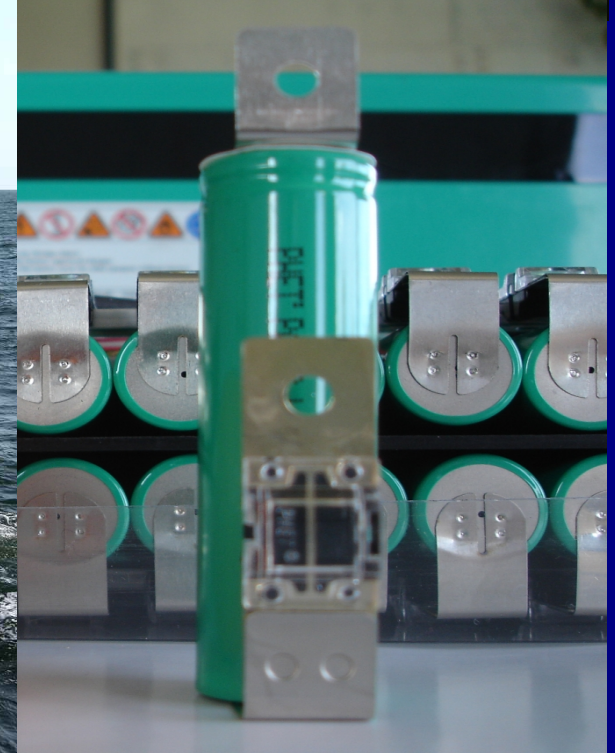
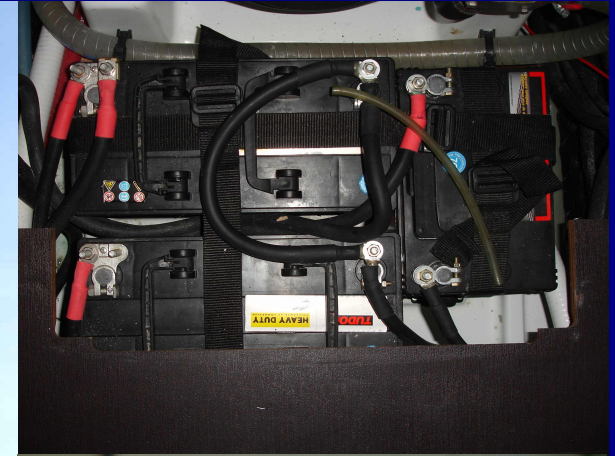


# L'énergie électrique à bord d'un voilier

Par PIPS - 2009



La production et le stockage de l'énergie électrique sont deux points cruciaux de la navigation en autonomie complète à bord d'un voilier. On cherchera à équilibrer d'une part, la consommation électrique des équipements divers et variés et en nombre croissant et d'autre part la production de cette énergie.

Entre les 2, on utilisera un réservoir de stockage constitué d'accumulateurs.

La recherche de cet équilibre est réalisée au travers du bilan électrique dont l'objectif peut être double:

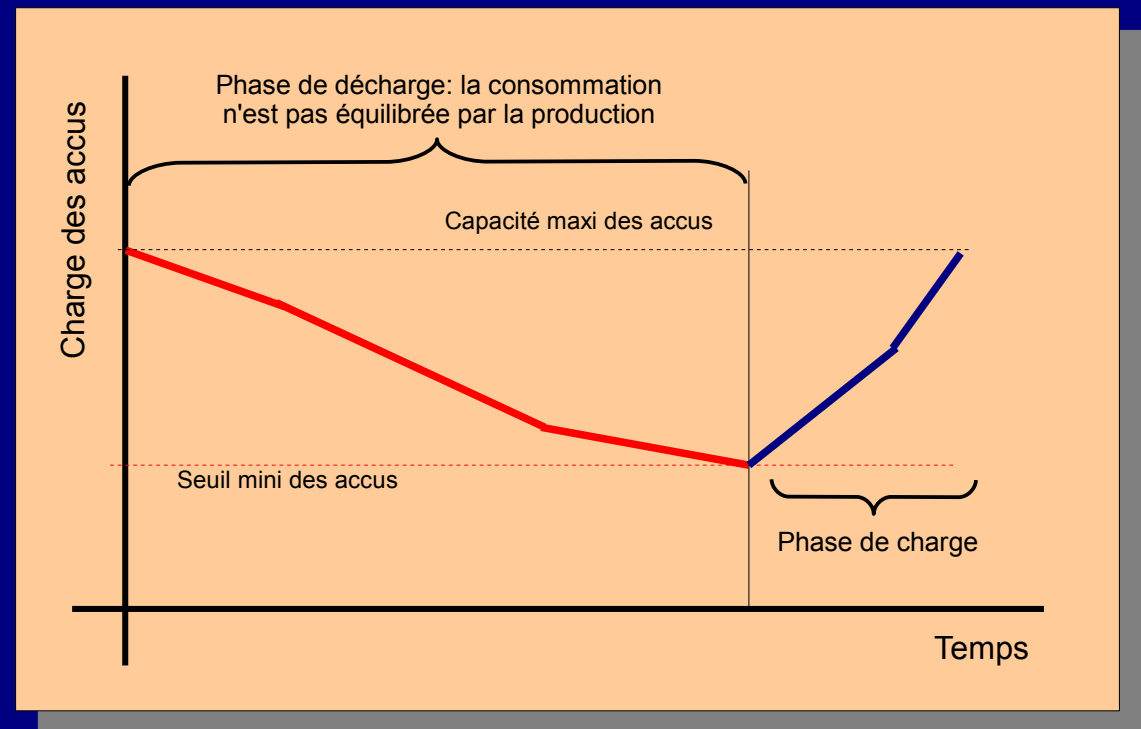
- à partir d'une installation de production et de stockage, quels sont les consommateurs qu'on peut utiliser ?
- à partir d'une consommation fixée, quels sont les moyens de production et de stockage à mettre en oeuvre ?

S'il est facile de consommer les Ampères heure, et pour cela nos canots regorgent d'équipements énergivores, la production et le stockage constituent un enjeu qu'il ne faut pas sous estimer sous peine de transformer sa croisière en enfer.

Le stockage est indissociable de la production dans la mesure où il est impossible d'équilibrer la production à la demande en instantané, ne serait-ce que pour les forts appels de courant. On utilise donc des accumulateurs dont la fonction sera d'assurer le tampon entre la consommation et la production.

Dès lors le mode de fonctionnement des accumulateurs s'assimile à des cycles répétés de charge et décharge entre la capacité maximale des accumulateurs et un seuil en dessous duquel il n'est pas conseillé de descendre afin d'éviter le vieillissement prématuré du matériel.

En partant d'un état initial de pleine charge, les consommateurs du bord vont amener plus ou moins rapidement les accumulateurs à un seuil tel qu'il faudra engager une charge musclée, bien souvent en utilisant le moteur diesel du bord ou un groupe électrogène.



## La consommation

En milieu autonome on sera confronté à une double problématique:

- la capacité de stockage de l'énergie électrique
- et
- la capacité de production de cette énergie.

Nous verrons que les moyens de production et de stockage restent assez limités et par conséquent le premier bilan électrique, c'est d'apprendre à économiser l'énergie.

Il faut apprendre ou réapprendre à se passer des choses qui font le confort quotidien du terrien; toutes ces petites choses qui nous paraissent naturelles et pour lesquelles nous n'apportons plus aucune attention.

La consommation à bord d'un voilier dépendra du programme de navigation.

Contrairement à l'automobile où il est assez simple de définir l'utilisateur « moyen », en plaisance les profils d'utilisation sont très différents les uns des autres.

On conçoit assez bien que le circumnavigateur n'aura pas les mêmes besoins en énergie que le régatier, qui lui même n'aura pas les mêmes besoins que le plaisancier du week end.

Il appartient donc à chacun de définir son profil de consommation en effectuant en premier lieu le recensement de tous les consommateurs.



