**Zeitschrift:** Bulletin Electrosuisse
**Herausgeber:** Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
**Band:** 107 (2016)
**Heft:** 3

**Artikel:** Étude d'un bateau électrique à usage commercial
**Autor:** Morey, Philippe / Affolter, Jean-François
**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-857104

**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:** 01.07.2025

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

# Étude d'un bateau électrique à usage commercial

## Simulation et dimensionnement

En réponse à une conscience écologique croissante, les pouvoirs publics commencent à interdire certaines motorisations thermiques sur les lacs, non seulement pour préserver la vie aquatique, mais aussi pour la protection des eaux. Bien qu'au bénéfice de conditions spéciales, les lignes commerciales vont s'intéresser à cette nouvelle contrainte et doivent pouvoir évaluer les possibilités et les coûts potentiels des systèmes électriques, ainsi que leur coût d'exploitation. Une étude a été menée dans cet objectif à la HEIG-VD.

**Philippe Morey, Jean-François Affolter**

La prise de conscience écologique est en train d'atteindre le domaine de la navigation lacustre. Or, la navigation commerciale participe à une part significative des émissions. Mais est-il possible de remplacer leur motorisation thermique par un système électrique ? Qu'en est-il de l'autonomie, du coût et de la consommation de tels bateaux ?

Afin de répondre à ces questions, une étude a été réalisée à la Haute école d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud (HEIG-VD). Celle-ci a permis, par le biais de simulations et en prenant en compte divers facteurs, tels que la vitesse du bateau, celle du vent ou différents scénarios de cycles de service, de dimensionner le banc de batterie nécessaire, et ce, avec ou sans utilisation d'un prolongateur d'autonomie. L'environnement considéré pour cette étude comprend des lacs de petites à moyennes tailles, tels que ceux rencontrés en Suisse.

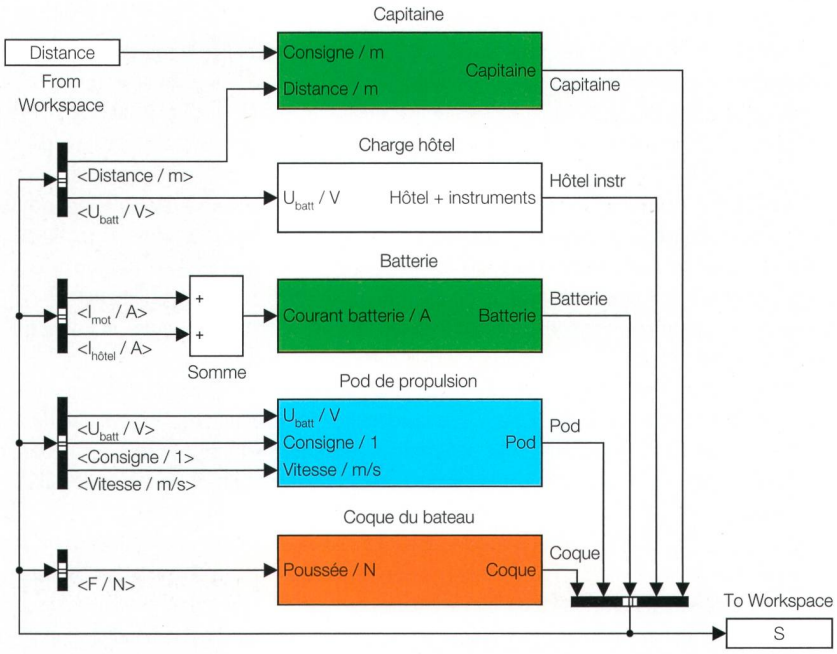


**Figure 1** Modèle de la chaîne de puissance du bateau.

### Approche suivie

Afin de dimensionner les différents éléments d'un bateau électrique, un modèle de simulation doit être élaboré. Chaque élément contribuant à la chaîne de puissance ou consommant de l'énergie doit être pris en compte. Les influences extérieures, telles que les conditions météorologiques, doivent être intégrées afin d'estimer leur impact sur la consommation du bateau. Ceci permet ensuite de dimensionner la motorisation, le stockage, ainsi que de faire une prévision de la consommation annuelle. Finalement, un prolongateur d'autonomie, tel qu'une pile à combustible, peut être ajouté soit pour augmenter l'autonomie, soit pour réduire la taille des batteries.

