

Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse

Herausgeber: Electrosuisse

Band: 98 (2007)

Heft: 1

Artikel: Des piles à combustible dans la navigation

Autor: Affolter, Jean-François / Carpita, Mauro / Gaille, François

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-857400>

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: 09.01.2026

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

Des piles à combustible dans la navigation

Possibilités et limitations

Les piles à combustible pour la mobilité sont encore en développement et les attentes des consommateurs doivent encore souvent être modérées. Cette étude examine donc le potentiel global d'application dans la navigation et tente de déterminer les problèmes et les avantages pour des applications de piles à combustible dans le domaine marin, plus particulièrement en eau douce, sur les lacs et canaux. Pas de pollution de l'eau, ni de l'air, pas d'odeurs nauséabondes et un faible bruit sont les avantages majeurs. Les systèmes nécessitant une large autonomie doivent toutefois faire l'objet d'études particulières pour le choix le mieux adapté de la technologie.

La synthèse qui suit a été réalisée dans le cadre d'une étude effectuée par l'Institut d'énergie et systèmes électriques (IESE) de la Haute Ecole d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud (HEIG-VD)

*Jean-François Affolter,
Mauro Carpita, François Gaille,
Silvia Schintke*

pour l'Office fédéral suisse de l'énergie [1]. Depuis 1997 l'institut IESE se préoccupe de l'application des piles à combustible (PACo) dans la navigation et a réalisé les premiers bateaux suisses basés sur cette technologie [2, 3, 4]. Les contacts créés lors de ces différentes réalisations sont de plus en plus nombreux et l'intérêt des entreprises, respectivement des consommateurs, augmente.

Les piles à combustible pour la mobilité sont encore en développement et les attentes (entreprises, consommateurs) doivent encore souvent être modérées. Les expériences réalisées jusqu'à présent permettent de décrire un état de la situation et ont démontré que les perspectives méritaient d'être appréciées dans ce secteur. Cette étude examine donc le potentiel global d'application dans la navigation et tente de déterminer les problèmes et les avantages pour des applications de piles à combustible dans le domaine marin, plus particulièrement en eau douce (lacs et canaux).

On constate que différentes technologies se prêtent à ces applications. Les

difficultés majeures se situent au niveau du stockage (donc en problème d'autonomie) avec les combustibles gazeux (tel l'hydrogène) et de l'énergie primaire pour fabriquer des carburants nécessaires. La technologie du reformer basé sur des carburants liquides permet de dépasser ces limitations de stockage. Ces carburants doivent toutefois être obtenus sur des bases renouvelables et biodégradables dans l'eau pour offrir de réels avantages. En attendant, une entrée dans le marché basée sur le reformage de carburants non

renouvelables présente déjà un sens pour autant que le rendement par rapport aux technologies concurrentes soit dépassé, que le surcoût n'excède pas une proportion raisonnable et que le carburant soit disponible facilement.

Les avantages principaux, compte tenu des conditions ci-dessus, seront la réduction de la pollution des lacs – réserves d'eau potable –, la disparition des odeurs et du bruit provoqués par les bateaux motorisés et la navigation sans vent ni soleil. Des voiliers et bateaux solaires sont avantageusement «hybrides» au moyen de piles à combustible.

Les piles à combustible peuvent aussi être utilisées avantageusement pour la fourniture d'électricité de bord (auxiliaires), avec les avantages du silence et absence d'odeur, le bateau à quai ou en mouillage.