Pour ce faire, il suffit d'établir la liste des consommateurs avec leur valeur de consommation en watts ou en ampères, valeur qui est indiquée sur le consommateur ou sur sa notice, et si l'information n'est pas disponible il faudra mesurer le courant à l'aide d'un ampèremètre.

Une fois ce travail (fastidieux) réalisé, il faut estimer le temps d'utilisation des consommateurs sur 24 heures. Si une approche purement intellectuelle et théorique est suffisante en première approximation, il faudra la compléter par une mesure en conditions réelles.

En effet, on a tendance à sous estimer certaines utilisations comme le pilote automatique par exemple. A l'inverse l'éclairage à bord a tendance à être surestimé par rapport au besoin réel qui est en fait proche de zéro sur une grande traversée.

A chacun donc, de construire sa grille de consommation journalière, à l'aide d'un tableur de type Excel ou Open Office. Il existe des modèles prêt à l'emploi sur Internet.

En voici un en version Excel:

[http://www.blueoceanconcept.com/pages/bilan\\_electrique\\_v3.html](http://www.blueoceanconcept.com/pages/bilan_electrique_v3.html)

Nota: La puissance exprimée en Watts est liée à l'intensité exprimée en Ampères à partir de la tension du réseau de bord exprimée en Volts.

## Le stockage

L'énergie électrique ne se stocke pas ... ou mal !

Pour s'en convaincre il suffit de comparer la densité énergétique du pétrole dans un réservoir avec celle de l'électricité dans une batterie...

Dans le cas du pétrole nous avons une densité d'énergie de 5 000 Wh/kg en tenant compte des rendements du moteur thermique. Dans le cas d'un accumulateur au plomb nous atteignons péniblement une densité d'énergie théorique de 40 Wh/kg et de 80 à 160 Wh/kg pour les accumulateurs Lithium.

Ce simple constat permet de comprendre pourquoi on a du mal à se passer du moteur diesel ou bien du groupe électrogène sur nos voiliers:

Pour faire du courant il faut des chevaux !  
Pour le stocker il faut du poids !

On a vu que la puissance s'exprimait en Watts, la densité de puissance s'exprime en Watts par kilo (W/kg) et la densité d'énergie s'exprime en Watts heure par kg (Wh/kg).  
La capacité, quant à elle, s'exprime en Ampère heure (Ah)

## Accumulateurs au plomb

Ces accumulateurs fonctionnent avec une électrode d'oxyde de plomb et une électrode de plomb ; l'électrolyte est de l'acide sulfurique dilué.

C'est le moyen de stockage le plus connu et le plus répandu à ce jour.

Malheureusement pour le plaisancier comme pour bon nombre d'utilisateurs, nous sommes condamnés à utiliser cette technologie préhistorique (1859) pour stocker une quantité infime d'énergie dans une boîte très volumineuse, très lourde et finalement très chère.

On ne reviendra pas sur la technologie des accus au plomb qui est très largement traitée, débattue, au travers d'un certain nombre de sites et d'articles sur internet.

Voir en particulier l'excellent site de Sonnenschein filiale d'Exide Technologies:

<http://www.sonnenschein.org/>

Ou de Enersys et ses batteries Hawker:

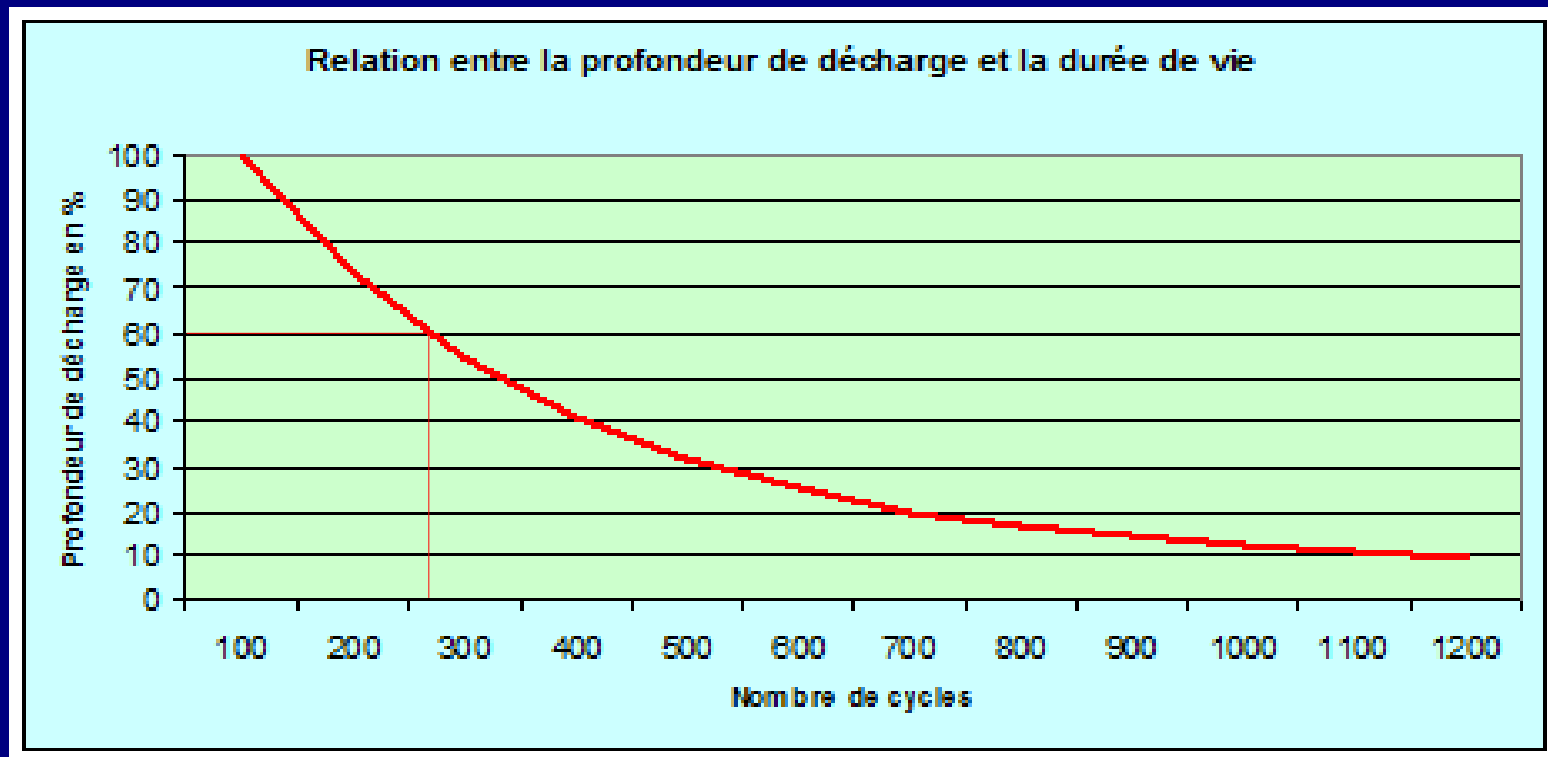
<http://www.enersys-hawker.com/french/index.asp?lang=f>

Tout au plus mettrons nous en perspective les limites de cette technologie afin de bien comprendre comment dimensionner son installation:

1) La batterie au plomb ne supporte pas les décharges profondes, même pour les batteries qui sont réputées pouvoir le faire !

Les décharges profondes affectent très rapidement la durée de vie de la batterie. La durée de vie exprimée en nombre de cycles de charges et de décharges est donnée, sauf indication contraire pour une décharge de 60 % de la capacité totale de la batterie.

La courbe générique ci-dessous, illustre la relation entre la durée de vie et la profondeur de décharge. Elle montre assez bien la déchéance rapide de la batterie dès que la profondeur de décharge augmente. Cette courbe est bien évidemment susceptible de varier en fonction de la technologie d'accumulateur au plomb utilisée. Il faudra donc se référer aux informations fournies par le fabricant. En l'absence de cette information il faut se méfier du « sérieux » du fabricant.



