

L'électricité à bord des bateaux de plaisance

L'électricité joue un rôle de plus en plus important à bord des bateaux de plaisance, et non seulement pour l'alimentation des instruments de navigation. Les progrès techniques sont heureusement tels que l'électricité n'est plus un souci majeur. Par conséquent l'on embarque de plus en plus d'appareils électriques, commençant par le réfrigérateur et finissant par ... non, en fait il n'y a pas de fin.

En plus des équipements nautiques spécifiques, une grande variété d'appareils électriques ménagers apparaît aujourd'hui sur les bateaux de toutes tailles.

Ceci est le texte préliminaire d'un ouvrage sur l'électricité à bord des bateaux de plaisance, petits et grands.

Je souhaite ainsi fournir des éclaircissements à tous ceux qui sont concernés par l'électricité à bord, qu'ils soient plaisanciers ou professionnels.

Avec le concept DC présenté dans ce livret j'espère aussi contribuer à une meilleure fiabilité et à des gains de poids et d'encombrement des systèmes électriques à bord de bateaux de taille moyenne.

Le livret n'est pas terminé. Dans les mois à venir, le texte et les illustrations vont être développés.

Reinout Vader



Copyright © 2000-2001 Victron Energy B.V.
Tous droits réservés

Reproduction interdite

Victron Energy BV ne donne aucune garantie, explicite ni implicite, y compris mais non limitée à toute garantie implicite de commercialisabilité ou de compatibilité pour une application particulière, sur les produits portant sa marque et rend ces produits disponibles exclusivement "en l'état".

En aucun cas Victron Energy BV ne pourra être tenue responsable des dommages spéciaux, collatéraux, accessoires ou consécutifs liés à ou survenant de l'achat ou de l'utilisation de produits de sa marque. La responsabilité de Victron Energy, quelle que soit la forme ou l'objet du recours, ne pourra en aucun cas dépasser la valeur d'achat des produits Victron Energy concernés.

Conditions et autorisations de publication sur demande auprès de Victron Energy BV

Version française : Pieter Vader

Victron Energy se réserve de droit de modifier et d'améliorer ses produits

Victron Energy bv

De Paal 35, 1351 JG Almere Haven
P.O. Box 50016, 1305 AA Almere-Haven
Pays-Bas

Tél. +31 (0)36 535 9700
Fax +31 (0)36 535 9740
web: www.victronenergy.com

L'électricité à bord des bateaux de plaisance

(Et dans d'autres environnements où un raccordement permanent au réseau électrique n'est pas disponible)

Avant-propos

Victron Energy développe et produit depuis plus de 25 ans des composants et des solutions pour la fourniture d'énergie autonome : systèmes pour des bateaux de plaisance à voile ou à moteur, des bateaux de pêche, des péniches, des habitations isolées et toutes sortes de véhicules, et pour une quantité illimitée d'autres applications souvent inattendues.

Nous savons par expérience que la production et le stockage d'énergie électrique à petite échelle sont une matière complexe. Les sous-ensembles d'un système autonome sont coûteux et vulnérables. Surtout la batterie - élément de stockage incontournable dans un tel système - dure souvent moins longtemps que prévu et provoque des "pannes de courant" nécessitant de nouveaux investissements imprévus.

Les développements dans la fourniture d'énergie autonome à bord de voiliers ou de bateaux à moteur sont exemplaires. La quantité et la diversité d'appareillages électriques à bord augmentent rapidement alors que simultanément l'espace disponible et le poids sont réduits au minimum, l'habitabilité et les performances nautiques ayant naturellement la priorité.

Chez Victron Energy nous observons les évolutions techniques et la demande de performances de plus en plus élevées des systèmes électriques autonomes, nécessitant leur amélioration constante et une compatibilité parfaite des éléments qui le composent.

Cette vue d'ensemble présente des produits et des solutions nouvelles, avec une attention particulière pour leur bonne intégration dans un système autonome.

Lors de comparaisons de produits, leur marque n'est citée que lorsqu'il s'agit de produits uniques, disponibles exclusivement sous cette marque ou difficilement sous une autre. Les produits uniques de Victron Energy qui seront cités sont:

- Régulateurs d'alternateur avec compensation externe de tension et de température.
- Convertisseurs et combinés chargeur-convertisseur parallélisables.
- Chargeurs avec une sortie indépendante et limitée en intensité pour la batterie de démarrage et dont la tension est légèrement plus basse pour éviter sa surcharge.
- WhisperGen: micro-centrale d'énergie à moteur Stirling.
- WhisperAir: climatiseur DC à très faible consommation électrique.

Bien que traitant essentiellement de bateaux de plaisance, la plupart des produits et solutions sont également utilisables dans d'autres systèmes électriques autonomes.

Nous avons choisi les sujets et l'ordre suivants.

Chapitre 1. La batterie d'accumulateurs. Pourquoi une durée de vie si souvent décevante ?

La batterie est au cœur de presque tous les petits systèmes électriques autonomes. Sans batterie, pas de stockage d'énergie. La batterie est aussi le sous-ensemble le plus coûteux et le plus vulnérable. C'est justement à cette vulnérabilité que nous porterons une attention particulière dans ce chapitre.

Chapitre 2. Les caractéristiques de charge

Chaque type de batterie nécessite une méthode de charge spécifique. Ce chapitre donne un aperçu des caractéristiques de charge optimales pour les batteries plomb-acide les plus courantes.

Chapitre 3.. La surveillance de l'état de charge de la batterie Le moniteur de batterie

Le contrôleur de batterie donne l'état de charge de la batterie et peut aussi servir au démarrage automatique de systèmes de recharge ou à signaler le besoin de recharge. Sur des batteries de forte capacité, un contrôleur avec compteur d'ampères-heures est indispensable. Si l'on attend que la tension "s'écroule" avant de recharger, c'est trop tard : la batterie est déjà trop déchargée et vieillira rapidement.

Chapitre 4. La charge des batteries avec un alternateur ou un chargeur.

L'alternateur à régulateur intégré tel qu'il est utilisé dans l'industrie automobile est souvent mal adapté, surtout lorsqu'il s'agit de charger plusieurs batteries séparées par un répartiteur à diodes.

Chapitre 5. WhisperGen : le générateur à moteur Stirling.

Enfin fiable près de deux siècles après son invention, le moteur Stirling surpasse brillamment le moteur diesel du point de vue du bruit, des vibrations, de l'entretien et de la durée de vie.

Victron Energy fournit en exclusivité une micro-centrale d'énergie à moteur Stirling (électricité et chaleur) pour les applications embarquées.

Chapitre 6. Le concept DC.

Toute l'énergie passe par la ou les batteries. Du courant continu alimente directement certaines utilisations, du courant alternatif est produit par un ou plusieurs convertisseurs. C'est pour ce concept "DC" qu'a été mis au point le WhisperGen. Même pour des systèmes plus importants où un ou plusieurs générateurs Stirling ne suffisent pas, le concept DC est souvent très attractif.

La batterie qui efface les pointes de consommation permet de réduire considérablement la puissance des générateurs diesel ou du branchement au quai. Et que le quai soit à 50 ou 60 Hz devient sans importance : le système chargeur-batterie-convertisseur devient aussi un convertisseur de fréquence.

Un système DC est également beaucoup plus simple et plus fiable qu'un système AC.

Chapitre 7. Mesures et calculs de consommation

Ce chapitre décrit les appareils électriques courants à bord et leur consommation. Avec les éléments du chapitre 6 nous traiterons ensuite des solutions AC et DC.

Chapitre 1

La batterie d'accumulateurs.

Pourquoi une durée de vie si souvent décevante ?

1.1. Introduction

La batterie est un produit mystérieux. De l'extérieur elle ne dévoile rien de sa qualité, de son âge ou de son état de charge.

L'ouvrir pour examiner son état intérieur est impossible. Tout démontage est irréversible et seuls des spécialistes sont capables d'analyser son contenu (plaques, électrolyte à base d'acide sulfurique...) et de déterminer dans certains cas les causes d'un vieillissement prématuré.

Une batterie est coûteuse, encombrante et très lourde. Comparez: un groupe électrogène diesel ne consommerait que 10 litres (= 8,4 kg) de gazole pour charger une batterie de 24V/700Ah. Cette batterie a un volume de 300 dm³ (= 300 litres) et pèse 670 kg!