Cet article présente la simulation et le dimensionnement d'un bateau de quatre-vingts passagers (Aquabus C60 de Grove Boats [1]) destiné à un usage commercial sur le haut-lac de Neuchâtel.

### Modélisation d'un bateau électrique

L'élaboration du modèle du bateau électrique se fait en posant et en modélisant chaque élément de la chaîne de puissance. La **figure 1** illustre les blocs élémentaires du modèle créé sur Simulink.

Le bloc « capitaine » contient un régulateur PID (proportionnel, intégrateur, dérivateur) contrôlant la consigne du bloc « propulsion ». Le bloc « charge hôtel » simule la consommation des auxiliaires, tels que l'éclairage ou les instruments de navigation. Le bloc « batterie » utilise le modèle de batterie [2] fourni dans Simulink afin de reproduire fidèlement son comportement. Le bloc « pod de propulsion » est quant à lui composé de trois sous-systèmes **(figure 2)** :

- l'électronique de puissance ;
- le moteur électrique ;
- et l'hélice.

La modélisation de l'électronique de puissance et du moteur électrique est relativement simple du fait que leurs rendements peuvent être considérés quasi constants sur toutes leurs plages de fonctionnement. L'hélice est plus complexe à

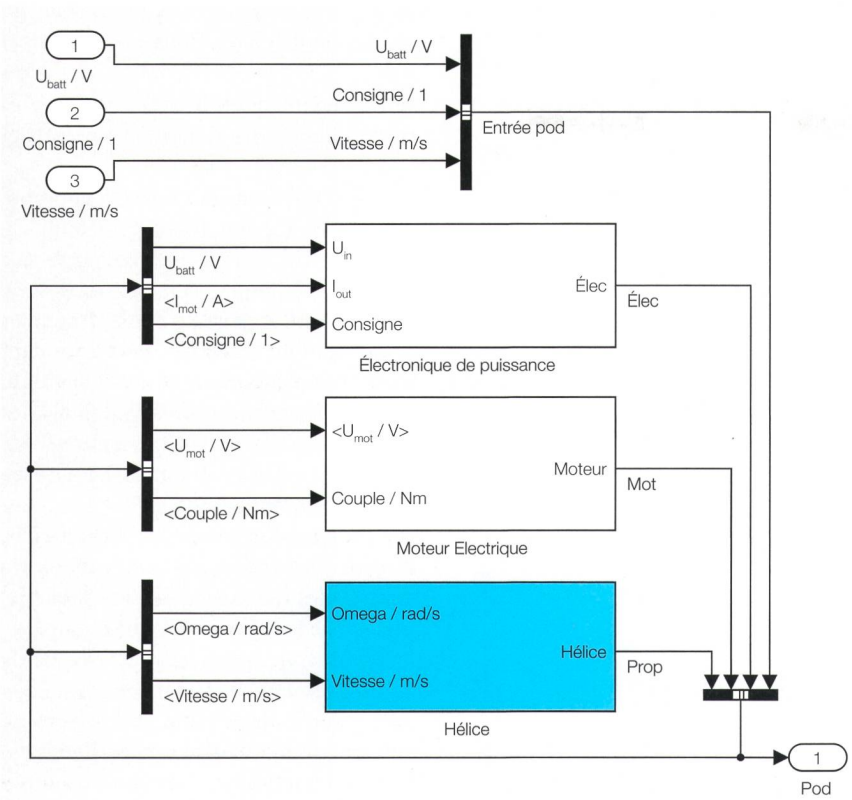


**Figure 2** Modèle du bloc de propulsion.

modéliser car sa performance dépend non seulement de son point de fonctionnement, mais aussi des perturbations dans le flux d'eau dues à la coque, ainsi que d'autres phénomènes [3]. Dans le cas présent, la poussée, ainsi que le couple résistant en fonction de la vitesse du bateau et de la vitesse de l'hélice ont été extraits des caractéristiques d'hélice fournies par le constructeur.