Pour les calculs de dimensionnement du parc batterie, on considérera que la capacité utile de la batterie au plomb est de 60% la capacité nominale.

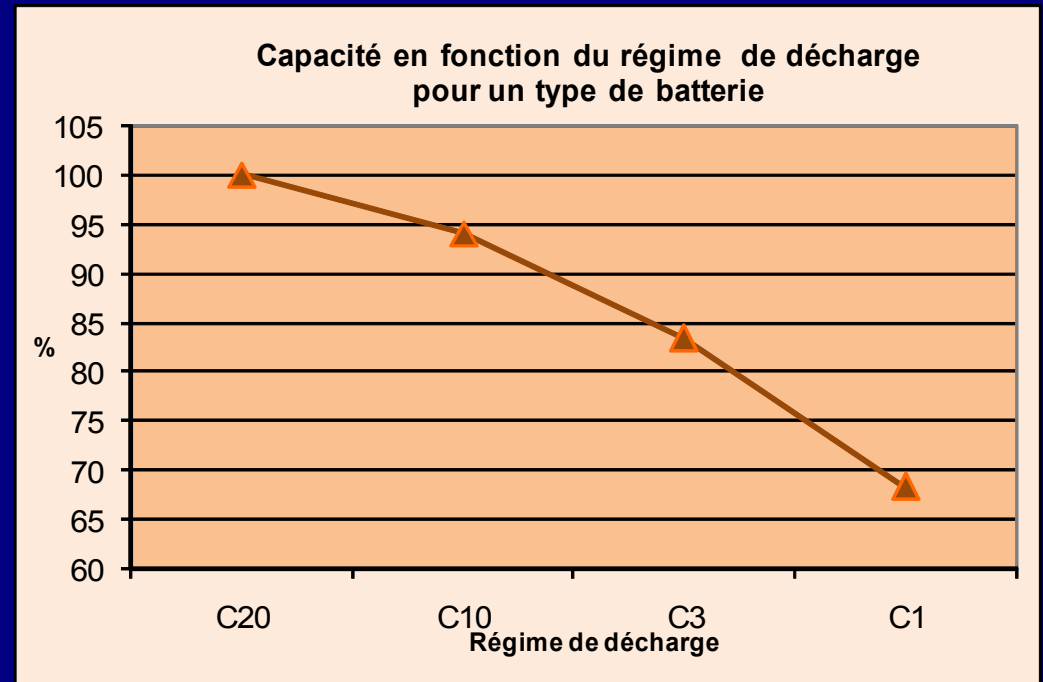


2) La capacité d'une batterie plomb dépend du temps de décharge de la batterie. En effet on n'obtiendra pas le même résultat en capacité selon que la décharge est effectuée en 20 heures ou en 10 heures.

Corollaire: Pour une consommation journalière définie, il faut surdimensionner le pack batterie de telle sorte que la décharge s'effectue à coup sur, proche de  $C/20$ .

On pourra éviter ainsi les décharges profondes qui impactent la durée de vie de la batterie.

Dans les calculs de dimensionnement du parc batterie, on prendra en compte un facteur qui correspond à un temps de décharge en  $C/10$  plutôt que  $C/20$ . En toute rigueur ce facteur dépend du type de batterie ainsi que de la qualité de conception et de fabrication de la batterie. Par souci de simplification on peut considérer qu'un facteur de 0,95 n'est pas trop éloigné de la réalité.



De la même manière, le fabricant de batterie doit être en mesure de fournir cette information pour chaque type de batterie.

3) La capacité annoncée par le constructeur (exemple 150 Ah) est la capacité au bout de quelques cycles de charge, par ailleurs les tests sont réalisés à température constante de 20 °C .  
 Au bout d'une vingtaine de cycles la capacité réelle s'éloigne déjà de la capacité annoncée !  
 Pour la batterie plomb, on prendra un facteur de vieillissement de 8 % / an.

### Aperçu des prix (base 2009) et des performances des batteries plomb AGM

Accumulateurs au plomb (2009)					Théorique		Réelle	
Tension	Capacité théorique	Capacité réelle	Poids	Prix	Prix du Kwh	Energie Massique	Prix du Kwh	Energie massique
(V)	(Ah)	(Ah)	(kg)	(euros)	(euros)	Wh/kg	(euros)	Wh/kg
12	200	82	65	389	162,1	36,9	395,3	15,1
12	150	61,5	47	299	166,1	38,3	405,1	15,7
12	120	49,2	38	240	166,7	37,9	406,5	15,5
12	100	41	32	203	169,2	37,5	412,6	15,4
12	80	32,8	27	164	170,8	35,6	416,7	14,6
12	60	24,6	24	149	206,9	30,0	504,7	12,3

Corrigées des limites techniques de la techno plomb, on constate que le prix affiché du kilowatt heure n'est pas celui annoncé par l'étiquette ou le prospectus, et la performance non plus d'ailleurs !

## Accumulateurs au lithium

C'est la technologie qui a le vent en poupe en 2008 avec des applications possibles de série dans le milieu automobile sous 2 ans. Déjà connue pour les accumulateurs de faible dimension (PC Portable, Appareils photo, téléphones etc), ces nouvelles batteries apparaissent dans des applications de stockage de masse, avec plus ou moins de bonheur.

Si les densités d'énergie sont assez prometteuses avec 160 Wh/kg, le lithium n'est qu'une technologie de transition en attendant de nouvelles générations d'accumulateurs. Le lithium est en effet une ressource très mal répartie à la surface du globe, par conséquent il y a peu d'espoir que les prix baissent de manière durable. La tendance a même été à la hausse ces dernières années.

Contrairement à l'accumulateur au plomb, la capacité affichée de l'accumulateur lithium ne dépend pas de la vitesse de décharge au moins jusqu'à  $C/2$ . Par conséquent, pour les décharges usuelles à bord du voilier, la capacité à prendre en compte dans les calculs est la capacité nominale de l'accumulateur.

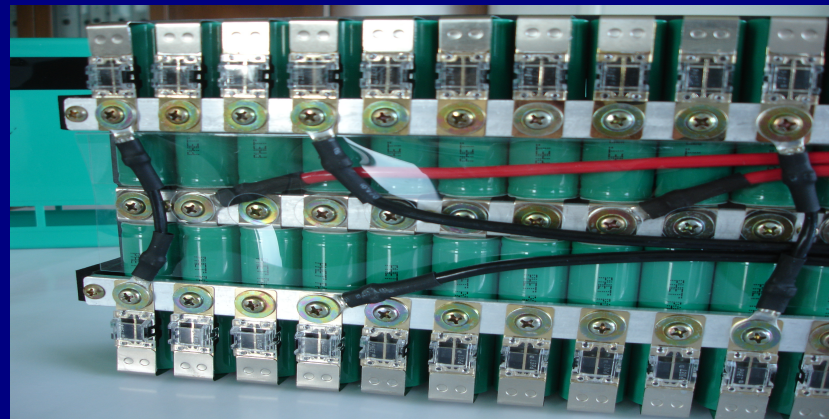
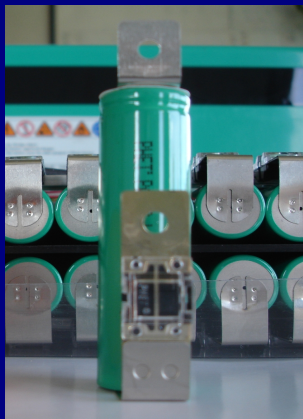
Tous les accumulateurs « chimiques » présentent une grande sensibilité à la température. Le lithium n'échappe pas à cette règle et il faudra prendre soin de stocker ses accus dans un endroit frais (15 à 20 °C).

Enfin le vieillissement en utilisation de la batterie  $\text{LiFePO}_4$  fait apparaître une perte de 5 % de capacité chaque année pour environ 250 cycles annuels de décharges profondes. Pour un régime moins sévère, il faudra prendre un facteur de vieillissement de 2,5 % /an.