Les batteries sont très vulnérables. Surcharge, manque de charge, décharge profonde, température trop élevée ... Tout peut arriver et les conséquences sont souvent catastrophiques.

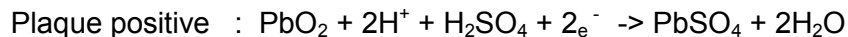
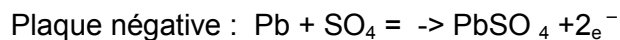
Nous allons maintenant brièvement rappeler la chimie de la batterie. Nous ne traitons ici que des batteries plomb-acide, les autres types étant trop peu répandus. Nous verrons ensuite tous les points faibles de ces batteries, les méthodes correctes de décharge-recharge, et terminons par une comparaison des batteries les plus courants.

1.2. La chimie de la batterie

1.2.1 Que se passe t'il dans un élément lors de la décharge?

Lorsqu'un élément est déchargé la plaque positive se couvre de sulfate de plomb par prélèvement de l'acide contenu dans l'électrolyte, et il se forme de l'eau. La plaque négative aussi prélève l'acide et se couvre de sulfate de plomb. La quantité d'électrolyte reste pratiquement égale, mais son acidité et donc son poids spécifique diminuent.

Les formules chimiques sont les suivantes :



1.2.2. Que se passe t'il dans un élément lors de la charge?

Lors de la charge, la réaction chimique est inverse: les mêmes formules se lisent de droite à gauche. Les deux plaques libèrent de l'acide, la plaque positive se transforme en oxyde de plomb et la plaque négative en plomb spongieux. Dès que la batterie est chargée, elle n'accepte plus d'énergie et l'excédent décompose l'eau en hydrogène et en oxygène, un mélange hautement inflammable et explosif ! C'est pourquoi il est si important de tenir une batterie en cours de charge à l'écart de toute flamme ou étincelle, et dans un endroit correctement ventilé.

1.3. Les batteries plomb-acide les plus courantes

1.3.1. Plomb-antimoine et plomb-calcium

Pour rendre les plaques plus résistantes l'on utilise des alliages de plomb et d'antimoine ou de plomb et de calcium (avec d'autres éléments en quantité moindre comme par exemple du sélénium).

Il est important de savoir que les batteries aux alliages à l'antimoine ont une auto-décharge plus importante que celles au calcium.

Ensuite, Les batteries se distinguent entre-elles par leur construction mécanique.

1.3.2. La batterie de démarrage à plaques planes

C'est la batterie qui est utilisée dans toutes les voitures. Capables de délivrer très brièvement de fortes intensités, elle supporte mal les décharges profondes.

1.3.3. La batterie semi-stationnaire à plaques planes

Les plaques de ces batteries sont plus épaisses et les séparateurs sont de meilleure qualité pour éviter des déformations lors d'une utilisation en cyclage. Elle supporte mieux les cyclages.

1.3.4. La batterie stationnaire

C'est une batterie à plaques tubulaires. Elle sert par exemple sur les chariots élévateurs, où elle est déchargée chaque jour de 60-80% puis rechargée pendant la nuit : c'est l'exemple type d'une utilisation en cyclage.

Cette batterie doit être chargée avec une tension relativement élevée, selon la durée disponible. Cette tension élevée est surtout nécessaire pour éviter la stratification de l'électrolyte. L'acide sulfurique (H_2SO_4) qui se forme lors de la charge a en effet tendance à descendre au fond de la batterie et l'électrolyte y deviendra beaucoup plus acide que dans le haut. Lorsque la tension de gazage est atteinte, l'on poursuit la charge avec un courant et une tension élevés. La formation de bulles de gaz ainsi obtenue met l'électrolyte en circulation et rend son mélange homogène.

Ce procédé est d'autant plus indispensable que les batteries à plaques tubulaires sont généralement très hautes.

1.3.5. La batterie étanche à électrolyte gélifié (VRLA)

Ici l'électrolyte est immobilisé sous forme de gel. L'une des plus connues est la batterie Dryfit de Sonnenschein.

Les gaz qui se dégagent lors de la charge sont recombinaisonnés en électrolyte, ils ne s'échappent donc pas de la batterie sauf si pendant la phase de gazage le courant de charge est trop important pour permettre une recombinaison complète. Dans ce cas les gaz sont évacués par une soupape de sécurité, d'où l'abréviation anglaise VRLA pour désigner ce type de batterie : (Valve Regulated Lead Acid).

1.3.6. La batterie étanche (VRLA) AGM

AGM est l'abréviation anglaise de Absorbed Glas Mat (fibre de verre absorbante). Dans cette batterie l'électrolyte est retenu ('absorbé') dans un séparateur en fibre de verre entre les plaques. Dans une batterie AGM les porteurs de charge - ions d'hydrogène (H₂) et de sulfate (SO₄) se déplacent plus facilement que dans une batterie au gel. C'est pourquoi une batterie AGM est plus à même de délivrer des courants instantanés très élevés qu'une batterie à électrolyte gélifié.

1.3.7. La batterie étanche à éléments enroulés

Connue sous la marque Optima. Il s'agit d'une variante de la batterie VRLA AGM dans laquelle chaque élément est constitué d'une plaque négative et d'une plaque positive enroulées, ce qui permet d'obtenir une grande résistance mécanique et une résistance électrique réduite.

1.4. L'utilisation de la batterie.

Dans un système électrique autonome, la batterie sert de tampon entre les producteurs d'énergie (chargeur, générateur, panneau solaire, alternateur) et les utilisations. En pratique ceci signifie que la batterie est utilisée en cyclage, et ce dans une variante très spéciale "irrégulière", contrairement par exemple à un chariot élévateur.

Sur un bateau de plaisance, par exemple, les situations suivantes peuvent se produire :

- Le bateau marche à la voile ou est au mouillage dans une belle crique. L'équipage ne veut pas de bruit et toute l'énergie utilisée à bord est puisée dans la batterie. Une ou deux fois par jour, l'on démarre le groupe pour recharger en quelques heures (le moins possible pour des raisons de confort) la batterie de service afin de permettre une nouvelle période de silence. C'est un usage cyclique, dans lequel le temps de charge est bien trop court pour une bonne recharge de la batterie.
- Le bateau marche à la voile ou est au mouillage dans une belle crique. Un ou plusieurs générateurs Stirling fournissent en silence l'énergie moyenne nécessaire à bord, s'il le faut 24 heures par jour. La batterie de service reste parfaitement chargée, et n'est sollicitée que pour faire face à quelques pointes de consommation.
- Le bateau marche pendant de nombreuses heures au moteur. Les alternateurs du moteur assurent une charge convenable de la batterie.
- Le bateau est au port. Le chargeur est alimenté par la borne au quai et la batterie est maintenue chargée 24 heures sur 24.

Le nombre de cycles annuels, la profondeur de décharge, la température ambiante et un grand nombre d'autres facteurs déterminants pour la durée de vie de la batterie diffèrent sur chaque bateau.

Nous allons voir de plus près les principaux facteurs déterminants qui influencent le choix et la durée de vie de la batterie.

1.5. La batterie plomb-acide dans la pratique

1.5.1. Combien coûte une batterie ?

Nous ne donnons ici qu'une estimation très approximative. À côté de toutes les considérations de qualité et d'utilisation, le coût a son importance.

Type de batterie	Utilisation	Tensions, capacités et contenus énergétiques les plus fréquents			Prix indicatif H.T.	Prix indicatif par kWh
		V	Ah	KWh		
Démarrage	Démarrage	12	100	1,2	600	500
Optima "Bluetop"	Service (propulseur d'étrave, winches)	12	60	0,72	1350	1875
Semi-traction	Batterie de service jusqu'à environ 1000 Ah	12	200	2,4	1800	750
Traction (plaques tubulaires)	Traction électrique	24	1000	24	24000	1000
VRLA gélifiée Sonnenschein Dryfit A200	Batterie de service jusqu'à environ 600 Ah	12	200	2,4	2700	1125
VRLA gélifiée Sonnenschein Dryfit A600	Batterie de service jusqu'à environ 1500 Ah	24	1500	36	60000	1667
VRLA-AGM GNB Champion	Batterie de service jusqu'à environ 600 Ah	12	200	2,4	3600	1500
VRLA-AGM GNB Absolyte	Batterie de service jusqu'à environ 6000 Ah	24	1500	36	75.000	2083

Le tableau montre que les coûts sont très différents selon le type de Batterie, et notamment que les batteries ouvertes sont moins chères que les batteries étanches.