Introduction

Les problèmes de pollution, liés par exemple aux craintes de changements climatiques, amènent notre société à considérer le développement durable par différents moyens. Par exemple, en Suisse, de nouveaux arrêtés du Département des transports à Berne concernant plus spécialement les moteurs à essence sur les

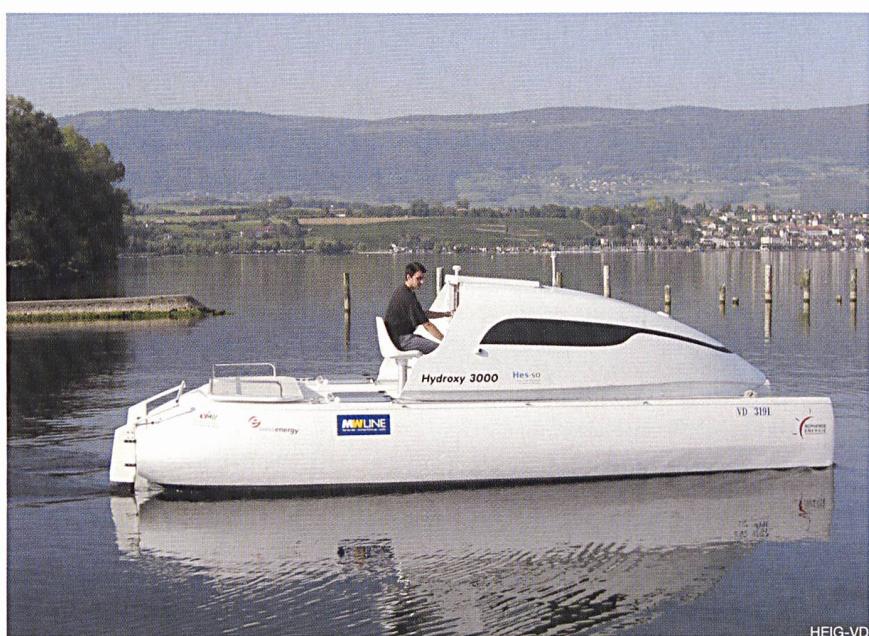


Figure 1 Hydroxy 3000, bateau PACo, 7 passagers

Piles à combustible

plans d'eau, limitent le choix des moteurs thermiques à la navigation et les législations se renforcent face à la pollution [5]. L'introduction de taxes supplémentaires est envisagée (taxe CO₂, taxe sur la contenance de soufre). Les lacs suisses sont utilisés chaque année dans de plus grandes proportions pour l'alimentation en eau potable. Il devient donc de plus en plus intéressant de proposer des alternatives moins polluantes à la motorisation thermique classique.

Au niveau international, en Europe des stratégies sont proposées pour réduire la pollution des navires en mer [6]. On indique, par exemple, que les émissions de SO₂ des navires dans les mers européennes représenteront 75% du total des sources terrestres dans l'UE en 2010. Un simple bateau de croisière produit chaque jour des émissions de cheminée et d'échappement équivalentes à 12 000 automobiles! Ainsi divers instruments économiques (taxes) ont été mis en œuvre dans plusieurs ports et pays du monde afin de réduire les émissions atmosphériques des navires.

L'étude présentée s'est basée sur de nombreuses études de cas. La démarche fut de modéliser des bateaux, du plus petit bateau de pêcheur au plus grand bateau de passager lacustre (Le Lausanne, CGN, 1500 passagers), en passant par le bateau de type «familial» tel que l'Hydroxy 3000 (7 passagers).

Plusieurs types de piles à combustible sont pris en considération et le mieux adapté est choisi en fonction de chaque bateau, avec un carburant et son moyen de stockage ad hoc, parfois suite à des simulations comparées. Les données concernant les bateaux ont été fournies par les constructeurs, par les exploitants ou encore obtenues par des mesures.

L'étude a aussi considéré les possibilités d'utilisation des piles à combustible comme production d'électricité pour les auxiliaires des bateaux (utilisation APU: Auxiliary Power Unit).