Il y a lithium et lithium, toutes les batteries lithium ne sont pas équivalentes en particulier au regard de l'aspect sécurité en mode dégradé (surcharges, endommagements accidentels ...) et de l'aspect des performances. Voici ci-dessous un tableau qui récapitule les avantages et inconvénients des principales technos lithium:

	$\text{LiCoO}_2$	$\text{LiMn}_2\text{O}_4$	$\text{Li}(\text{NiCo})\text{O}_2$	$\text{C-LiFePO}_4$
<b>Sécurité</b>	Très instable, peut prendre feu ou exploser en cas de surcharge, court-circuit, température élevée, destruction	A manipuler avec précaution peut exploser ou prendre feu en cas de surcharge	Très instable, peut prendre feu ou exploser en cas de surcharge, court-circuit, température élevée, destruction	Stable
<b>Durée de vie</b>	Acceptable, environ 500 cycles. Les décharges rapides affectent la durée de vie	Faible, la durée de vie dépend fortement de la vitesse de décharge entre 100 et 800 cycles.	Acceptable entre 300 et 500 cycles. La durée de vie dépend de la vitesse de décharge	Excellent, supérieur à 1000 cycles. La batterie est peu affectée par la vitesse de décharge.
<b>Densité de puissance</b>	Bonne	Acceptable	Bonne	Acceptable
<b>Sensibilité à la température</b>	Se détruit pour des températures supérieures à $55^\circ\text{C}$ ou inférieures à $-20^\circ\text{C}$	Se détruit très rapidement pour des températures supérieures à $55^\circ\text{C}$	Se détruit pour des températures supérieures à $55^\circ\text{C}$ ou inférieures à $-20^\circ\text{C}$	Peu sensible dans les plages $+70^\circ\text{C}$ à $-45^\circ\text{C}$ .

Cellules Lithium  $\text{LiFePO}_4$ , assemblées en grappe.





## Comparatif des performances Plomb (AGM) / Lithium (C-LiFePO4)

valeurs 2008	<i>Tension (volts)</i>	<i>Capacité (Ah)</i>	<i>Puissance (Wh)</i>		<i>Prix TTC (euros)</i>	<i>Prix du KWh (euros)</i>	<i>Durée de vie (nbre cycles)</i>	<i>Poids (kg)</i>
<b>Plomb AGM</b>	12	150	738	<sup>1</sup>	359	486	800	47
<b>C - LiFePO4</b>	12	144	1 244	<sup>2</sup>	1023	822	1200	28,8
<sup>1</sup> compte tenu d'un coefficient de sauvegarde de 0,41								
<sup>2</sup> compte tenu d'un coefficient de sauvegarde de 0,72								

Le bilan poids est nettement en faveur du lithium avec une densité réelle d'énergie variant entre 40 à 60 Wh / kg en fonction de la technologie de packaging. Elle plafonne à 16 Wh / kg avec le plomb. (On parle bien de densité réelle ou utilisable, pas de la densité de l'étiquette !)

La technologie lithium est (en 2008) beaucoup plus onéreuse que le plomb, néanmoins si on considère la durée de vie des 2 types de batterie, l'écart de prix se réduit.

Par ailleurs, on prend rarement en compte le coût des systèmes de management des batteries qui est loin d'être négligeable dès lors que le parc devient important.

## En synthèse

. Le parc de batteries au plomb sera dimensionné de telle sorte que la capacité utile tienne compte d'un coefficient de sauvegarde de la batterie, d'un taux de décharge moyen à C/10 et d'un facteur de vieillissement . On pourra considérer un coefficient de pondération égal à  $0,6 \times 0,95 \times 0,72 = 0,41$

Pour une consommation journalière théorique de 1500 Wh le parc installé devra être au minimum de  $1500 / 0,41 = 3658$  Wh soit 300 Ah en 12 volts et le bateau sera lesté de 92 kg.

. Le parc de batteries au lithium (uniquement C-LiFePO4) sera dimensionné en tenant compte d'un coefficient de sauvegarde de 0,8 et d'un facteur de vieillissement de 0,904. Le coefficient de pondération sera donc de 0,72.

Pour une consommation journalière théorique de 1500 Wh le parc installé devra être au minimum de  $1500 / 0,72 = 2083$  Wh soit 175 Ah en 12 volts et le bateau sera lesté de 25 kg.

. Dans les 2 cas il sera judicieux d'obtenir les caractéristiques techniques de la batterie avant l'achat.

**Au sujet des annonces:** Il est assez rare de retrouver les performances annoncées par le constructeur. En règle générale les annonces de capacité sont surestimées par les constructeurs (voir fantaisistes), en particulier pour les batteries de nouvelle technologie telle le lithium. Il suffit de dire Lithium pour que d'un seul coup la performance de stockage devienne ce qu'il y a de mieux dans l'esprit du consommateur. Malheureusement la (dure !) réalité est bien loin de la théorie. On retrouve néanmoins une constante: les leaders ne le sont pas par hasard, en lithium comme en plomb !

## Augmenter la capacité de son parc

A partir d'une situation existante d'un parc de batteries, disons la configuration initiale du voilier, il est possible d'augmenter la capacité de son parc, en gros de 2 manières:

- la première consiste à remplacer sa batterie par une batterie de plus forte capacité,
- la deuxième consiste à monter une deuxième batterie en parallèle de la première, qui pourra ou non être remplacée par une batterie de plus forte capacité.

A ce stade, il est fondamental de préciser quelques règles simples qui permettent d'éviter de fâcheux désagréments, au combien nombreux à entendre les discussions de ponton.

Monter 2 batteries en parallèle c'est possible sans exploser la tirelire à condition ...

De monter en parallèle 2 batteries de même tension (si,si), de même capacité, de même marque, de même vieillissement !

Par ailleurs on veillera à ce que le branchement des câbles sur le montage en parallèle ne génère pas un déséquilibre entre les 2 batteries.

Attention: 2 batteries neuves en vente chez le ship de même tension, même marque, même capacité n'ont pas forcément le même vieillissement. Il faut vérifier la date de fabrication de la batterie et / ou le numéro de lot de fabrication.

Tous les fabricants, grossistes ou détaillants ne pratiquent pas le FIFO !

## La production

La production d'énergie électrique se résume à 3 grands principes:

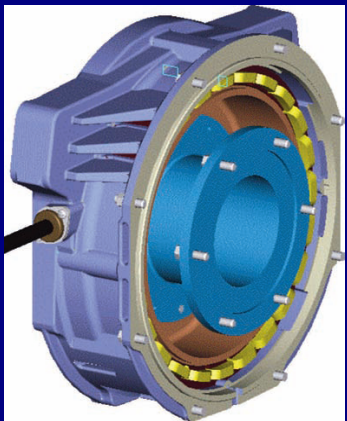
- La production par un alternateur, que celui-ci soit entraîné par un moteur thermique, le vent ou l'eau. Les moyens les plus utilisés sur nos voiliers sont avec le moteur Diesel équipé de son alternateur, le groupe électrogène en allumage commandé ou non, l'aérogénérateur, l'hydrogénérateur.
- La production par cellules photovoltaïques
- la production par oxydoréduction telle que la pile à combustible.



## Le moteur à combustion interne type Diesel

Le premier producteur d'énergie électrique est le moteur diesel avec son alternateur. Sous réserve de disposer d'un bon régulateur de tension, c'est la solution radicale pour recharger son parc d'accumulateurs. L'inconvénient évident sur un voilier, c'est le bruit, les vibrations, les émissions de Nox, HC, CO et particules.

A noter que Yanmar commercialise via son importateur Fenwick un générateur AC de 3kVA qui s'interpose entre le moteur et le Sail Drive: un moyen élégant pour disposer d'un courant de 230 volts pour un surcoût en poids qui reste raisonnable.