Les batteries étanches ont cependant l'avantage d'un grand confort d'utilisation :

- Elles sont sans entretien
- Elles n'émettent pas de gaz dangereux (sauf incident)
- Elles peuvent donc s'installer dans des endroits difficilement accessibles.

Par contre, les batteries étanches sont plus sensibles aux surcharges, qui provoquent des pertes d'eau. Aucune remise à niveau n'étant possible, ces pertes entraînent des pertes de performances irrémédiables et un vieillissement prématuré.

Des batteries ouvertes modernes à plaques planes et à faible teneur en antimoine (1,5% environ) dégagent si peu qu'un complément d'eau 2 ou 3 fois par an sera suffisant.

1.5.2. Dimensions et poids

Type de batterie	V	Ah	kWh	Volume dm ³	Poids Kg	Volume spécifique Wh/dm ³	Poids spécifique Wh/kg
Démarrage	12	100	1,2	16	28	75	43
Optima "bluetop"	12	60	0,72	8,5	20,6	81	35
Semi-traction	12	200	2,4	33	60	73	40
Traction (plaques tubulaires)	24	1000	24	280	770	85	32
VRLA gélifiée Sonnenschein Dryfit A200	12	200	2,4	33	70	72	34
VRLA gélifiée Sonnenschein Dryfit A600	24	1500	36	600	1440	60	25
VRLA-AGM GNB Champion	12	200	2,4	24	61	100	39
VRLA- AGM GNB Absolyte	24	1500	36	600*	1360*	60	26,5

* Châssis inclus

Par rapport à l'énergie produite par exemple par la combustion de gazole, les batteries sont loin du compte. La combustion de 10 litres (8,4kg) de gazole donne environ 100kWh d'énergie thermique. Un groupe électrogène avec un rendement de 20% (c'est le rendement d'un groupe de 8kW, les groupes de puissance inférieure sont encore moins performants) pourra donc produire 20kW d'énergie électrique avec 10 litres de gazole.

Une batterie de cette capacité pèse 800 kg et a un volume de 330 dm³!

Un autre exemple parlant est de faire chauffer de l'eau. Pour faire bouillir 1 litre d'eau dans une bouilloire électrique il faut environ 1kWh, c'est l'énergie que peut donner une batterie de 4kg !

1.5.3 Vieillessement prématuré 1 : décharge trop profonde de la batterie.

Une batterie vieillira d'autant plus vite qu'elle sera déchargée profondément, et si une certaine limite est dépassée (environ 80% pour des batteries de bonne qualité) ce vieillissement s'accélère de manière disproportionnée. Si en plus la batterie est laissée en état de décharge -même partielle- plus ou moins longtemps, un phénomène de « sulfatage » des plaques interviendra rapidement : une couche impénétrable de cristaux de sulfate de plomb se dépose sur les plaques positives qui ne pourront plus absorber de courant. La batterie est devenue inutilisable.

Le tableau suivant donne le nombre de cycles décharge-recharge que peuvent supporter les différents types de batteries. L'on considère que les batteries sont en fin de vie lorsque leur capacité est réduite à 80% de la capacité nominale. Le nombre maximal de cycles de décharge possible dépend fortement de la profondeur de décharge.

(DoD en Anglais : **D**epth **O**f **D**ischarge)

Type de batterie	Nombre de cycles		Réaction à une décharge à 100%	Durée de vie en utilisation floating à 20°C de température ambiante
	DOD 80%	DOD 60%		
Démarrage	Pas utilisable en cyclage			5
Optima "bluetop"	400	650	Sulfatage irrémédiable en quelques jours	10
Semi-traction	200	350	Sulfatage irrémédiable en quelques jours	5
Traction (plaques tubulaires)	1500	2500	Supporte jusqu'à 1 mois en état de décharge	10
VRLA gélifiée Sonnenschein Dryfit A200	250	450	Supporte 1 mois en état de décharge	4 – 5
VRLA gélifiée Sonnenschein Dryfit A600	600	900	Supporte 1 mois en état de décharge	15 – 18
VRLA-AGM GNB Champion	350	600	Supporte jusqu'à 1 mois en état de décharge	7
VRLA- AGM GNB Absolyte	1200	2200	Supporte jusqu'à 3 mois en état de court-circuit	20 (à 25°C)

Il est clair que des batteries ne doivent jamais être déchargées complètement et encore moins rester déchargées. A noter aussi que la tension d'une batterie en utilisation n'est pas un bon indicateur de son niveau de décharge, elle est trop influencée par d'autres facteurs comme l'intensité de décharge et la température. La tension ne chutera rapidement que lorsque la batterie arrive en fin de décharge (DOD de 80% et plus) et ce sera déjà trop tard. C'est pourquoi l'utilisation d'un moniteur de batterie (voir chapitre 3) est vivement recommandée pour une bonne gestion des bancs de batteries, surtout lorsque ceux-ci sont importants et donc coûteux.

De ce qui précède l'on comprend aussi que les batteries ont une performance bien inférieure à ce qu'il n'y paraît, car en fait l'on ne peut pas disposer -et de loin- de leur capacité nominale.

1.5.4. Capacité effective en décharge rapide

En cas de décharge rapide, une partie seulement de la capacité nominale d'une batterie sera libérée. Ceci est dû à la lenteur relative du processus chimique qui se déroule à l'intérieur de la batterie. La capacité nominale d'une batterie est en général donnée pour une décharge en 20 heures (C20).

Pour une batterie de 200Ah, ceci signifie qu'elle accepte un courant de décharge de 10 ampères seulement (= 200Ah en 20 heures)

Avec un courant de décharge de 100A la même batterie sera « à plat » beaucoup plus rapidement. Une batterie à électrolyte gélifié de 200Ah par exemple aura alors une capacité utilisable de seulement 100Ah et sera donc déchargée en 1 heure. (Pour une approche mathématique, voir § 3.5 : la formule de Peukert)

Les tableaux suivants donnent une indication de la capacité utile en fonction du courant de décharge. La deuxième colonne du premier tableau donne la capacité nominale telle qu'elle est indiquée par le constructeur, avec la durée de décharge correspondante. Elle est souvent de 20 heures, mais l'on voit aussi 10 ou 5 heures (donc un courant de décharge plus élevé).

Il ressort clairement que la capacité disponible diminue fortement en cas de courants de décharge élevés, et que les performances des batteries AGM (Optima et GNB) sont dans ce cas supérieures à celles des batteries à électrolyte gélifié.

Type de batterie	Courant de décharge	Capacité nominale et durée de décharge correspondante	Durée de décharge	Courant de décharge	Capacité effective 1.83V/élément		Durée de décharge
					Ah	%	
	A		heures	A(C/5)			heures
Démarrage	5	100Ah/20h	20				
Optima "bluetop"	3	60Ah/20h	20	12	52	87	4,3
Semi-traction	10	200Ah/20h	20	40	164	82	4,1
Traction (plaques tubulaires)	200	1000Ah/5h	5	200	1000	100	5
VRLA gélifiée Sonnenschein Dryfit A200	10	200Ah/20h	20	40	160	80	4
VRLA gélifiée Sonnenschein Dryfit A600	150	1500Ah/10h	10	300	900	60	3
VRLA-AGM GNB Champion	10	200Ah/20h	20	40	170	85	4,25
VRLA- AGM GNB Absolyte	150	1500Ah/10h	10	300	1200	80	4

Type de batterie	Courant de décharge	Capacité effective 1.83V/élément		Durée de décharge	Courant de décharge	Capacité effective 1.75V/élément		Durée de décharge
		Ah	%			Minutes	A(C/1)	
Démarrage								
Optima "bluetop"	30	43	72	85	60	40	67	40
Semi-traction	100	110	55	66	200	90	45	27
Traction (plaques tubulaires)	500	700	70	80	1000	400	40	24
VRLA gélifiée Sonnenschein Dryfit A200	100	100	50	60	200	70	35	20
VRLA gélifiée Sonnenschein Dryfit A600	750	375	25	15	1500	0*	0	0*
VRLA-AGM GNB Champion	100	117	58	70	200	100	50	30
VRLA-AGM GNB Absolyte	750	560	37	45	1500	250	17	10

* Sur un courant de décharge de 1500A (C/1) la tension d'une batterie A600 chute presque immédiatement à 1,65V/élément (soit 9,9V ou 19,8V pour des batteries de 12 ou 24V)

Le courant de décharge est en général exprimé comme fraction de la capacité nominale. Pour une batterie de 200Ah par exemple, C/5 signifie un courant de 40A (=200Ah/5)

1.5.5. Capacité et température

La capacité effective d'une batterie varie en proportion inverse à la température.