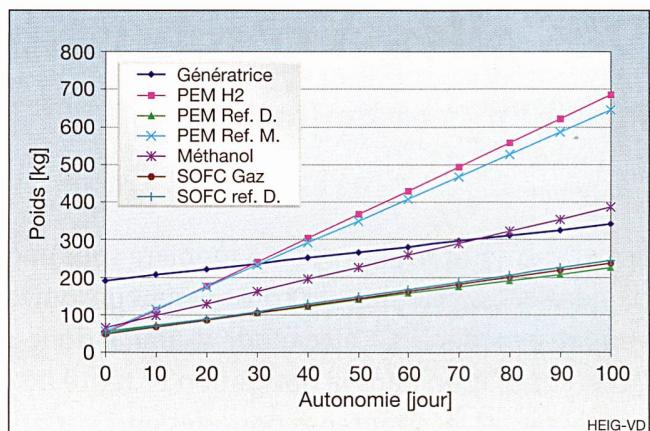
Limitations et propositions

Nous pouvons, à ce stade, distinguer les limitations structurelles actuelles et les limitations physiques; les premières sont valables aujourd'hui mais ne présenteront probablement plus de problèmes à long terme, en fonction des développements technologiques. Les secondes conduisent à des choix stratégiques plus limitatifs.

Limitations structurelles actuelles

Le coût encore élevé de la technologie est un grand frein; certaines piles (p.ex.

Figure 2 Poids des différents systèmes en fonction de l'autonomie du voilier [1] (ref. = reformer)



sur le réseau, en fonction de la disponibilité dans les ports. Celles-ci peuvent fonctionner lorsque le prix est bas (par exemple la nuit pour l'électricité). Disposant d'un stockage tampon adapté au marché local, les installations peuvent être de taille modeste.

Finalement, les structures et la formation pour les réparations, pour l'entretien de systèmes PACo ainsi que la disponibilité des pièces de rechanges manquent encore.

Limitations physiques

A long terme (après pétrole), nous entrevoyons d'énormes difficultés à trouver l'énergie primaire nécessaire à élaborer la quantité de carburants nécessaire à la mobilité (ce point dépasse le cadre de la présente étude). Pour les piles à combustible et pour pallier à la pollution, en particulier des eaux, le type de carburant devra être choisi avec précaution (biocarburants biodégradables).

Concernant la sécurité, les carburants (même actuels) présentent des risques et la conception des bateaux doit être adaptée (protections contre les chocs, ventilations, séparations, etc.), ainsi que les systèmes de mise en sécurité (déTECTeurs, automatismes, redondances, etc.). Remarquons que l'hydrogène par sa légèreté, représente moins de danger que les vapeurs d'essence, dans un endroit naturellement ventilé.

L'encombrement (ou la place disponible) limite la taille des systèmes, surtout en ce qui concerne le volume et le poids du stockage de carburant gazeux; ce constat limite fortement l'autonomie, en particulier des systèmes basés sur l'hydrogène gazeux. Il est donc nécessaire, pour de grandes autonomies, de considérer du reformage de carburant liquide, ou des piles au méthanol (pour les petites unités). La figure 2 donne une idée des

études comparatives de systèmes APU de 200 W pour voilier.

Notons que la recherche est passablement active dans le domaine du stockage de l'hydrogène et que de nouvelles perspectives peuvent repousser les limites mentionnées.

Possibilités et avantages

Cette étude montre que le segment des piles d'une puissance de 0,5 à 80 kW est bien adapté à la motorisation de bateaux pour lacs et canaux. Ces mêmes puissances peuvent être utilisées comme APU sur certaines unités, de la plaisance aux transports professionnels. Ce créneau représente, pour la Suisse, 83 000 bateaux. En admettant une part de marché de 20 à 30% (à court et à moyen termes) et, tenant compte du renouvellement, cela représente un marché de 500 à 1000 unités par an.

Les technologies basées sur l'hydrogène se prêtent bien aux bateaux ayant la possibilité de faire le plein fréquemment (lacs) tandis que les applications nécessitant une large autonomie (bateaux ou APUs) nécessiteront un combustible primaire liquide à grand pouvoir énergétique.