		Specifications	
Modele		KMG65E-S3, S6	KMG65E-K3, K6
Systeme	Voltage	230 Vac	
	Frequence	50 Hz	
	Forme & Phase	Courbe, sinusoïdale	
Poids	Generateur	21kg	20.5kg
	Boitier (1)	13kg	
Dimensions	Generateur	SAE#5	
	Boitier	320x360x145mm	
Consommation boitiers		< 3A (12Vdc)	
Application sur sail drive ou inverseur		SD50	KM35P,A(2)
Application sur moteurs		3JH4E, 4JH4E	
Régime maxi autorisé		3500 tr/mn	
Répond aux normes (EMC)		EC COUNCIL DIRECTIVE 89/336/EEC	

## Le groupe électrogène

Variante du moteur diesel, le groupe électrogène est très efficace pour produire de l'énergie en DC 12 ou 24 V, ou AC 230 V. Il est disponible en allumage commandé ou non.

On en trouve de toutes les tailles, à tous les prix.

Les petits modèles, essentiellement portatifs sont équipés de moteur 4 temps à allumage commandé. Ils permettent de produire 2 KW pour un poids de l'ordre de 20 kg et sont facilement logeable dans un des coffres du bord. L'inconvénient majeur est d'avoir à stocker de l'essence à bord.



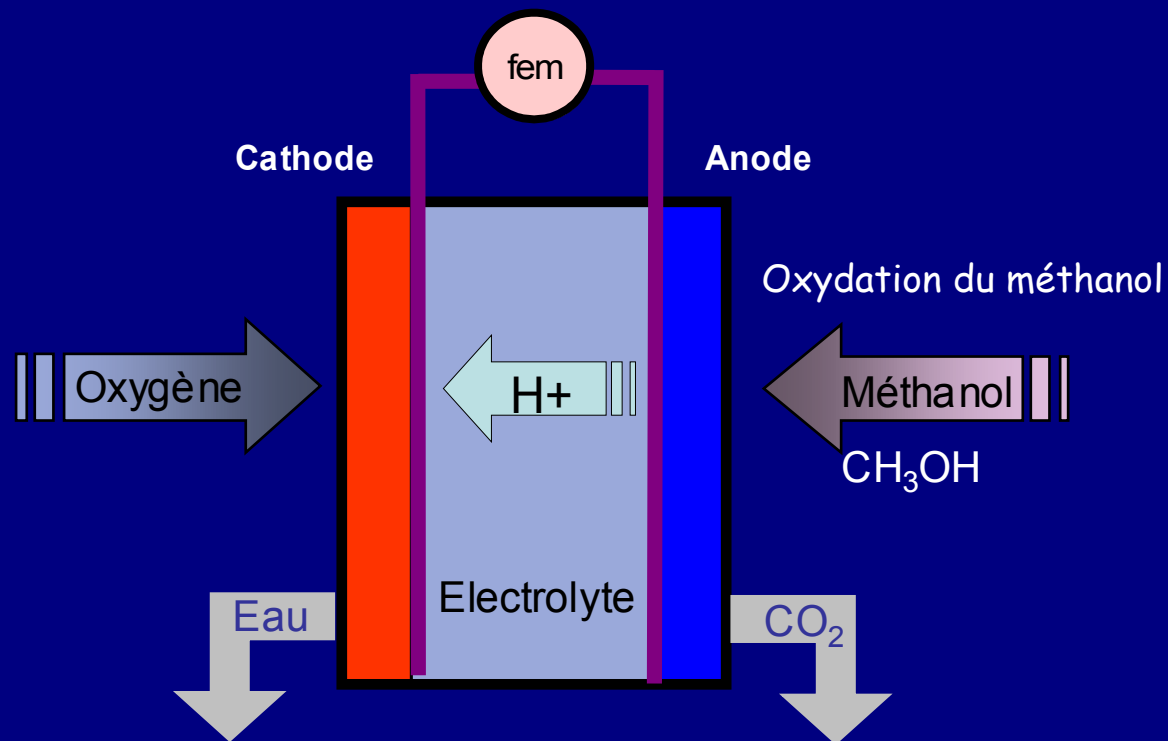
Le groupe en forte puissance ( $> 5\text{KW}$ ) est un moyen de production d'énergie plutôt réservé aux grosses unités. L'idéal est de prévoir son implantation dès la conception du navire afin de respecter au mieux les contraintes de fonctionnement telles que l'évacuation des gazs, la ventilation, le refroidissement moteur, la sécurité, l'isolation et l'insonorisation.

On préférera les modèles à faible vitesse de rotation afin de limiter le bruit généré par le moteur, (la courbe de bruit en dB augmente en effet très vite avec le régime de rotation) et les modèles à 4 cylindres qui en règle général envoient moins d'énergie vibratoire dans les supports de fixation du moteur.

Enfin on vérifiera l'absence de régime de résonance sur la plage d'utilisation du moteur. Dans le cas contraire il faudra revoir la filtration du dispositif.

## La pile à combustible

Si on en juge par les investissements de recherche sur cette technologie, on peut très certainement estimer que dans un avenir proche (?), nous verrons apparaître de nouveaux produits à prix attractif. Pour l'heure, la pile à combustible commercialisée est une pile au méthanol de type Direct Méthanol Fuel Cell (DMFC) dont le principe est d'oxyder directement le méthanol dans la pile et produire ainsi une force électromotrice. En sortie on récupère de l'eau (chaude) et du  $\text{CO}_2$ .



Comparativement aux moteurs à combustion interne, la pile à combustible se révèle être moins polluante puisqu'elle ne rejette que du  $\text{CO}_2$  et de l'eau.

Elle peut fonctionner H24 tout en se faisant oublier, la production de courant est donc très régulière.

Elle présente l'avantage d'être très silencieuse, et pour les piles usuelles, le courant délivré est de l'ordre de 5 ampères pour un poids d'environ 8 kg.



Parmi les inconvénients on peut citer:

- son prix très élevé même si la tendance est à la baisse. Il faut compter 3700 euros (prix 2008) pour se doter d'une pile qui délivre 5 A,
- un rendement énergétique assez faible, de l'ordre de 20 %,
- une fiabilité douteuse, vraisemblablement due au fait que la technologie n'est pas encore arrivée à maturité pour la grande série,
- méthanol rime avec pétrole (gaz en l'occurrence), donc le prix du bidon de 5 litres est exorbitant. D'ailleurs, les prix du méthanol au détail ressemblent à du grand n'importe quoi: de 3 euros du litre à 7 euros en 2008 !
- la difficulté de trouver du méthanol dans des contrées pas aussi reculées qu'on imagine.
- le méthanol est un poison.

Certains vous diront que la pile à combustible fonctionne très bien et qu'ils n'ont jamais eu aucun souci avec ce dispositif.

Ceci prouve au moins une chose: on n'est jamais à l'abri d'un coup de chance !

## Le panneau photovoltaïque

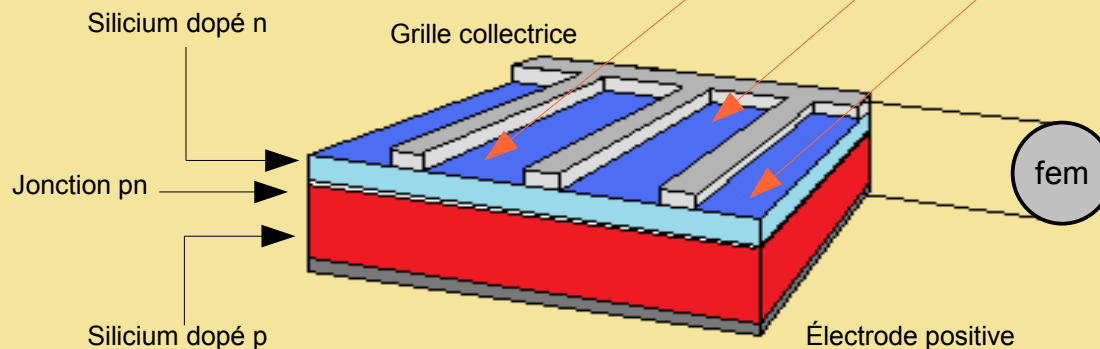
Voilà une technologie appelée à se développer dans un avenir proche, soutenue par d'importants programmes de recherche visant à améliorer le rendement des cellules photovoltaïques.