Capacité effective en % de la capacité nominale (valeurs indicatives) :

-10°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C
80%	92%	95%	100%	103%	105%

1.5.6. Vieillesse prématuré 2 : charge trop rapide et incomplète.

Les batteries profondément déchargées peuvent absorber de forts courants jusqu'à ce que la tension de gazage soit atteinte. Bien que sans effets mesurables immédiats, les recharges « musclées » ont bel et bien une influence négative sur la durée de vie de la plupart des batteries. Il est généralement conseillé de limiter l'intensité de charge à C/5 soit un cinquième ou 20% de la capacité nominale. Si une batterie est chargée à une intensité supérieure à C/2, sa température va augmenter dangereusement. Une compensation de la tension de charge par sonde de température est alors indispensable (voir § 1.5.9)

Le confort à bord étant prédominant, un groupe électrogène sur un bateau au mouillage ou marchant à la voile sera limité à tout au plus 2 ou 4 heures de fonctionnement par jour.

Un exemple:

Prenons un voilier de 50 pieds avec une batterie de service de 800Ah en 24 Volts. Le courant de recharge ne devra donc pas dépasser $C/5 = 160A$, ce qui permet de charger 320A en 2 heures. Si la consommation par ailleurs à bord est de 15A, le groupe avec son redresseur devra fournir 175A. Pendant les 22 heures restantes de la journée, une consommation moyenne de $320A/22h = 14,5A$ sera possible, ce qui signifie une décharge de seulement $320/800 = 40\%$. Cela paraît peu, mais c'est malheureusement le maximum qui pourra être atteint si le fonctionnement du groupe est limité à 2 heures. En effet de cette manière et dans le meilleur des cas la batterie ne sera chargée qu'à environ 85% de sa capacité nominale (au-delà la tension augmente, le courant diminue et les 15% manquants sont très longs à charger) et déchargée à environ 45%. Une décharge plus profonde et une recharge plus rapide réduiraient considérablement la durée de vie de la batterie.

Dans cet exemple donc la batterie est utilisée en état de charge partielle (entre 45 et 85% DOD).

Des batteries à électrolyte liquide ne supporteront cet état que durant une trentaine de cycles car l'électrolyte se stratifie : l'acide se concentre dans le fond du bac et se raréfie dans le haut. Les batteries AGM et à électrolyte gélifié résisteront plus longtemps, l'électrolyte étant immobilisé dans des séparateurs.

Une fois encore, un fonctionnement prolongé à ce régime accélère le vieillissement ! Les batteries à électrolyte liquide devront être parfaitement rechargées au moins une fois tous les 15 cycles (le gazage de l'électrolyte mélange l'acide qu'il contient), les batteries étanches au moins une fois tous les 30 cycles.

La vraie bonne solution serait un générateur « discret » qui peut tourner sans limitation de durée. Voir chapitre 5 : le WhisperGen.

1.5.7. Vieillesse prématuré 3 : charge incomplète.

Une charge de batterie correcte s'effectue en trois étapes :

La première étape d'un cycle de charge complet est la charge "vrac" (*bulk* en anglais). Le chargeur fonctionne à sa puissance maximale (l'étape " I " de la courbe de charge). La batterie va être ainsi chargée à environ 80% de sa capacité nominale, elle atteint alors la tension maximale du chargeur.

La deuxième étape est l'étape d'absorption -*boost* en anglais-, dans laquelle le chargeur fonctionne en tension constante et est donc limité en courant. Ce courant va diminuer progressivement pour devenir presque nul, la batterie est alors chargée à 100%. La plupart des chargeurs sont programmés pour fonctionner en absorption pendant 4 heures.

La tension est alors diminuée et l'on a atteint l'étape de charge finale, dite d'entretien ou floating. Son seul but est de maintenir la batterie parfaitement chargée.

La courbe IU.U décrite ci-dessus convient en général pour les batteries ouvertes ou étanches à plaques planes.

Il apparaît donc que la charge complète d'une batterie prend beaucoup de temps. D'abord de 2 à 4 heures de charge vrac, puis 4 heures de charge d'absorption, donc généralement jamais moins de 6 heures.

Si une batterie n'est pas parfaitement chargée au moins une fois par mois, elle perdra rapidement (et définitivement) de sa capacité. Avec les décharges excessives, les charges incomplètes sont les principales causes de vieillissement prématuré d'une batterie de service.

Le plus souvent le manque de temps, une recherche de confort ou une mauvaise conception du système de charge sont à l'origine de ces erreurs. Dans le chapitre 3, la conception du système de charge sera évoquée pas à pas, y compris toutes les erreurs possibles.

1.5.8. Vieillessement prématuré 4 : surcharge

Les excès de charge ou surcharges sont dans l'ordre la troisième cause de vieillissement prématuré d'une batterie. Sur des batteries ouvertes, les dégâts sont souvent limités par la possibilité de remettre à niveau l'eau perdue par un gazage trop fort, la corrosion accélérée des plaques positives est par contre irrémédiable. Le remplissage de batteries étanches étant impossible, celles-ci sont donc beaucoup plus sensibles aux surcharges. Parmi les causes de surcharges fréquentes figurent l'absence de compensation de température ou la charge simultanée de batteries différentes à l'aide de diodes d'isolement. (voir chapitre 3)

1.5.9. Vieillessement prématuré 5 : température

La température d'une batterie peut fortement varier pour diverses raisons :

- Décharge et charge rapide. La résistance interne fait chauffer la batterie. La chaleur augmente avec le carré du courant ($P=RI^2$).
- L'emplacement de la batterie. Dans un bateau près du moteur il fait souvent 40°C ou plus. Dans un véhicule routier, la température peut varier de -20 à +50°C.

Une température de fonctionnement moyenne élevée provoque un vieillissement accéléré car elle accélère le processus de décomposition chimique dans la batterie. Les constructeurs donnent en général une durée de vie à 20°C. La durée de vie d'une batterie diminue de moitié pour chaque 10°C d'élévation de température.

Le tableau ci-dessous donne une idée de la durée de vie à différentes températures.

Type de batterie	Durée de vie en utilisation floating (années)		
	20°C	25°C	30°C
Démarrage	5	3,6	2,5
Optima "bluetop"	10	7	5
Semi-traction	5	3,6	2,5
Traction (plaques tubulaires)	10	7	5
VRLA gélifiée Sonnenschein Dryfit A200	5	3,6	2,5
VRLA gélifiée Sonnenschein Dryfit A600	16	11	8
VRLA-AGM GNB Champion	7	5	3,5
VRLA- AGM GNB Absolyte		20	14

La température joue également un rôle important lors de la charge. La tension de gazage et avec elle les tensions idéales boost et float sont inversement proportionnelles à la température de la batterie.

Ceci implique qu'avec des tensions fixes, une batterie froide sera insuffisamment chargée et une batterie chaude le sera trop. Les deux cas sont dommageables à la batterie, et sur une batterie trop chaude il peut même se produire un « emballement thermique ». L'abaissement de la tension de gazage fera augmenter le courant de charge boost et floating provoquant une élévation de température supplémentaire, et ainsi de suite. L'emballement thermique détruit rapidement une batterie (les gaz font sortir les masses actives de plaques), et de sérieux risques d'explosion sont provoqués par les dégazages et d'éventuels de court-circuits internes.

Les constructeurs donnent généralement des tensions de charge pour une température de 20°C, qui peuvent raisonnablement être appliquées entre 15 et 25°C.

C'est rarement une réalité dans le cas de batteries de service et il faudra impérativement appliquer une compensation de température.

Lorsque par exemple un constructeur prescrit une tension de floating de 27,6V à 20°C, celle-ci devra être réduite à 27V –soit de 0,6V ou 2%- si la température est de 30°C.

Des écarts de plus de 1% de la bonne tension de charge entraînent de fortes réductions de durée de vie (jusqu'à 30% selon certaines études !), surtout lorsque la température est trop basse et que la batterie est donc mal chargée, ce qui provoque un sulfatage des plaques.