Le silence des piles et l'absence de vibrations sont des atouts particuliers pour le confort de travail professionnel (pêcheurs, bateaux de service, etc.). Et, bien entendu, l'absence de pollution de l'eau est un atout majeur pour la qualité des eaux potables que représentent les lacs.

La limitation des polluants, accompagnée de meilleurs rendements, provoque une charge externe bien moindre que les systèmes thermiques actuels. Remarquons que la réduction de pollution dépendra du type de pile à combustible, de son rendement et du combustible choisi. Ce dernier a une grande importance, par les rendements et processus de transformation de l'énergie primaire nécessaire à son élaboration. Notons que le reformage de carburants non renouvelables présente un sens dès que le rendement par rapport aux technologies actuelles est dépassé, à coût équivalent ou peu supérieur. Cette option peut même faciliter l'entrée des piles à combustible sur le marché de la mobilité. De plus, ces systèmes seront utilisables avec des combustibles ultérieurs, bio ou/et synthétiques.

L'utilisation d'APU basés sur des piles à combustible limite fortement la pollution (atmosphérique et sonore) dans les ports et au mouillage.

La modularité facilement réalisable avec les piles permet de concevoir plu-

sieurs gammes de puissance au moyen d'éléments de même base ou de dimensionner des systèmes permettant une bonne sécurité (n-1), voir (n-2) en exploitation. Leur réponse dynamique est largement suffisante pour les applications maritimes.

Un meilleur rendement et une pollution inférieure à charge partielle rendent la pile à combustible particulièrement adaptée pour les bateaux de pêches, les bateaux de service dans les ports et les allures de croisière à vitesse modérée, par exemple sur les canaux. L'économie de carburant en régime de pêche dépasse les 40% par rapport aux moteurs thermiques à combustion interne (ICE) actuels [7]. En outre, les piles offrent des possibilités de climatisation (chaud, froid) sans problèmes particuliers (source froide quasi infinie sous le bateau).

Finalement, de grandes synergies existent entre le développement des piles pour la navigation et les autres domaines de puissance tels l'automobile, l'aviation, les locomotives et la cogénération.

Conclusion

Cette étude, réalisée sur le calcul de nombreuses études de cas ainsi que sur les essais et l'exploitation de bateaux à piles à combustible, en particulier l'Hydroxy 3000, permet de tirer de nombreuses conclusions.

Technologie novatrice, permettant une production électrique plus respectueuse de l'environnement, la pile à combustible démontre en termes énergétiques et environnementaux de meilleures performances que les technologies thermiques «classiques». Elle présente un intérêt certain pour la navigation sur les lacs avec les embarcations de petite et moyenne taille. Pas de pollution de l'eau, ni de l'air, pas d'odeurs nauséabondes et un faible bruit sont les avantages majeurs. Les systèmes nécessitant une large autonomie doivent toutefois faire l'objet d'études particulières pour le choix le mieux adapté de la technologie. Le coût et l'absence de système de distribution en sont les inconvénients majeurs aujourd'hui. L'équipement d'une trentaine de ports en Suisse, avec reformage de gaz ou électrolyse, selon équipement à disposition, ne présente pas de difficulté technique exceptionnelle. Le problème à long terme – dépassant le cadre de cette étude – reste l'élaboration de combustibles, et même si des éléments de réponses existent [8], ce challenge est énorme.

Les projections concernant les coûts montrent que d'ici une dizaine d'années, un bateau pile à combustible de puissance

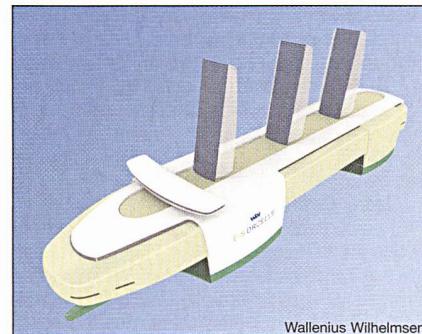


Figure 3 E/S Orcelle: prototype futuriste à énergies mixtes avec PACo de 10 MW

comparable aux motorisations actuelles (une centaine de kW) sera environ 25% plus coûteux à l'achat, avec des frais sensiblement identiques à l'exploitation.