Finalement, le bloc « coque » simule la traînée hydrodynamique, ainsi que l'inertie du bateau. Ceci est obtenu soit par des essais sur maquette en bassin des carènes, soit par des simulations CFD (computational fluid dynamics ou mécanique des fluides numérique).

## Évaluation de l'influence du vent

L'influence du vent peut être décomposée en deux composantes : la traînée aérodynamique et la traînée hydrodynamique supplémentaire due aux vagues.

La traînée aérodynamique, dans le sens de la navigation, peut être positive ou négative selon le différentiel de vitesse entre le vent et le bateau. Quel que soit le cas, la traînée est proportionnelle à la surface apparente et à son coefficient de traînée $C_x$.

La traînée hydrodynamique due aux vagues est plus complexe du fait qu'elle dépend non seulement de la forme de la coque, mais aussi de la hauteur, ainsi que de la période des vagues qui, elle, relève de la nature du plan d'eau. Par simplification, il a été considéré que la traînée supplémentaire est proportionnelle à la vitesse du vent. Cette simplification a été admise uniquement parce que le plan d'eau considéré est un lac de petite à moyenne taille.

La **figure 3** montre que le vent peut avoir une influence considérable sur la traînée du bateau. Ces données doivent donc être très précises. Pour rendre les simulations aussi réalistes que possible, il a été considéré que le vent souffle toujours dans la même direction et que son influence sur le bateau dépend du cap de ce dernier.

## Dimensionnement du banc de batteries

Plusieurs contraintes définissent la taille du banc de batteries :

- la vitesse de croisière ;
- les pires conditions météo dans lesquelles la navigation est maintenue ;
- la longueur d'un cycle de service (**figure 4**) ;
- le nombre de cycles de service avant la recharge ;
- et la puissance maximum du chargeur.

Chaque coque a une vitesse critique à partir de laquelle la puissance « explose ». Pour la coque considérée, cette vitesse est d'environ 19 km/h. Ceci définit la vitesse de croisière maximale raisonnable. Du fait que le cas étudié est principalement prévu pour une utilisation touristique, le souci principal est le confort. Partant de ce principe, les pires conditions météo ont été définies comme étant une force de vent de 5 beauforts. Dans ces conditions, la puissance maximale requise pour maintenir une vitesse de 19 km/h est de 45 kW (53 kW pour 20 km/h).

Deux scénarios d'horaire à trois cycles ont été considérés :