1.5.10. L'autodécharge

Même au repos, une batterie se décharge lentement. Cette autodécharge varie selon le type de batterie et la température :

Type de batterie	Alliage	Autodécharge par mois à 20°C	Autodécharge par mois à 10°C
Démarrage	Antimoine (1,5%)	6%	3%
Optima "bluetop"		4%	2%
Semi-traction	Antimoine (1,5%)	6%	3%
Traction (plaques tubulaires)	Antimoine (5%)	12%	6%
VRLA gélifiée Sonnenschein Dryfit A200	Calcium	2%	1%
VRLA gélifiée Sonnenschein Dryfit A600	Calcium	2%	1%
VRLA-AGM GNB Champion	Plaques Positives: Antimoine Plaques négatives: Calcium	3%	1,5%
VRLA- AGM GNB Absolyte	Plaques Positives: Antimoine Plaques négatives: Calcium	3%	1,5%

Les batteries ouvertes au plomb-antimoine doivent être rechargées au plus tard après 6 mois de non-utilisation, sauf si la température ambiante est très basse.

Les batteries étanches supportent une période d'inactivité de 6 à 8 mois (la saison d'hivernage en Europe du Nord) sans recharge. Il est toutefois important de déconnecter les batteries pour éviter les courants de fuite qui pourraient exister dans le réseau de bord.

Chapitre 2

Les caractéristiques de charge

Des généralités sur la charge des batteries plomb-acide figuraient déjà au chapitre 1. Nous allons ici approfondir les techniques de charge.

2.1. Charge à courbe IU·U

2.1.1. Étape I : Bulk ("vrac")

C'est l'étape limitée en intensité (appelée " Bulk " en anglais). Pour la plupart des batteries, il est recommandé de limiter l'intensité - et donc la puissance du chargeur - à C/5, soit 20% de la capacité nominale de la batterie. Par exemple 200A pour une batterie de 1000A.

Ainsi chaque heure de charge apportera 20% de sa capacité nominale à la batterie. Une batterie déchargée à 60% (DOD 60%) acceptera une intensité de charge de C/5 pendant environ 2 heures. Elle donc chargée à 80%, sa tension de gazage est alors presque atteinte et elle n'acceptera plus la totalité du courant proposé. Une intensité de charge supérieure à C/5 fera de sorte que la tension de gazage sera atteinte plus rapidement et la batterie limitera d'elle-même l'intensité. En d'autres termes, une intensité de charge plus élevée ne permettra pas de vraiment réduire la durée de charge.

Pendant cette première étape, la tension de la batterie passera de 12,6V à environ 13,8V (respectivement 25,2V et 27,6V pour une batterie de 24V).

2.1.2. Étape U^o : Absorption (boost)

Dans cette étape la tension est limitée et l'intensité diminue progressivement. Idéalement, l'intensité de charge devrait être mesurée pendant cette étape permettant ainsi de passer automatiquement à l'étape d'égalisation ou dans certains cas à une seconde étape à intensité constante. Or dans la pratique l'intensité n'est pas mesurée et la durée de l'étape d'absorption est fixée à 4 heures. L'inconvénient de cette durée fixe est qu'elle n'est pas toujours adaptée à la nature de la décharge qui a précédé : elle devrait être plus courte après une décharge rapide et limitée et au contraire plus longue après une décharge lente et profonde.

La tension pendant cette phase du processus de recharge est d'environ 2,4V par élément, soit 14,4V pour une batterie 12V et 28,8V dans un système 24V. Cette tension relativement élevée est nécessaire pour charger la batterie à 100%, il faut en effet "forcer" un peu pour y parvenir.

Selon le type de batterie, cette tension devra être adaptée avec précision, une batterie à plaques tubulaires par exemple aura besoin d'une tension nettement supérieure. Un bon chargeur permet ce type de réglages essentiels. S'agissant souvent de quelques dixièmes de volts, l'importance d'une correction en fonction de la température se confirme également.

2.1.3. Étape U : Égalisation (float)

La batterie est maintenue à une tension constante - le plus souvent 2,3V/élément à 20°C - et un courant très faible assure le maintien de la charge à 100%. La tension d'égalisation ne devra pas dévier de plus de 1% de celle prescrite par le constructeur de la batterie, après compensation de température. Une tension d'égalisation trop élevée mènera à un vieillissement accéléré par oxydation des plaques positives. Une tension au

contraire trop basse entraînera un phénomène de sulfatage. Une déviation de 2% (0,3V pour un système en 12V ou 0,6V pour 24V) peut réduire de 30% la durée de vie d'une batterie !

Comme le montre le tableau suivant, c'est surtout au cours de l'étape d'absorption que les paramètres diffèrent selon les différents types de batteries retenus.

Caractéristiques IU-U recommandées :

Type de batterie	Alliage	Étape d'absorption à 20°C	Étape d'égalisation à 20°C
Démarrage	Antimoine (1,5%)	4h à 2,4V/élément	2,25V/élément*
Optima "bluetop"		16h à 2,45V/élément	2,25V/élément
Semi-traction	Antimoine (1,5%)	8h à 2,44V/élément	2,25V/élément
Traction (plaques tubulaires)	Antimoine (5%)	12h à 2,44V/élément	2,25V/élément
VRLA gélifiée Sonnenschein Dryfit A200	Calcium	4h à 2,4V/élément	2,3V/élément
VRLA gélifiée Sonnenschein Dryfit A600	Calcium	4h à 2,34V/élément	2,25 V/élément
VRLA-AGM GNB Champion	Plaques Positives: Antimoine Plaques négatives: Calcium	4h à 2,35V/élément	2,25V/élément
VRLA- AGM GNB Absolyte	Plaques Positives: Antimoine Plaques négatives: Calcium	4h à 2,35V/élément	2,25V/élément

- Dans l'automobile l'on utilise une tension moyenne de 2,33V/élément (14V pour un système 12V), sans étape d'absorption.

2.1.4. La compensation de température.

Bien que légèrement différentes par constructeur, la moyenne généralement admise est de 5mV par élément et par degré C. Il convient donc de baisser la tension de 30mV par degré pour une batterie de 12V ou de 60mV par degré pour une batterie de 24V.

Chapitre 3

La surveillance de l'état de charge de la batterie Le moniteur de batterie

3.1. Les différentes méthodes pour mesurer l'état de charge d'une batterie.

3.1.1. Le poids de l'électrolyte.

Comme nous l'avons dit plus haut, l'électrolyte est un mélange composé d'eau et d'acide sulfurique (H_2SO_4). Dans une batterie chargée la masse active des plaques positives est composée d'oxyde de plomb (PbO_2) et celle des plaques négatives de plomb poreux et spongieux (Pb). L'électrolyte est alors riche en acide sulfurique et son poids spécifique est élevé.

Lors de la décharge la masse active des plaques se transforme en sulfate de plomb ($PbSO_4$) en prélevant l'acide sulfurique contenu dans l'électrolyte. Avec la diminution de sa teneur en acide le poids spécifique de l'électrolyte diminue aussi.

Au cours de la décharge l'état de la batterie se vérifie assez bien en mesurant le poids spécifique de l'électrolyte, comme le montre le tableau ci-dessous :

État de charge approximatif	Poids spécifique moyen	Tension au repos
100%	1.265 +	12.65 +
75%	1.225	12.45
50%	1.190	12.24
25%	1.155	12.06
0%	1.120	11.89

Lors de la charge le processus s'inverse et l'acide sulfurique est à nouveau libéré. L'acide étant plus lourd que l'eau, il aura donc tendance -dans une batterie à électrolyte liquide seulement- à "couler" et fera augmenter l'acidité de l'électrolyte dans le fond de la batterie. L'électrolyte dans le haut de la batterie ne se modifiera que lorsque la phase de gazage est atteinte, les bulles de gaz assurant alors le mélange de l'acide et de l'eau.

Cette phase n'étant atteinte qu'après plusieurs heures, toute mesure du poids spécifique de l'électrolyte durant la charge d'une batterie donnera donc des valeurs beaucoup trop basses, ainsi ce n'est qu'à la fin du cycle de charge que le pèse-acide donnera une bonne indication sur l'état de charge réel de la batterie.

3.1.2. La tension

La tension de la batterie aussi peut donner une indication sur son état de charge, voir également le tableau ci-dessus. Il est important de savoir qu'une mesure de tension ne sera significative que sur une batterie au repos, donc après quelques heures sans sollicitation dans un sens ou dans l'autre.