Pour une période de transition entre moteur thermique ICE et piles à combustible, les marchés «de niche» permettent de développer et mettre au point la technologie, tout en permettant un coût plus élevé que dans le marché final visé, par exemple pour l'automobile et la cogénération. La navigation fait partie de ces marchés potentiels.

Sans pouvoir affirmer encore aujourd'hui quel sera demain le succès des piles à combustible, on peut affirmer que si l'accessibilité de cette technologie augmente ces prochaines années, comme la tendance l'indique, le marché pourra facilement s'ouvrir à la navigation. A l'avantage du consommateur d'eau et de l'utilisateur des lacs et des plages.

Références

- [1] J.-F. Affolter, M. Carpita, F. Gaille, S. Schintke: Possibilités et limites des piles à combustible dans la navigation. OFEN, Berne, Déc. 2005
- [2] P. Favre, D. Cicio, J.-F. Affolter: Fun boat powered by a fully automatic fuel cell. European Fuel Cells Forum, Lucerne, 1999
- [3] J.-F. Affolter, P. Mariotti: Application des PAC aux embarcations; spécificités et réalisations. Congrès Vel Elec, Grenoble, Juin 2002
- [4] J.-F. Affolter, A. Gianinazzi, Y. Leuppi: Hydroxy 3000, third generation FC boat. European Fuel Cells Forum, Lucerne, 2004
- [5] http://www.umwelt-schweiz.ch/buwal/fr/medien/umwelt1997_3/unterseite12/
- [6] <http://europa.eu.int/scadplus/leg/fr/lvb/l28131.htm>
- [7] Entreprise Alca-Torda: étude Casapac «Piles à combustible pour caseyeur; étude de faisabilité économique», rapport PWC, 2002
- [8] B.E. Logan: Extracting Hydrogen Electricity From. Pennsylvania State University, Environmental Sc. & Technology, May 2004

Informations sur les auteurs

Jean-François Affolter enseigne l'énergie électrique à la HEIG-VD depuis janvier 1995. Il est responsable du laboratoire haute tension et du laboratoire d'énergétique électrique. Diplômé ETS de la HEIG-VD en 1980 puis Master en génie électrique de l'Université de Fribourg.

Piles à combustible

sité McMaster (CDN) en 1987, son expérience professionnelle débute dans les câbleries (Cortaillod) et se poursuit dans les réseaux électriques (Ontario Hydro et EOS). A l'enseignement de ces sujets, il ajoute des développements dans l'application des piles à combustible, depuis 10 ans.

*HES-SO/HEIG-VD, 1401 Yverdon,
jean-francois.affolter@heig-vd.ch*

Mauro Carpita, Master en génie électrique en 1985 et doctorat en électronique de puissance de l'Université de Gênes (Italie) en 1989, a développé son expérience professionnelle dans les centres de recherche de Ansaldo Ricerche, Lincoln Electric, ABB Ricerca et ABB Servomotors (Italie). Son expérience professionnelle concerne les convertisseurs de puissance pour l'énergie, pour les entraînements réglés et pour la soudure. Il a publié plus de 50 articles dans des conférences et journaux internationaux. Il a enseigné l'électronique de puissance à l'Université de Cassino (I) comme chargé de cours de 1998 à 2001. Il enseigne l'électronique de puissance à la HEIG-VD de Yverdon-les-Bains (CH) depuis octobre 2003.