L'énergie collectée est proportionnelle à la surface des panneaux et à l'ensoleillement (donc à utiliser de préférence aux faibles latitudes).

Il faudra également tenir compte de l'orientation du panneau par rapport au flux lumineux, ce qui peut compliquer l'installation sur le voilier.

On utilise un matériau semi conducteur tel que le silicium dont une partie est chargée négativement et l'autre positivement, par diffusion d'un dopant. Sous l'effet de la lumière, des électrons sont « arrachés » du métal dopé n (donc en excès d'électrons) pour circuler dans le circuit opéré entre les bornes: il se crée un courant continu.

On obtient la tension de service par la mise en série des cellules élémentaires et la puissance par la mise en parallèle des groupes de cellules.



Puissance collectée: environ  $100 \text{ W/m}^2$   
sous un ensoleillement d' $1 \text{ KW/m}^2$





Les panneaux solaires existent en version rigide montés sur un cadre aluminium ou en souple à poser sur le pont. Dans le premier cas il faudra installer un support de type portique pour recevoir les panneaux , portique que l'on pourra utiliser pour l'annexe et autres accessoires. Dans le deuxième cas, il suffit de disposer d'un peu de place sur le pont pour étaler le panneau. Si on fait l'impasse sur le cycle de production, l'énergie photovoltaïque en utilisation est une énergie propre, sans nuisances si ce n'est éventuellement visuelle.

Parmi les inconvénients, notons que la production d'énergie est assez faible et discontinue puisqu'elle dépend de l'ensoleillement. Par ailleurs, elle est peu prédictive puisqu'elle dépend de la météo mais aussi de l'orientation des panneaux par rapport au soleil (donc de l'allure et du cap) sauf à mettre en place un système de poursuite dont la complexité et le poids seront proportionnels à l'automatisation.

Dans la configuration rigide des panneaux, l'installation augmente notablement le fardage et le poids.

Pour espérer produire de l'électricité en quantité, il faudra augmenter significativement la surface des panneaux ce qui est plutôt réservé aux grosses unités et qui nécessite d'être intégré dès la conception du bateau.





## L'aéro générateur

Aussi appelé improprement « éolienne », l'aéro générateur produit de l'électricité en récupérant l'énergie du vent via un dispositif mécanique constitué d'une hélice et d'une génératrice.

La puissance délivrée varie avec le cube de la vitesse du vent ce qui semble extrêmement séduisant mais qui n'est pas maîtrisée par le capitaine (la vitesse du vent !), et avec le carré du rayon (ou diamètre) de l'hélice qui lui, fait l'objet d'un choix possible.

En réalité, la puissance délivrée ne peut excéder 0,593 de la puissance du vent, ce qu'on appelle la limite de Betz. Rapportée au mètre carré balayée par l'hélice la puissance maximale vaut  $0,36 \times V^3$ , soit 156 Watts / m<sup>2</sup> pour un vent de 15 kts.

En fait le rendement est nettement plus faible car les « éoliennes » destinées à nos voiliers sont pénalisées par leur faible dimension et beaucoup des produits commercialisés présentent plus les caractéristiques du ventilateur que de l'aérogénérateur.



Ne pas oublier de dimensionner correctement la taille du « tuyau » pour passer les électrons . La taille dépendra du débit (les ampères) et de la longueur du tuyau. En situation de mouillage et par vent soutenu, la puissance peut très vite monter au dessus de 440 W. En 15 volts, il faut passer environ 30 ampères sur une distance significative puisqu'en règle générale les aérogénérateurs sont installés sur l'arrière du navire. Il faudra donc calculer la section des câbles d'alimentation avec soin ou bien augmenter la tension pour le transport du courant.

A l'instar des panneaux solaires, le rendement est meilleur à poste fixe, par exemple au mouillage, qu'en utilisation sous voiles. En effet, d'une part le vent capté par l'éolienne est le vent apparent et d'autre part le système étant articulé, il est soumis aux accélérations (nombreuses) dues au mouvement du bateau.

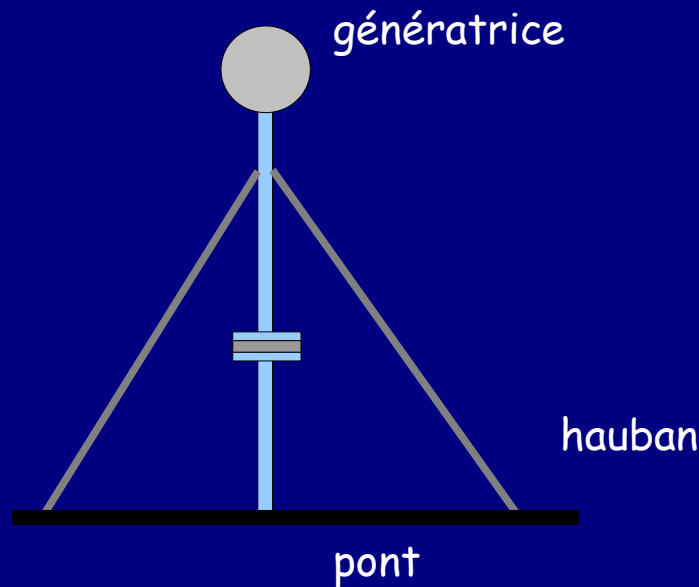
Fortement décriée pour ses nuisances acoustiques et vibratoires, l'éolienne apporte néanmoins un courant assez élevé de l'ordre de 5 ampères dès 15 kts de vent.

L'installation sur le navire est conséquente car la génératrice est installée en haut d'un mât pour des raisons évidentes de sécurité (et d'efficacité) et ce mât est étayé par une triangulation de haubans ou de tirants. Il existe une variante de montage avec le portique ce qui limite la longueur du mât.

Les 2 principales nuisances de l'aérogénérateur sont le bruit et les vibrations. Pour le bruit, il n'y a pas grand chose à faire si ce n'est à bloquer l'hélice en rotation. Pour filtrer les vibrations on peut essayer de découpler la génératrice du bateau en interposant une filtration type diabolos en élastomère.

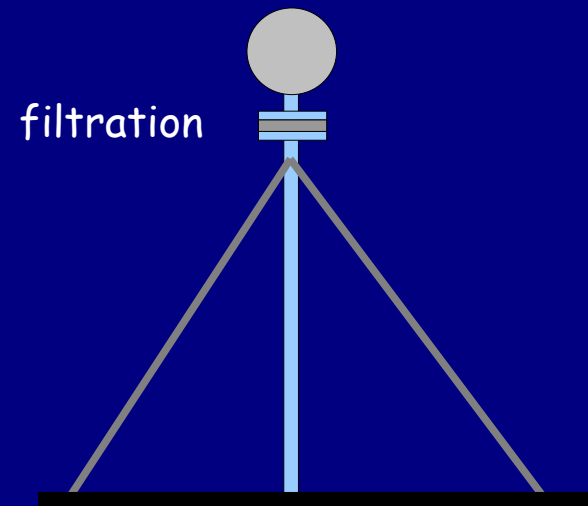


On voit parfois quelques erreurs de montage du type une feuille de caoutchouc prise en sandwich entre 2 platines reliées par 4 vis qui elles ne sont pas filtrées, ou bien la filtration du mât est sous le haubanage.