3.1.3. Le compteur d'ampères

C'est le moyen le plus précis et le plus pratique pour suivre l'état de charge d'une batterie. Le Moniteur de batterie a été conçu à cet effet, il sera décrit en détail dans les paragraphes suivants.

3.2. Le moniteur de batterie est un compteur d'ampères

La principale fonction d'un moniteur de batterie est de suivre et d'indiquer l'état de charge. Les courants entrant et sortant de la batterie sont mesurés à l'aide d'un shunt et ainsi le nombre d'ampères-heures est enregistré.

3.3. Rendement énergétique d'une batterie

Des pertes surviennent lors de la charge et de la décharge d'une batterie : la quantité totale d'énergie absorbée pendant la charge est d'environ 20% supérieure à celle qui sera restituée lors de la décharge. La perte provient essentiellement du fait que lors de la charge la tension est plus élevée que pendant la décharge. Les batteries à faible gazage, comme les modèles Absolyte de GNB, ont le meilleur rendement.

La plupart des moniteurs de batterie ne prennent en compte que le courant et le temps (=Ah) et non pas l'énergie (courant x tension x temps = kWh). Or nous avons vu que le courant et l'état de charge sont aussi des facteurs importants dont la tension en est un dérivé.

3.4. Un bon moniteur de batterie prend en compte le rendement en Coulomb.

Le rendement en courant ou Coulomb (facteur d'efficacité de charge) d'une batterie est beaucoup plus élevé (env. 96%) que son rendement énergétique. Sur un bon moniteur de batterie ce rendement en courant est paramétrable selon les données du constructeur de la batterie.

Un rendement en Coulomb de 96% signifie que pour recharger complètement une batterie il faudra 4% plus d'Ah que l'on en a sorti au cours de la décharge.

Le rendement en Coulomb d'une batterie avoisine les 100% tant qu'il n'y a pas de gazage, avec ou sans recombinaison. Le gazage signifie qu'une partie du courant de charge fourni n'est pas transformé en énergie chimique. Lorsque l'on recharge une batterie de 40% à seulement 80% de sa capacité, le nombre d'ampères heures nécessaire sera pratiquement identique à celui prélevé lors de la décharge. Ce n'est qu'au cours de la dernière phase de charge, lorsque la tension de gazage est atteinte, que les pertes de Coulomb surviennent et qu'il faudra donc fournir plus d'Ah.

L'importance des pertes, et donc le rendement en Coulomb, dépend de plusieurs facteurs :

- A. Le type de batterie
Pour être complètement chargées, les batteries ouvertes doivent être tenues en phase de gazage plus longtemps que les batteries VRLA.
- B. La façon dont la batterie est utilisée.
Si une batterie est essentiellement utilisée en état de décharge partielle (voir § 1.4.6) et n'est rechargée à 100% qu'occasionnellement, son rendement en Coulomb sera supérieur à ce qu'il serait en cas de recharge totale après chaque décharge.
Les charges à courant élevé favorisent le gazage et feront diminuer le rendement en Coulomb.

Ces facteurs n'étant pas souvent faciles à appréhender, il est conseillé de paramétrer le rendement de Coulomb d'un moniteur à 96% et de l'ajuster ensuite en fonction de la pratique.

3.5. Un bon moniteur de batterie tient compte du fait qu'une décharge rapide réduit la capacité disponible.

Ce phénomène a été décrit au § 1.3.4 pourra être paramétré dans un moniteur de batterie à l'aide du facteur de Peukert.

Peukert a établi qu'au cours d'une décharge complète le rapport entre le courant de décharge I et sa durée t s'exprime par la formule suivante :

$$C_p = I^n \times t$$

Dans cette formule C_p est une constante (dite Capacité de Peukert) et n est l'exposant de Peukert. Cet exposant est toujours supérieur à 1. Plus n sera élevé, moins la batterie sera performante en cas de forts courants de décharge.

Des mesures sur une batterie ou ses courbes de décharge permettent de calculer l'exposant de Peukert, en mesurant ou en relevant les durées de décharge t_1 et t_2 obtenues sur deux courants de décharge I_1 et I_2 très différents.

La formule :

$$C_p = I_1^n \times t_1 = I_2^n \times t_2$$

Permet le calcul de n :

$$n = \log(t_2 / t_1) / \log(I_1 / I_2)$$

La capacité ne "disparaît" pas :

Au § 1.4.4 nous avons l'exemple d'une batterie avec une capacité en 20 heures de 200Ah, soit $C_{20} = 200$ Ah à un courant correspondant soit :

$$I_{20} = C_{20} / 20 = 10 \text{ A}$$

Avec un courant de décharge de 100A la batterie était vide en 1h, soit $C_1 = 100$ Ah.

Ceci ne signifie pas qu'avec un courant de décharge de 100A une part de capacité de 100Ah ($C_{20} - C_1$) a "disparu", mais seulement que le processus chimique se déroule trop lentement et que la tension de la batterie descend trop vite. La batterie de notre exemple, déchargée en 1 heure avec un courant de 100A sera à l'inverse pratiquement rechargée avec 100Ah, alors que déchargée à C_{20} il faudra 200Ah pour la recharger.

Chapitre 4

La charge de batteries avec un alternateur ou un chargeur

4.1. L'alternateur

Les alternateurs sont généralement équipés d'un régulateur intégré avec compensation de température. La température est mesurée dans le régulateur lui-même, car l'on part ici de la situation qui existe dans les voitures où la température de la batterie sera sensiblement identique à celle du régulateur, les deux se trouvant dans le même compartiment moteur.

Par ailleurs dans une voiture la batterie sera presque toujours complètement chargée, car elle n'est sollicitée que brièvement pour démarrer le moteur. Une fois le moteur en route et même au ralenti, la puissance de l'alternateur est suffisante pour fournir tous les consommateurs à bord et pour recharger la batterie rapidement.

La batterie n'étant jamais déchargée profondément (sauf incident) et les temps de recharge étant généralement longs, l'étape de charge d'absorption (boost) n'est pas nécessaire. L'alternateur fournit un courant de charge qui dépendra de son régime de rotation jusqu'à ce que la tension d'égalisation pré-établie soit atteinte. Alors l'alternateur passe directement en charge à tension constante. Généralement cette tension est établie à 2,33V/élément, soit 14V pour les systèmes en 12V ou 28V pour ceux en 24V. Cette méthode de charge convient parfaitement, mais sous certaines conditions :

- la batterie est une batterie de démarrage à plaques planes
- la batterie est peu déchargée
- l'écart de température entre la batterie et l'alternateur est faible
- la chute de tension entre l'alternateur et la batterie est négligeable (inférieure à 0,1V)

Inévitablement, l'on rencontrera des problèmes dès que ces conditions ne sont plus remplies, et ce sera toujours le cas à bord de bateaux ou plus généralement dès que l'on parle d'applications autres que celles des voitures.

Dans les paragraphes suivants nous abordons la charge de batteries à bord de bateaux.

4.2. Utilisation de l'alternateur pour recharger une batterie de démarrage et une batterie de service.

Cette utilisation est commune sur les bateaux de petite taille.

Pour être certain de pouvoir toujours démarrer le moteur, tous les accessoires du bord (instruments, éclairage, pilote, réfrigérateur...) sont raccordés sur une batterie indépendante, la batterie dite de service.

La batterie de démarrage est ainsi exclusivement affectée au démarrage du moteur et ne doit jamais être déchargée. Chargées par un seul et même alternateur, les batteries sont isolées entre-elles par un relais ou un répartiteur à diodes, ou encore, dans des configurations plus importantes, l'on utilisera deux alternateurs.

Important : l'utilisation d'un relais (Bosch 80A ou similaire) qui couple automatiquement les batteries lorsque le moteur tourne et qui les isole dès son arrêt ne pourra être utilisé que dans des systèmes comprenant des batteries de faible capacité (environ 100Ah) et un alternateur standard (environ 60A).

Dans des configurations plus puissantes les contacts du relais risqueraient de se coller sous l'effet d'étincelles et les batteries ne seront plus isolées.