*HES-SO/HEIG-VD, 1401 Yverdon,
mauro.carpita@heig-vd.ch*

François Gaille enseigne, depuis 1996, les cours de physique et de théorie des circuits électriques à la HEIG-VD. Après avoir obtenu un doctorat de physique aux Etats-Unis, il a travaillé de nombreuses années dans la recherche tout d'abord, puis ensuite au sein d'une société industrielle. Ses intérêts professionnels sont axés principalement sur les problèmes éné-

gétiques. Il est actuellement responsable de l'Institut d'énergie et systèmes électriques (IESE) au sein de la HEIG-VD.

*HES-SO/HEIG-VD, 1401 Yverdon,
francois.gaille@heig-vd.ch*

Silvia Schintke est professeur de physique et de nanotechnique à la Haute Ecole d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud (HEIG-VD), où elle donne des cours en physique générale, électromagnétisme et physique appliquée, ainsi que des cours de post-formation en nanotechnologie. Depuis 1996, elle conduit des travaux de recherche scientifique dans

le domaine de la physique des surfaces et des nanosciences; d'abord à la Technische Universität Berlin et à l'Université de Lausanne, et depuis 2001 à l'Université de Bâle au National Center of Competence in Research (NCCR) on Nanoscale Science. Pour ces travaux de recherche sur la morphologie et la structure électronique des isolants ultramince étudiées par microscopie et spectroscopie à effet tunnel, elle a reçu en 2003, le Prix de Physique Appliquée de la Société Suisse de Physique.

*HES-SO/HEIG-VD, 1401 Yverdon,
silvia.schintke@heig-vd.ch*

Zusammenfassung

Brennstoffzellen für die Navigation

Möglichkeiten und Grenzen. Brennstoffzellen für die Mobilität sind noch in Entwicklung, und die Verbraucher dürfen noch keine allzu grossen Anforderungen stellen. Die vorliegende Studie untersucht deshalb das gesamte Anwendungspotenzial in der Navigation und versucht, Probleme und Vorteile beim Einsatz von Brennstoffzellen im Marinesektor, insbesondere bei der Süsswassernavigation auf Seen und Kanälen, zu orten. Keine Wasser- und Luftverschmutzung, keine übel riechenden Abgase und eine geringe Lärmentwicklung sind die Hauptvorteile. Systeme, welche eine hohe Autonomie voraussetzen, erfordern jedoch besondere Studien, damit die bestgeeignete Technologie eingesetzt werden kann.

Technology is our business

Perfectionnez-vous en toute tranquillité!

Offrez-vous 21 numéros
du Bulletin SEV/AES en adhérant
à Electrosuisse pour seulement
CHF 140.– par an

Inscrivez-vous immédiatement sur
www.electrosuisse.ch/membre

electrosuisse >

Journées d'information pour électriciens d'exploitationFribourg, NH Fribourg Hôtel
Lausanne, Palais de BeaulieuMercredi, 28 février 2007
Mardi, 27 mars 2007

De:	à: Electrosuisse Luppenstrasse 1 8320 Fehraltorf
No fax:	No fax: 044 956 12 49
No tél.:	No tél: 044 956 11 75
E-mail:	E-mail: michaela.marty@electrosuisse.ch

Inscription (Veuillez compléter à la machine ou en caractères d'imprimerie)**Participant**

Nom	Prénom	Cat. de prix			Dates de participation	
		A	M	N	28 février 2007	27 mars 2007

A	Abonné Electrosuisse (Contrat de conseil et de contrôle) CHF 300.–	M	Membre Electrosuisse CHF 300.–	N	Non-membre Electrosuisse CHF 400.–
----------	--	----------	-----------------------------------	----------	---------------------------------------

Dès 5 participants, un rabais de 5% est accordé.

Adresse de livraison

Entreprise	
Département	
Adresse / no	
No postal / lieu	

Adresse de facturation (si différente de l'adresse de livraison)

Entreprise	
Département	
Adresse / no	
No postal / lieu	

Date: _____ Signature: _____

 A déduire des prestations complémentaires (seulement pour exploitants de réseaux)

En cas d'annulation 1 à 20 jours avant la manifestation, un montant de CHF 50.– sera retenu pour les frais. Après la manifestation, le montant total sera à payer en cas d'absence.