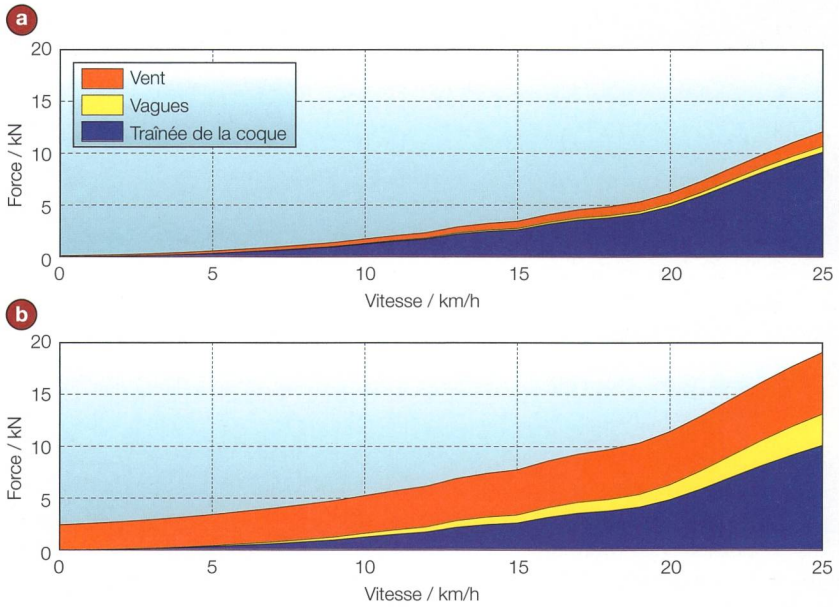


**Figure 3** Traînées dans deux conditions de vent différentes : 2 beauforts (a) et 6 beauforts (b).

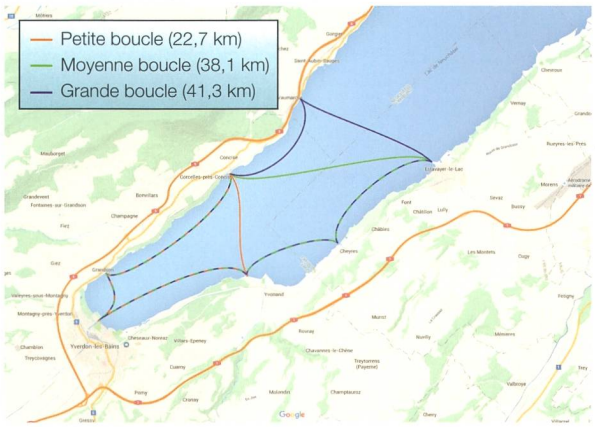


**Figure 4** Carte des différents cycles de service considérés [4].

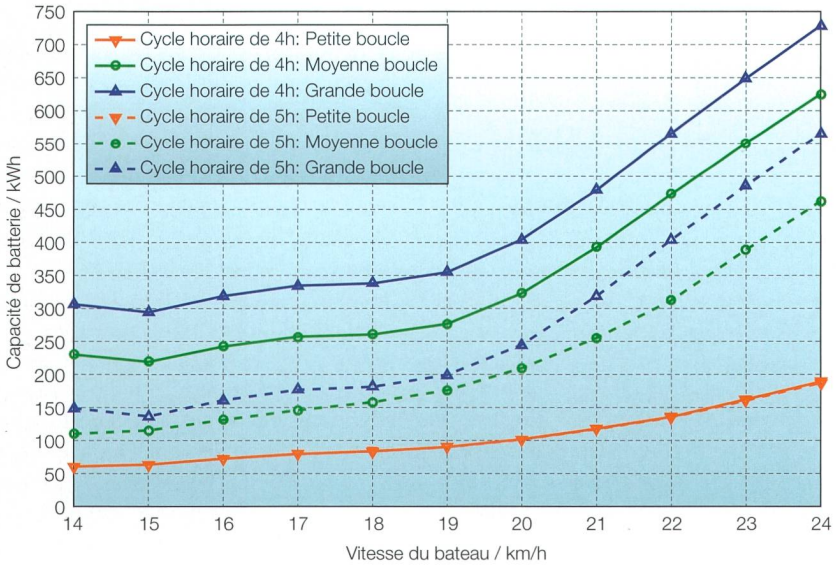


**Figure 5** Capacité de batterie en fonction de la vitesse du bateau pour 2 scénarios à 3 cycles avec des recharges partielles et 3 différentes boucles.

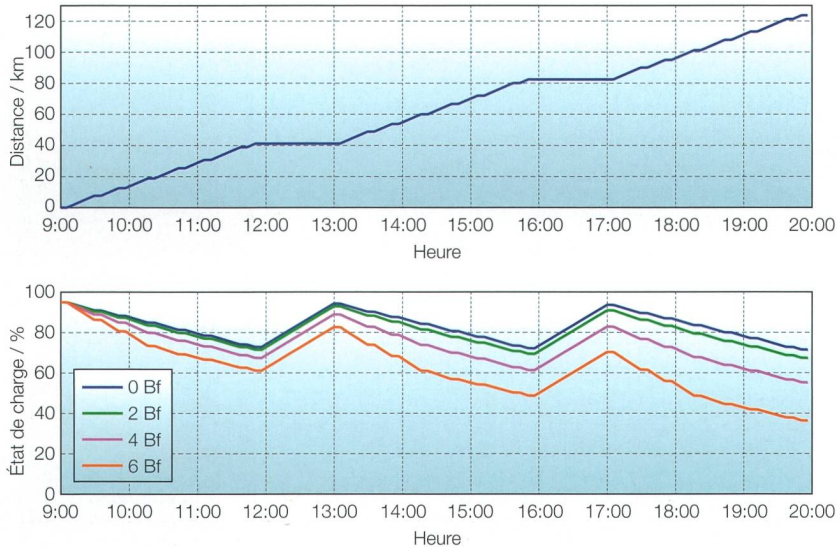


**Figure 6** Simulations des départs à quatre heures d'intervalles, pour la longue boucle, à différentes forces de vent, à une vitesse de croisière de 19 km/h, avec une motorisation de 50 kW et un banc de batteries de 355 kWh (tel que dimensionné dans la figure précédente).