Lorsque, comme c'est généralement le cas sur des unités de petite taille, un alternateur standard issu de l'industrie automobile est employé, les problèmes suivants pourront être rencontrés :

- Sur un bateau les câbles reliant l'alternateur aux batteries sont généralement plus longs, il y aura donc une chute de tension plus ou moins importante. (il y aura par exemple une chute de tension de 0,5V dans un câble de 10mm² sous 50A)
- Les répartiteurs de charge provoqueront eux-aussi une chute de tension : de 0,4 à 0,8V pour des répartiteurs à diodes et de 0,1 à 0,2V pour des répartiteurs plus sophistiqués à transistors à effet de champ (FET)
- Au moment du démarrage du moteur la batterie de service sera en général fortement voire totalement déchargée et aura besoin d'une charge à tension boost élevée. (voir caractéristiques de charges au chapitre 2).
- Tout au contraire, la batterie de démarrage n'est presque pas déchargée et ne nécessite pas de charge boost.
- Dans le compartiment moteur, l'alternateur mesure une température de 40°C ou plus, alors que les batteries placées ailleurs dans le bateau sont froides, par exemple à 20°C. La compensation intégrée de l'alternateur va réduire la tension de charge d'environ 0,6V sur un système 12V.

Dans ce type de configuration, il sera donc nécessaire d'apporter un certain nombre d'améliorations si l'on souhaite disposer de batteries toujours bien chargées et en assurer une durée de vie acceptable.

Amélioration 1.

Éviter les répartiteurs de charge.

Dans des systèmes de faible puissance (batterie de service jusqu'à 100Ah, alternateur jusqu'à 60A), ne pas utiliser de répartiteurs à diodes mais des coupe-batterie manuels ou un relais automatique pour coupler et isoler les batteries.

Amélioration 2.

Augmenter la tension de sortie de l'alternateur.

C'est possible sur la plupart des alternateurs à régulateur intégré, à défaut l'on peut remplacer le régulateur standard par un autre modèle. Un travail de spécialiste que nous ne traiterons pas en détail ici.

Les alternateurs à régulateur séparé sont également modifiables pour obtenir une tension plus élevée.

Amélioration 3.

Compensation de température et de tension.

Victron Energy fournit des régulateurs pour des alternateurs 12 et 24V de type Valéo, équipés de connecteurs supplémentaires pour mesurer la tension et la température aux bornes des batteries. Ces régulateurs portent la tension à 14,4V (28,8 pour 24V) à 20°C. C'est donc une tension relativement élevée qui permettra une charge rapide, choisie partant du principe que sur de petits voiliers le moteur ne tourne ni souvent ni longtemps.

Cette solution est attractive par sa simplicité. Les régulateurs remplacent purement et simplement le régulateur d'origine et le câblage du bateau reste en l'état, il y aura seulement deux fils de mesure à mener vers la cosse positive de la batterie de service. En ajoutant une minuterie ou un interrupteur, l'on pourra passer automatiquement ou manuellement à une tension de charge plus faible (floating) si le moteur tourne longtemps.

Amélioration 4.

Régulateur d'alternateur compensé en tension et en température, comme ci-dessus, mais aussi avec une courbe de charge IU·U.

C'est la solution à adopter pour des systèmes de plus grande capacité ou lorsque le moteur tourne souvent pendant plus de 6 heures (bateaux à moteur).

Amélioration 5.

Tension de charge plus basse pour la batterie de démarrage.

Les améliorations 3 ou 4 ci-dessus permettent de bien charger la batterie de service, puisque c'est sur celle-ci que l'on a branché les capteurs de tension et de température : comme il se doit, elle recevra donc presque tout le courant de charge. Mais la chute de tension dans les câbles et dans l'isolateur vers la batterie de service sera plus importante que celle vers la batterie de démarrage, qui bien que presque chargée sera soumise à une tension élevée et risquera donc d'être surchargée.

Pour remédier à cet inconvénient il faudra monter un répartiteur avec plusieurs diodes ou avec des transistors à effet de champ (FET) qui réduiront la tension de charge vers la batterie de démarrage.

4.3. Les chargeurs. D'une tension secteur à une tension continue.

Il existe de nombreux types de redresseurs-chargeurs. Nous ne prendrons en considération que les chargeurs pilotés par microprocesseur, ils sont mieux adaptés à des courants de charge de 50A et plus, le grand avantage de ces microprocesseurs étant qu'ils permettent de programmer toutes caractéristiques de charge souhaitées. La compensation en tension et température sont tout aussi importantes qu'avec les alternateurs. Dans le cas d'utilisation de répartiteurs à diodes les mêmes précautions qu'avec les alternateurs, une fois de plus, seront à prendre pour éviter une surcharge de la batterie de démarrage. La quasi-totalité des chargeurs de Victron Energy sont équipés en série d'une sonde de température, d'une mesure directe de tension et d'une sortie indépendante pour la batterie de démarrage dont la tension est réduite d'environ 0,4V et dont l'intensité est de 4A.

Chapitre 5

WhisperGen : le générateur à moteur Stirling

5.1. Le WhisperGen peut remplacer un groupe de 6 à 12kW.

Le WhisperGen est un produit nouveau et unique, distribué en exclusivité par Victron Energy. C'est une micro-centrale d'énergie silencieuse et sans vibrations, conçue pour pouvoir fonctionner 24 heures sur 24.

Le WhisperGen a une puissance électrique de 750W sous 12 ou 24V (soit environ 60 ou 30 ampères respectivement). Cela paraît peu, mais vue sur 24 heures de fonctionnement c'est une quantité d'énergie considérable : auto-consommation déduite, le WhisperGen pourra produire jusqu'à 15kW d'énergie électrique, soit une capacité de charge de 600Ah en 24V ou de 1200Ah en 12V.

En comparaison, un groupe électrogène de 6kW utilisé 3 heures par jour fournira 18kW à condition qu'il fonctionne à pleine puissance ce est peu probable.

Le WhisperGen est une centrale d'énergie à part entière qui fonctionne comme un chargeur de batterie sophistiqué à trois étapes de charge paramétrables et est équipé d'échangeurs permettant de récupérer et d'utiliser la chaleur.

5.2. Tous les avantages du WhisperGen.

Le principal atout du WhisperGen est son silence de fonctionnement, il est entraîné par un moteur Stirling qui fonctionne selon le principe de la combustion externe permanente. Les générateurs traditionnels sont entraînés par des moteurs classiques à explosion, généralement diesel. Contrairement à ce type de moteurs, le moteur Stirling n'est pas un moteur à explosion.

Dans le moteur Stirling un brûleur comparable à celui d'une chaudière chauffe l'extérieur des culasses du moteur à une température constante d'environ 700°C. De l'azote sous pression contenu dans le bloc moteur et refroidi par eau à 80°C est injecté dans les cylindres et repousse les pistons en se dilatant sous l'effet de la chaleur. Ce même gaz retourne ensuite dans le bloc pour y être refroidi, et ainsi de suite en cycle continu.

Développons quelques points forts du WhisperGen :

- Silencieux :

Ni compression, ni explosion, donc pas de bruit ni de vibrations: le procédé de combustion continue rend le WhisperGen pratiquement inaudible, il peut donc tourner aussi longtemps qu'il le faudra pour fournir l'énergie demandée, sans nuire au confort à bord.

- Pas de mauvaises odeurs d'échappement :

Le procédé de combustion continue du WhisperGen est comparable à celui d'une chaudière moderne à haut rendement : une combustion complète, parfaitement maîtrisée, donc moins polluante et inodore.

- Pas de gaz de carter ni d'émanations d'huile :

Le moteur Stirling est hermétiquement scellé et ne nécessite aucune lubrification. Sans carter d'huile, donc sans vidanges ni de filtres, le moteur Stirling est lubrifié à vie. Au contraire d'un moteur classique, il n'y a donc pas de gaz -ni d'odeurs- de carter.

