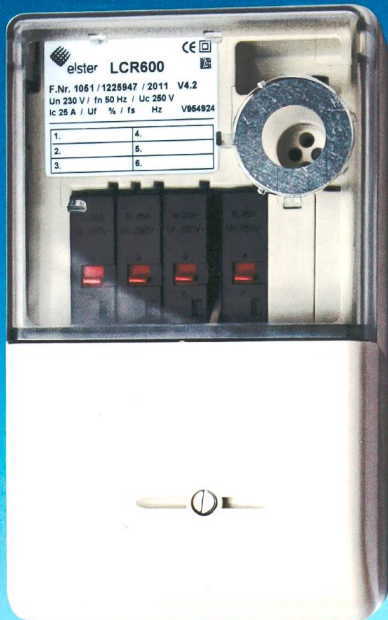
**Philippe Morey** est ingénieur en génie électrique de la HEIG-VD. Depuis 2009, il travaille pour l'Institut d'énergie et des systèmes électriques (IESE), tout en suivant une formation de Master. Il a réalisé un modèle de la chaîne de puissance de PlanetSolar permettant d'estimer les ressources énergétiques disponibles.

Institut IESE, HEIG-VD, 1401 Yverdon-les-Bains, philippe.morey@heig-vd.ch

Anzeige

The advertisement features a man in a dark suit and shirt standing in front of a large QR code. The QR code is partially obscured by a dark grey box containing the text: 'Mit intelligenten Zugbillets das Reisen noch einfacher machen. Das begeistert mich.' To the right of the QR code is the SBB CFF FFS logo. At the bottom of the advertisement, there is a dark blue banner with the text: 'Gemeinsam täglich eine Meisterleistung. sbb.ch/jobs'.

# ELSTER & Smarter



## LCR600 - der neue Rundsteuerempfänger

Lastschaltgerät mit 6 beliebig steckbaren 25A Relais, optischer Schnittstelle, Schaltuhrfunktion mit Backup-Uhr und Jahreskalender.

## Smarter Metering:

Der AS1440 kann über nachrüstbare Kommunikations-Module im Klemmendeckel ausgelesen werden: GSM/GPRS, Ethernet oder PLC. Über M-BUS oder RS485 lassen sich lokal weitere Zähler anbinden. Modular, zukunftssicher und kostengünstig.

## AS1440 - der Meister in allen KLASSEN

### AS1440 D19A: Basiszähler Haushalt SCHWEIZ

10(100)A, +A/-A, 15 Vorwerte, Lastprofil, CS, 2xS0, Displaybeleuchtung, Ablesung auch ohne Spannung, Zeitsynchronisation

### AS1440 D191: Industriezähler Direktanschluss

Kombi-Zähler mit Wirk-/Blind-Energie, Leistung und Lastprofil, 4Q-Messung, bis Klasse 1

### AS1440 W191: Industriezähler Wandleranschluss

Kombi-Zähler mit Wirk-/Blind-Energie, Leistung und Lastprofil, 4Q-Messung, bis Klasse 0.5

**ELSTER - funktional - preiswert - made in Germany - eine echte Alternative!**

**semax**  
energieeffizienz

www.semax.ch

Vertrieb Elster Stromzähler, Rundsteuerempfänger und Systeme

**Semax AG**  
Chamerstr. 175  
6300 Zug

info@semax.ch  
041 508 12 12



**elster**

www.elstermesstechnik.de