- un départ toutes les quatre heures, correspondant à des départs à 9h, 13h et 17h ;
- un départ toutes les cinq heures, correspondant à des départs à 9h, 14h et 19h.

Les simulations ont rapidement montré qu'afin d'éviter d'avoir un banc de batteries trop massif, une recharge partielle entre chaque cycle est nécessaire. La puissance maximale considérée pour le chargeur est de 86 kW, correspondant aux prises standardisées 3 x 230 V/125 A.

Pour commencer, les simulations ont été faites avec une force de vent de 5 beauforts et avec une batterie massive afin de déterminer :

- l'énergie nécessaire par cycle (1 tour) ;
- l'énergie maximale rechargeable entre deux cycles (puissance du chargeur multipliée par le temps entre deux courses).

Ces énergies permettent de calculer le bilan énergétique, soit l'énergie nécessaire pour les trois tours moins l'énergie apportée lors des recharges partielles. Le bilan énergétique est alors comparé à l'énergie nécessaire pour un cycle. La plus grande valeur des deux correspond à l'énergie minimale à stocker.

Un point intéressant à relever des résultats illustrés à la **figure 5** consiste dans le fait que la capacité de batterie nécessaire n'augmente quasiment pas jusqu'à ce que la vitesse critique soit atteinte. Ceci est dû au fait que l'énergie nécessaire pour aller un peu plus vite est compensée par le gain de temps permettant une recharge un peu plus longue entre deux cycles. Afin de tester le dimensionnement, des simulations ont été menées sur la grande boucle avec différentes forces de vent **(figure 6)**.

La **figure 6** montre que le banc de batteries est correctement dimensionné pour surmonter les pires conditions météo tout en maintenant une marge de sécurité confortable. Du point de vue pratique, un tel banc de batteries pèserait environ 2400 kg (67 Wh/kg) et occuperait un volume d'environ 7 m³ (50 Wh/L) pour une technologie lithium fer phosphate ($LiFePO_4$).

## Estimation de la consommation annuelle

Deux facteurs principaux vont influencer la consommation annuelle d'un bateau électrique : la durée de la saison commerciale et les conditions météo. Des simulations itératives ont été faites pour différentes vitesses du bateau et différentes vitesses de vent.

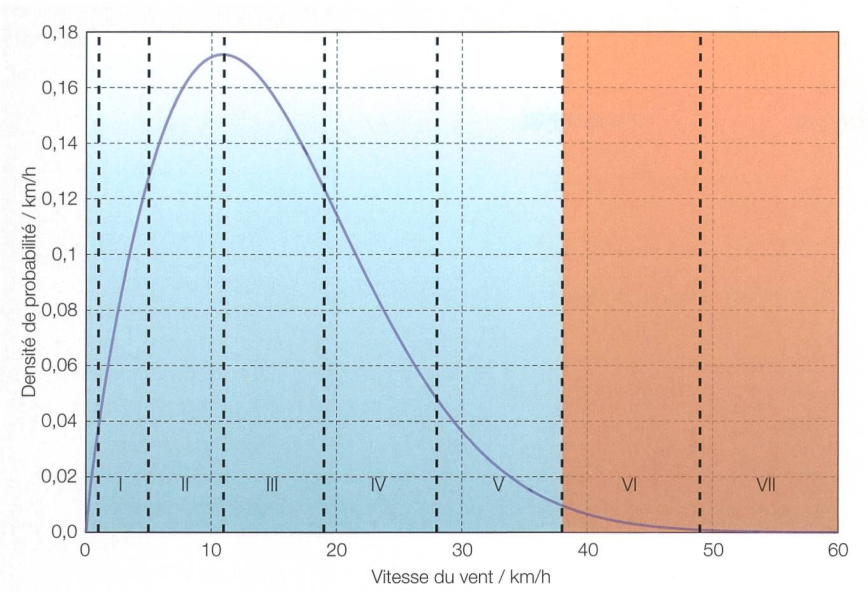


**Figure 7** Distribution du vent à Yverdon. Les secteurs délimités par des traitillés correspondent aux forces de vent en beaufort.