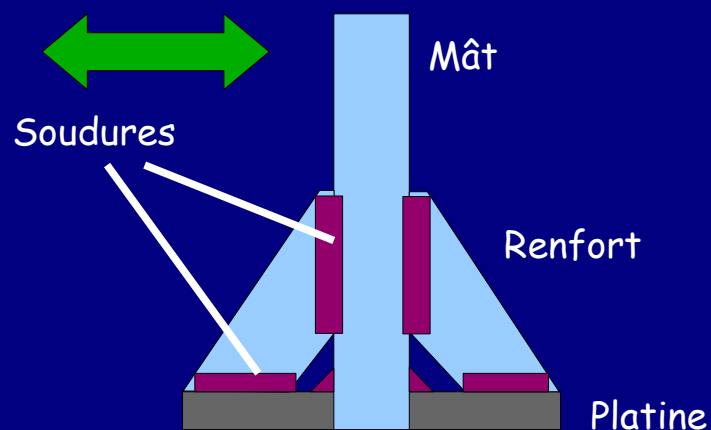
Ce montage est inefficace d'un point de vue vibratoire.

Néanmoins on peut comprendre la raison d'un tel montage rencontré quelques fois sur des voiliers, qui est de limiter le moment d'encastrement au niveau de la platine. Mais dans ces conditions de filtration il vaut mieux ne rien mettre du tout, ce qui d'un point de vue purement structurel est encore meilleur.



Ce montage est efficace d'un point de vue vibratoire pour peu que l'élément filtrant ne se limite pas à une simple feuille en caoutchouc. Par contre il nécessite de prendre quelques précautions structurelles qui sont détaillées dans la page suivante.

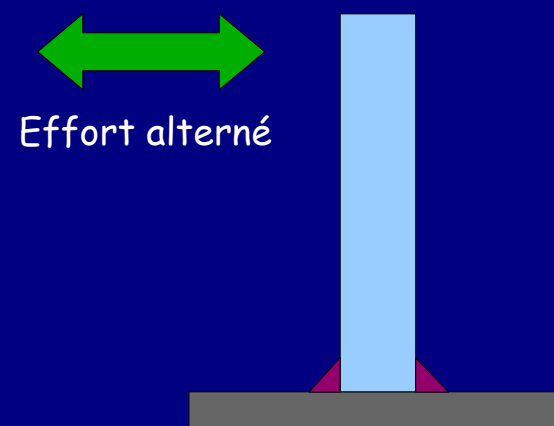
L'installation de la filtration nécessite de respecter quelques règles essentielles de dimensionnement et de réalisation afin d'éviter des faiblesses structurelles. Le fardage d'un aérogénérateur est assez conséquent, et il faut que l'ensemble puisse résister aux vents les plus forts.



Le mât doit traverser la platine avant soudure

Par symétrie, même chose pour la platine inférieure. L'encastrement dans la platine est renforcé par la présence des renforts latéraux. Il faut prendre en compte qu'une soudure fragilise toujours une pièce, surtout si celle-ci est sollicitée en flexion alternée ce qui est le cas d'un mât d'aérogénérateur soumis au vent et aux accélérations du bateau.

Le plus mauvais montage (déjà vu !) serait celui-ci:



Concernant l'élément filtrant, le choix est assez large: de la feuille de caoutchouc prise en sandwich dont l'effet est à peu près celui du pansement sur une jambe de bois, jusqu'aux plots filtrants multidirectionnels.

Le choix se résumera bien souvent à un compromis entre la dureté shore la plus faible possible visant à privilégier la filtration et la tenue mécanique de la liaison, surtout en fatigue. Voici quelques plots assez classiques utilisés sur les moto ventilateurs ou les petits moteurs:



La bobine classique peu efficace  
en compression axiale



Le diabolo



Le plot en 45 shore.  
Fixation 2 points



Autre variante en 60 shore  
et fixation 3 points



45 Shore et fixation en 2 points,  
peut également être utilisé pour  
un groupe électrogène



## L'hydrogénérateur

C'est la variante aquatique de « l'éolienne » sans les nuisances. Il faudra néanmoins accepter de traîner une hélice dans l'eau avec pour conséquence de faire perdre environ un demi noeud.

Si les panneaux solaires et l'aérogénérateur produisent un petit peu, dans à peu près toutes les conditions d'utilisation, l'hydrogénérateur ne sera efficace que si le bateau se déplace, ce qui exclue son utilisation au mouillage à moins d'être dans un (très !) fort courant.

La plage d'utilisation en vitesse est comprise, en règle générale entre 3 et 10 kts. En dessous de 3 kts le dispositif ne délivre rien ou très peu, et au-dessus de 10 kts l'hélice décroche. Sur certains matériels il est possible d'adapter l'hélice à la vitesse du bateau.

On peut compter entre 3 et 5 ampères, H24 sur une traversée type Alizés, en considérant une vitesse moyenne de 4 kts.

Il existe également des systèmes permettant de convertir l'aéro en hydro et inversement à partir du même matériel avec le risque qu'à vouloir tout faire, l'engin ne soit ni un bon aéro, ni un bon hydro.



## Comparatif des différents moyens de production étudiés

On peut essayer de se fixer quelques critères qui amèneraient à choisir tel ou tel mode de production d'énergie en fonction de son programme de navigation. Voici donc, dans les pages suivantes, une tentative de paramétrage conduisant à l'établissement d'une grille de choix, exercice toujours difficile à réaliser car il prend en compte des hypothèses qui ne font pas obligatoirement l'unanimité.

A défaut d'apporter une réponse universelle, cet exemple pourra servir de base de réflexion pour que chacun puisse réaliser son analyse et en tirer ses propres conclusions.

Le modèle prend en considération 5 critères:

- la capacité du moyen à produire de l'énergie, en gros c'est le nombre de kWh par jour
- la prestation poids et le fardage de l'équipement
- les nuisances provoquées par l'équipement quelles soient d'ordre acoustique, vibratoire ou environnementale.
- la fiabilité de fonctionnement.
- le prix du kWh

De ces caractéristiques on essaiera d'en déduire une grille, associant les moyens de production d'énergie au programme de navigation.

## Calcul du prix du KWh

On peut décomposer le prix du Kwh en:

- un coût fixe lié à l'investissement de l'équipement
- un coût variable de fonctionnement qui correspond à une consommation
- un coût d'entretien annuel quasi fixe

Le coût fixe sera réparti sur une durée pendant laquelle le moyen a fabriqué une certaine quantité d'énergie.

Ceci amène les remarques suivantes:

1) la durée d'amortissement est fixée à 5 ans.

Pourquoi 5, pourquoi pas 10 ou 15 ? Disons qu'il s'agit d'une règle comptable considérant que la durée de vie moyenne de l'équipement avant renouvellement est de 5 ans. C'est sûrement sous estimé dans le cas d'un groupe électrogène et c'est sûrement sur estimé dans le cas de la pile à combustible.

2) la durée de fonctionnement pendant laquelle le moyen produit de l'énergie.

On conçoit assez bien, indépendamment des nuisances, qu'un groupe électrogène puisse produire de l'énergie électrique H24. Ce n'est pas le cas d'un panneau photovoltaïque, d'un hydrogénérateur ou d'un aérogénérateur dont les phases de fonctionnement dépendent d'éléments non maîtrisés (météo). Il est donc indispensable de considérer des hypothèses assez réductrices et hautement contestables, basées sur la probabilité de fonctionnement de l'équipement.

3) la durée d'utilisation de l'équipement qui ne dépend que du programme de navigation, mais qui permet de répartir le montant de l'investissement sur le nombre de Kwh généré.