En cas d'empêchement, le bon pour la documentation devra être retourné à Fehraltorf.

Journées d'information pour électriciens d'exploitation

20
ans

Journées d'électriciens
d'exploitation

Fribourg, NH Fribourg Hôtel
Lausanne, Palais de Beaulieu

Mercredi, 28 février 2007
Mardi, 27 mars 2007

Président de la journée

Marius Vez,
Responsable Electrosuisse Romandie

Places de parc

Parking des Grand-Places à Fribourg
Parking souterrain du Palais de Beaulieu

Groupes cibles

Ces journées s'adressent avant tout aux électriciens d'exploitation ainsi qu'à leurs supérieurs directs, aux installateurs-électriciens, aux conseillers en sécurité et aux enseignants concernés.

Buts des journées

Information aux électriciens d'exploitation sur les nouveautés en matière d'installations électriques à basse tension. L'accent principal sera mis sur les exemples pratiques et les discussions.

Les participants sont invités à adresser leurs questions par écrit au président des journées avant le 12 février 2007.

Recueil des exposés + CD ROM

Un recueil des exposés en français + 1 CD ROM seront remis aux participants.

Frais

Carte de participation (comprenant le recueil des exposés + 1 CD-ROM, les cafés, le déjeuner y compris les boissons et le café)

Membres personnels Electrosuisse	Fr. 300.–
-------------------------------------	-----------

Membres institutionnels Electrosuisse	Fr. 300.–
--	-----------

Clients avec contrat Electrosuisse	Fr. 300.–
------------------------------------	-----------

Non-membres Electrosuisse	Fr. 400.–
---------------------------	-----------

Inscriptions

Nous prions les intéressés de bien vouloir envoyer leur bulletin d'inscription à Electrosuisse, Organisation des journées, Luppenstrasse 1, 8320 Fehrltorf. Les participants recevront leur carte de participation accompagnée de la facture, ainsi que le recueil des exposés + 1 CD ROM après enregistrement de leur inscription.

Pour de plus amples renseignements, veuillez vous adresser à Electrosuisse Romandie, ch. de Mornex 3, 1003 Lausanne, tél. 021 312 66 96.

Programme

08.30 Accueil café

09.00 **Salutations du président de la journée**
Marius Vez
Responsable Electrosuisse Romandie
Lausanne

Dispositifs de coupure pour entretien
Jean Dey, SUVA
Lausanne

Dispositif de protection contre les démarriages intempestifs, élément indispensable pour éviter les accidents lors des travaux de maintenance et de nettoyage
Exemples concrets

Energie et technique du bâtiment
Serge Boschung
Service des transports et de l'énergie du canton de Fribourg

- Etat actuel et futur de la technique énergétique dans le domaine du bâtiment
- Exemplarité énergétique (Minergie, etc.)
- Soutien des collectivités publiques

10.30 Pause café

Assainissement des installations électriques après dommages et maintenance préventive
Heinz Buchs
Belfor (Suisse) SA
Le Mont-sur-Lausanne

Réactions chimiques et oxydation dues aux fumées et aux dégâts d'eau après incendie. Exemples d'interventions.

Discussion des thèmes de la matinée

Tous les conférenciers

12.10 Repas de midi

14.00 **Flash**
Divers thèmes d'actualité

Analyse d'un accident
Mesures correctives et situation juridique.
Responsabilité de l'électricien d'exploitation, du propriétaire d'installation en cas d'accident et de dommage

Charles Pachoud
Electrosuisse Romandie
Lausanne

Michèle Balthasar
Service juridique ESTI
Fehrlitorf

Discussion des thèmes de l'après-midi

Tous les conférenciers

16.00
env. **Fin de Journée**