En pondérant les simulations réalisées avec les différentes vitesses de vent avec leurs probabilités d'occurrence correspondantes (figure 7), la consommation moyenne journalière peut être obtenue. Le nombre de jours de navigation est calculé en multipliant le nombre de jours de la saison de navigation par la probabilité cumulée que le vent soit plus faible que le seuil défini. La consommation annuelle (figure 8) permet ensuite d'estimer les coûts d'exploitation liés à l'énergie.

## Prolongateur d'autonomie

Afin de prolonger exceptionnellement l'autonomie d'un bateau électrique ou de réduire la taille du banc de batteries, un prolongateur d'autonomie (range extender) peut être mis en œuvre. Dans le premier cas, le dimensionnement du prolongateur d'autonomie dépendra de l'autonomie supplémentaire souhaitée, ce qui dictera le besoin en énergie. Dans le second cas, le système peut plutôt être considéré comme hybride que plug-in avec un prolongateur d'autonomie. Néanmoins, deux points additionnels doivent être pris en compte :

- la puissance maximale soutirée de la plus petite batterie, pour éviter un vieillissement prématuré ;
- l'autonomie minimale, pour des raisons de sécurité évidentes en cas de panne du prolongateur d'autonomie.

Lors de manœuvres dans des conditions difficiles, la puissance maximale soutirée peut facilement excéder la puissance nominale du moteur électrique d'un facteur deux. Des fabricants de moyenne à grande batterie tels que [5,6] recommandent un courant maximal de décharge compris entre 2C et 3C. En choisissant de garder de la marge (2C), avec un moteur de 50 kW poussé à 100 kW en crête, la capacité de la batterie ne devrait pas être plus petite que 50 kWh. L'autonomie minimale devrait, quant à elle, au moins être suffisante pour parcourir la moitié d'une boucle dans les pires conditions météo.

La figure 9 montre que pour que ce bateau puisse maintenir une vitesse de croisière de 19 km/h sur la grande boucle avec un vent de 5 beauforts, une capacité de batterie minimale d'environ 90 kWh est nécessaire avec un prolongateur d'autonomie de 40 kW. En réduisant les contraintes, telles le besoin de maintenir la vitesse de croisière et par conséquent la ponctualité, la capacité du banc de batteries peut être réduite à environ 60 kWh.

### Les différents types de prolongateurs d'autonomie

Les prolongateurs d'autonomie peuvent être alimentés par différents vecteurs énergétiques, tels que l'hydrogène, le méthanol ou le biogaz.

Un prolongateur d'autonomie de 40 kW fait d'une pile à combustible basse température de type PEM (à membrane d'échange de protons) requerrait un réservoir de 1 $m^3$ à 350 bars (31,5 kg de $H_2$) pour subvenir aux besoins énergétiques d'une journée dans les pires conditions météo. L'avantage d'un tel système est qu'il est potentiellement durable si l'hydrogène est produit avec de l'énergie renouvelable et que le prix de ces systèmes diminue. Ses avantages décisifs consistent dans le fait qu'il n'émet ni bruit, ni vibrations, ni odeur.