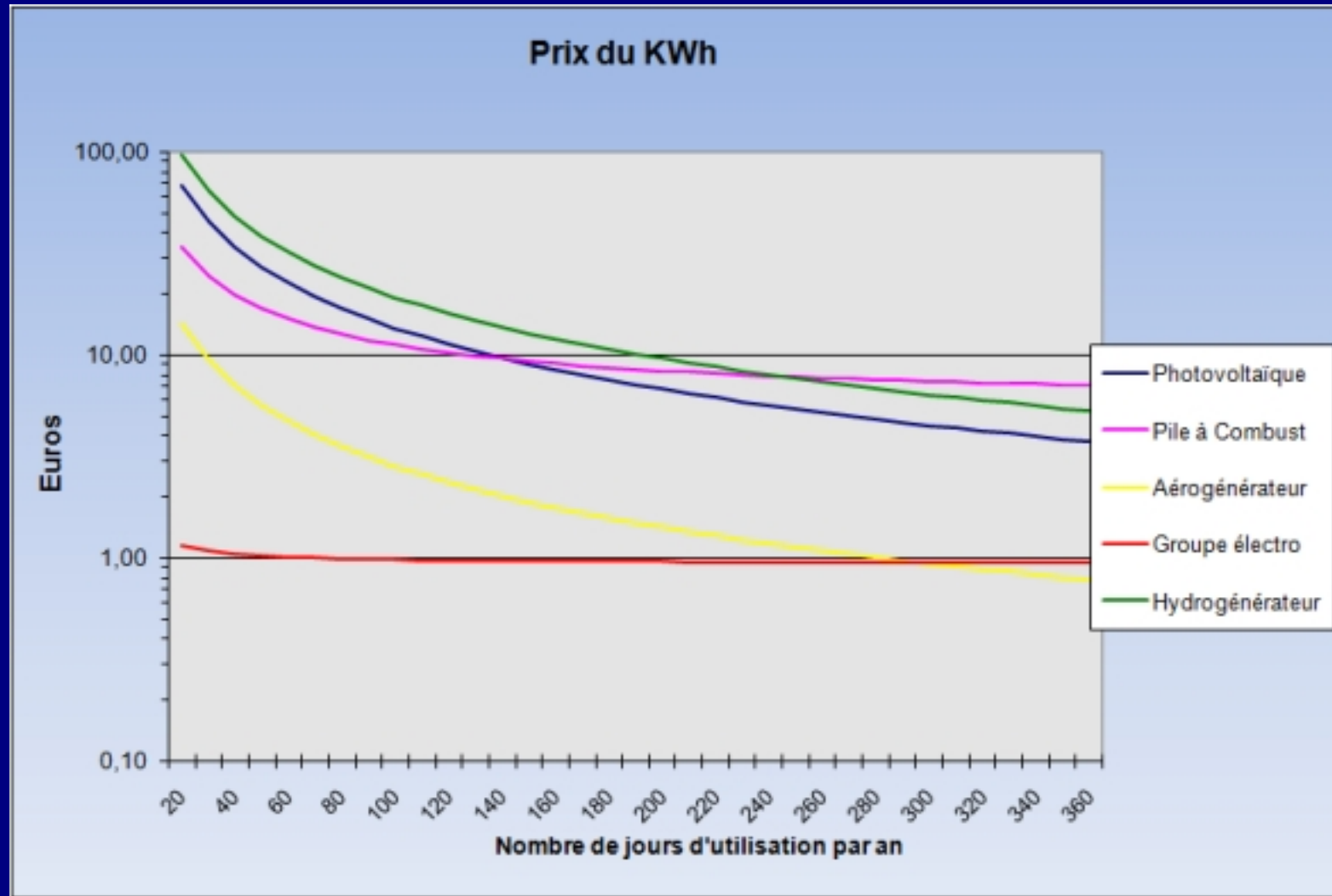
Exemple: Un propriétaire qui utilise son voilier 5 jours par an, ne pourra dans le meilleur des cas, que produire pendant 120 heures. L'investissement de son équipement est rapporté au nombre de Kwh produits pendant ces 120 heures.

On voit donc apparaître 2 notions. La première est le temps « d'ouverture » qui correspond en fait au temps pendant lequel le moyen est susceptible de produire.

(A ce stade, les puristes pourront rétorquer que même sans utiliser le voilier on peut produire de l'énergie utile à la recharge des batteries par exemple)

La deuxième notion se rapporte à la probabilité de produire l'énergie pendant le temps d'ouverture et on revient à la remarque n°2.

Le graphique donne une approche du prix du Kwh à partir des hypothèses énoncées précédemment.



L'ordonnée est une échelle logarithmique.

La durée d'utilisation correspond au programme de navigation:

20 jours par an, c'est déjà beaucoup pour une grande majorité de plaisanciers.

365 jours par an correspond au grand voyage.

## Quelques constatations:

Le prix du Kwh baisse avec l'augmentation de la durée d'utilisation: l'investissement rapporté au Kwh est mieux absorbé quand le nombre de Kwh fabriqués augmente, c'est à dire quand le temps d'utilisation augmente.

A mesure que le temps d'utilisation augmente, le coût du Kwh tend vers le coût variable de fonctionnement.

Les technologies « propres » (hydro et aérogénérateur, photovoltaïque) sont pénalisées par leur capacité relativement faible à produire de l'énergie. Autrement dit le poids de l'investissement pèse lourdement sur le peu de Kwh fabriqués.

## En synthèse

	CRITERES					Observations	PROFIL D'UTILISATION				
	Capacité de production	Prestation Poids Fardage	Nuisances accoustique vibratoire émissions	Fiabilité de fonctionnement	Prix du Kwh		Loisirs Occasionnel	Loisirs Chevronné	Régate	Course transat amateur	Voyages
Moteur / Alternateur	++	--	---	+++	De toutes façons il en faut un !	En continu, cela s'appelle un bateau à moteur	de base	de base	de base	de base	de base
Groupe électrogène	+++	-	---	+++	1,17 €	Rapport Prix / Production excellent	0	0	-	-	0
Pile à combustible	+	++	++	--	33,71 €	Vivement les nouvelles générations moins chères et plus fiables.	-	0	-	0	-
Panneaux solaires	--	-	+++	+++	67,71 €	Serait la solution idéale dans les énergies propres si le rendement était plus élevé.	-	0	-	-	0
Aéro générateur	-	-	+	++	14,14 €	Pas si mal en production et en prix	-	0	-	-	0
Hydro générateur	---	+	++	+	95,83 €	Pas toujours simple de trainer quelquechose derrière soi	-	-	-	-	0



## En conclusion

. Les technologies à base d'énergie fossile sont encore de loin (en 2008) les plus performantes et les plus souples d'utilisation. Il suffit de tourner la clé ou de presser le bouton pour disposer des ampères heure .

. La pile à combustible mérite qu'on s'y intéresse dans les années à venir, car très certainement des progrès significatifs vont permettre de fiabiliser la technologie et de faire baisser les prix avec l'accroissement des volumes de production. Pour l'instant, réservée aux plus fortunés (ou au plus passionnés !) ou aux régatiers sponsorisés, la pile à combustible pourrait bien devenir dans un avenir proche le moyen principal de production de l'électricité sur nos canots quel que soit le programme. Notons qu'elle présente même un intérêt pour le plaisancier passionné qui utilise très régulièrement son navire, et qui souhaite éviter les taxes portuaires lors de ses navigations côtières. Avec une pile à combustible, il devient totalement autonome, au moins pour l'énergie.

. Les technologies dites propres pêchent par leur manque de prédictibilité et par la faible quantité d'énergie délivrée. Elles constituent néanmoins un complément non négligeable, en particulier pour les grands voyages (voir éventuellement pour le stockage des canots en période d'inactivité)  
Si les technologies de production à base d'alternateurs ont peu de chances de connaître un bond technologique dans les années à venir, en revanche le photovoltaïque devrait connaître une amélioration constante du rendement des cellules ainsi qu'une baisse des coûts de production qui sera bien évidemment répercutée sur le consommateur (! ?)

Outre les programmes de navigation très spécifiques tels que la régate ou la course transatlantique, on aura donc tout intérêt à diversifier ses sources de production et à jouer la carte d'une source principale sûre, à fort débit et prédictive avec une ou des sources secondaires « propres ».

Pour la course il ne faudra pas hésiter, dès lors qu'on est sponsorisé: pile à combustible + batterie lithium.

L'objectif ici est de gagner du poids et d'assurer l'énergie minimale permettant les communications. La configuration idéale est de disposer d'une batterie de démarrage au lithium et une ou 2 pour la servitude.

2 piles à combustible permettront de produire 10 Ampères sur 24 heures et d'embarquer ainsi, moins de gaz oil.