Des piles à combustible au méthanol sont difficiles à trouver pour des puissances supérieures à 5 kW. Par conséquent, un prolongateur d'autonomie au méthanol devrait être mis en œuvre avec un moteur à combustion interne. Ceci pourrait potentiellement être éliminatoire pour des raisons de protection de la faune. Cependant, un tel système de 40 kW nécessiterait un réservoir d'environ 400 L (316 kg de méthanol) pour répondre aux besoins. L'avantage princi-

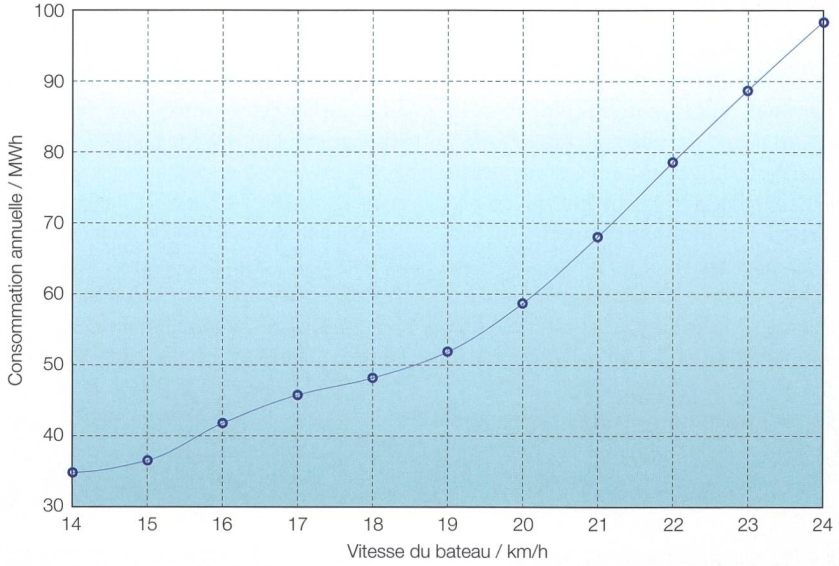


**Figure 8** Consommation annuelle estimée en fonction de la vitesse du bateau, pour la grande boucle, trois boucles par jour et une saison de navigation de six mois.

Figures: HEIG-VD

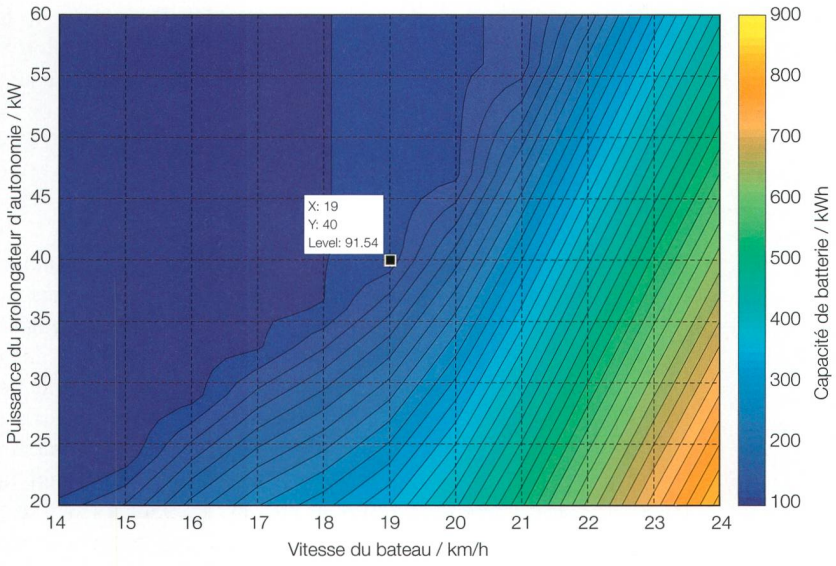


**Figure 9** Capacité de batterie nécessaire pour la grande boucle, en fonction de la vitesse du bateau et de la puissance du prolongateur d'autonomie, pour un vent de 5 beauforts.

pal du méthanol consiste dans le fait qu'il est liquide à pression et température ambiante, ce qui facilite grandement son maniement.

Un prolongateur d'autonomie au gaz naturel compressé (CNG) nécessiterait l'usage d'un moteur à combustion interne. Une pile à combustible haute température pourrait être une solution si la durée de fonctionnement était beaucoup plus longue (plusieurs jours ou semaines). Le problème est que de tels systèmes sont sensibles au cyclage thermique. Ceci le rend inadapté au type d'usage qui lui serait demandé. Néanmoins, pour un système de 40 kW, le réservoir d'un tel système devrait disposer d'un volume de 900 L à 200 bars (146 kg de méthane).

## Conclusion

Des bateaux électriques plug-in destinés à un usage commercial, pour des lacs de petite à moyenne taille, sont techniquement réalisables. L'utilisation de prolongateurs d'autonomie durables est également possible.

Avec un bon dimensionnement, la durée de vie du banc de batteries, estimée entre cinq et dix mille cycles, représente dix à vingt ans à un rythme de trois cycles par jour, six mois par année. Le poids et le volume des différents systèmes sont raisonnables, même en tout électrique. De plus, en ajoutant simplement des panneaux photovoltaïques sur le toit du bateau, par beau temps et sans vent environ un tiers des besoins énergétiques journaliers peut être produit. Avec les progrès réalisés dans le domaine des batteries, ainsi que la diminution de leur coût, progresser vers une navigation durable devient de plus en plus une question de volonté que de viabilité.

## Références

[1] www.grove-boats.com
[2] O. Tremblay, L.-A. Dessaint: Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications. EVS24 Stavanger, Norway, May 13-16, 2009, World Electric Vehicle Journal, Vol. 3 – ISSN 2032-6653 - 2009 AVERE, pp. 289-298, 2009.
[3] M. Aucher: Hélices Marines. Traité de Génie mécanique, Techniques de l'ingénieur, B4360, Paris, 1996.
[4] maps.google.ch
[5] www.saftbatteries.com
[6] www.super-b.com

## Auteurs

**Philippe Morey,** diplômé de la HEIG-VD en génie électrique, systèmes énergétiques, ainsi que MSc en technologies industrielles, travaille au sein de l'Institut d'énergie et des systèmes électriques (IESE) de la HEIG-VD depuis 2009. Ses principaux sujets de recherche sont l'exploitation des énergies renouvelables, ainsi que le stockage de l'énergie électrique. Depuis son arrivée à l'IESE, il s'est spécialisé dans la navigation électrique.

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

Prof. **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 recherche 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.

**jean-francois.affolter@heig-vd.ch**

**Zusammenfassung** **Studie eines Elektroboots zu gewerblichen Zwecken**

**Simulation und Dimensionierung**

Die Behörden gehen allmählich dazu über, die Nutzung bestimmter Verbrennungsmotoren auf Seen zu untersagen, nicht nur um das Leben im Wasser zu bewahren, sondern auch um die Gewässer zu schützen. Obwohl Schifffahrtsunternehmen vorerst nicht von den Restriktionen betroffen sind, sollten sie in der Lage sein, die Möglichkeiten und potenziellen Investitions- und Betriebskosten von elektrischen Booten abschätzen zu können.

Daher wurde an der HEIG-VD eine Studie durchgeführt. Zunächst wurde ein Simulationsmodell entwickelt, um die verschiedenen Elemente eines elektrischen Schiffs mit 80 Passagieren dimensionieren zu können. Dabei sollte jedes Element berücksichtigt werden, das zur Leistungskette beiträgt oder Energie verbraucht, ebenso wie die äusseren Einflüsse, wie beispielsweise die Wetterbedingungen (Wind und Wellen). Damit kann dann die Motorisierung bzw. Speicherung berechnet und der Jahresverbrauch prognostiziert werden. Schliesslich wurde die Möglichkeit eines Range Extenders, beispielsweise einer Brennstoffzelle, untersucht, entweder um die Reichweite zu erhöhen oder um die Batteriegrösse zu reduzieren.

Es zeigt sich, dass Plug-in-Elektroboote, die für den gewerblichen Einsatz auf kleinen bis mittelgrossen Seen bestimmt sind, mit oder ohne nachhaltigen Range Extender technisch machbar sind. Bei richtiger Dimensionierung wird die Lebensdauer der Batteriebank auf 10 bis 20 Jahre geschätzt, bei einem Rhythmus von 3 Zyklen pro Tag (ca. 120 km), 6 Monate im Jahr. Und schliesslich sind auch das Gewicht und das Volumen der verschiedenen Systeme – selbst im reinen Elektrobetrieb – angemessen. CHe

Anzeige

**Die Beiträge dieser Ausgabe finden Sie auch unter www.bulletin-online.ch**