- Simultanément une source de chaleur :
Le WhisperGen sert également de source de chaleur : la chaleur du moteur et des gaz d'échappement est presque intégralement récupérée et réutilisable pour l'eau chaude à bord, que ce soit pour la cuisine, la toilette, le chauffage ou même un lave-linge. Ainsi le rendement global du WhisperGen peut dépasser 90%.
- Pratiquement sans entretien :
Le moteur Stirling a des avantages mécaniques imbattables : très peu de pièces en mouvement, donc moins d'entretien (ni soupapes, ni pompe à injection, courroies ou autres accessoires). La tenue mécanique du moteur du WhisperGen est estimée à 50.000 heures, soit près de 6 ans en fonctionnement continu !
- Échappement tiède et sec :
La combustion optimisée et le système de récupération de chaleur sophistiqué font que l'échappement reste tiède et sec, comparable au conduit d'évacuation d'une chaudière à haut rendement
- Fonctionnement entièrement automatique :
Conçu pour pouvoir fonctionner jour et nuit s'il le faut et en toute discrétion, WhisperGen produit de l'électricité et de la chaleur. Piloté par microprocesseur, son fonctionnement est automatique.
Grâce à son compteur d'ampères-heures, il connaît l'état des batteries et démarre automatiquement pour les recharger. Son chargeur régulé à trois étapes assure toujours un cycle de charge complet et donc une bonne longévité des batteries.
Le WhisperGen peut aussi être paramétré pour démarrer automatiquement sur une demande d'eau chaude. Comme pour un moteur normal, la chaleur excédentaire éventuelle sera rejetée à la mer via l'échangeur prévu à cet effet.
- Le WhisperGen remplace avantageusement un groupe électrogène :
Source de nuisances et cher en entretien, un générateur de bord traditionnel est volontairement utilisé le moins souvent possible, ce qui nécessite l'installation d'une batterie de service de forte capacité.
Tout à l'inverse d'un groupe traditionnel, le WhisperGen est toujours disponible !
La batterie de service fait office de réserve d'énergie et permet d'absorber momentanément les pointes de consommation à bord. L'on peut ainsi largement dépasser la puissance électrique nominale du WhisperGen, par exemple pour un dessalinisateur, un guindeau ou un appareil électroménager. Le tout est de ne pas dépasser la puissance totale pouvant être produite en 24 heures, soit environ 15 Kilo-watts, et de dimensionner correctement la batterie. Dans la plupart des cas, la batterie de service existante sera amplement suffisante. L'installation à bord d'un WhisperGen n'est pas très différente de celle d'un groupe traditionnel, il s'intègre et se raccorde facilement à bord de tous types de bateaux de 40 pieds et plus.
Les dimensions du système complet, échangeurs et électronique de régulation compris, sont de 650 x 500 x 650mm (hxlxp), le poids est de 90 Kg. Comparé à un groupe traditionnel de 7,5kW (hxlxp = 580 x 720 x 470mm, poids 230 kg), le gain est très appréciable.
- Plus économique, tant en utilisation qu'en investissement :
Grâce à sa double production d'électricité et de chaleur, le WhisperGen optimise la consommation de carburant. En plus, il permet de substantielles économies d'entretien par rapport à un groupe diesel classique utilisé quelques heures par jour.
Avec un WhisperGen à bord, les autres appareils de production de chaleur et d'électricité deviennent inutiles, et la capacité des batteries de bord pourra être réduite.

- Écologique
Par sa combustion propre, son rendement élevé et l'absence de nuisances le WhisperGen contribue positivement à préserver l'environnement. Le procédé de charge optimisé améliore aussi considérablement la longévité des batteries.
- Plus de branchement à quai
Le WhisperGen rend inutiles les branchements à quai. Il peut fonctionner même au port sans gêner l'entourage.

Exemple 1:

Un petit lave/sèche-linge (4kg de linge maxi) avec sa résistance de chauffage utilise environ 2,7kWh pour un cycle de lavage à 65°C et de séchage de 2 kg de linge. Ce cycle dure près de 2 heures. En admettant que les autres utilisations raccordées sur la batterie consomment en moyenne 15A, soit $24V \times 15A = 360W$, la batterie n'aura à compléter la demande d'énergie qu'à concurrence de $2,7 - 2(0,75 - 0,36) = 2kWh$ ou 83Ah.

Exemple 2:

La préparation d'un repas pour 4 personnes sur une plaque de cuisson électrique à induction demande 1 à 2 kWh. La batterie aura à fournir entre 25 et 67 Ah.

5.3. Conclusion.

Le WhisperGen remplace :

A: un groupe électrogène de 6 à 12kW avec son échangeur eau douce, son système de refroidissement d'échappement avec séparateur et son cocon insonorisant

B: un dispositif de chauffage pour accumulateur

C: un système de chauffage d'ambiance

D'autre part une réduction de la capacité de la batterie de service sera en général possible. Dans l'exemple du paragraphe 1.5.6 il était question d'une batterie 24V/800Ah. Sur ce même bateau équipé d'un WhisperGen une batterie de 24V/400Ah serait suffisante. Voir au chapitre 7 pour les calculs détaillés.

En plus d'une réduction de coût, des gains considérables d'encombrement et de poids seront réalisés :

- WhisperGen + batterie 400 Ah: $90 + 280 = 370kg$
- Groupe diesel 12 kVa + batterie 800 Ah: $300 + 700 = 1000 kg$

Remarque:

Une batterie de 24V/400Ah serait composée de 4 blocs de 12V/200Ah.

Un assemblage de 8 blocs en série/parallèle 2x4 pour obtenir une batterie de 800Ah est périlleux sachant qu'il sera très difficile d'équilibrer leur charge et décharge du fait de liaisons de longueurs différentes et d'écart de résistance interne.

Pour un bon résultat une batterie de 800Ah serait donc composée de 12 éléments de 2 volts en série, par exemple des GNB Absolyte. Ces éléments sont beaucoup plus lourds et plus coûteux que des blocs de 12V/200Ah.

Chapitre 6

Le concept DC

6.1. Introduction

Sur les grands bateaux le fonctionnement permanent d'un ou de plusieurs générateurs est indispensable pour faire face à la très forte demande en énergie électrique. Nous souhaitons traiter ici de l'alimentation électrique d'unités plus petites, d'une longueur de 12 à 30 mètres. Sur des bateaux de cette taille il peut être judicieux de ne pas raccorder les gros consommateurs de 230V (climatisation, électroménager) directement sur un groupe électrogène, mais sur des convertisseurs alimentés par la batterie de service. Cette batterie sera alors chargée par un ou plusieurs groupes fournissant directement du courant continu.

Les descriptions et calculs qui suivent peuvent également s'appliquer à des systèmes autonomes non-nautiques, et éventuellement être complétés par d'autres sources d'énergie comme des panneaux solaires et des éoliennes.

6.2. Les nouvelles technologies rendent le concept DC attractif

6.2.1. Les groupes électrogènes à courant continu

De plus en plus de constructeurs proposent en plus de leurs gammes traditionnelles 230V-50/60Hz des groupes fournissant du courant continu (DC). Des puissances jusqu'à 10kW, soit des courants de charge de 300A en 28V sont déjà disponibles.

Les générateurs DC sont plus petits et plus légers que les groupes AC et leur rendement est meilleur. Leur régime peut s'adapter à la puissance demandée permettant des rendements élevés même à puissance réduite.

6.2.2. Les convertisseurs

Les convertisseurs à sortie sinusoïdale se généralisent et leurs puissances augmentent. Victron Energy propose des des combinés chargeur-convertisseur qui peuvent être couplés en parallèle et même en configuration triphasée. Des puissances permanentes de plus de 10kW en monophasé et 30kW en triphasé sont ainsi réalisables, avec des puissances de pointe respectives supérieures à 30 et 90kW. Dans un avenir proche, ces puissances vont certainement encore augmenter.

6.3. Le concept DC en bref

6.3.1. Consommation moyenne jusqu'à 750 watts

Un générateur WhisperGen à moteur Stirling WhisperGen associé à une batterie de 200 à 400Ah (en 24V) sera une bonne solution sur des voiliers de 15-18 mètres et des bateaux à moteur de 12-15 mètres, comme exposé au chapitre 5. Voyons maintenant quels convertisseurs DC/AC devront alimenter les appareillages nécessitant du courant alternatif.

Selon qu'il soit souhaitable ou non de pouvoir utiliser simultanément plusieurs appareils électroménagers comme un lave-linge (2 à 3 kW résistance en marche) un four à micro-ondes (env. 1,5 kW) ou une cuisinière électrique (3 à 8 kW), une puissance totale de 4 à 10kW sera amplement suffisante. Victron Energy propose des convertisseurs d'une puissance unitaire de 2 kW (en tension d'entrée 24V), parallélisables jusqu'à 5 unités :

		Puissance permanente à 40° C	Puissance P30	Puissance instantanée
2x Phoenix	24/2000	4 kW	6 kW	12 kW
5x Phoenix	24/2000	10 kW	15 kW	30 kW

Il est également important de savoir si à côté du WhisperGen une possibilité de branchement à quai est souhaitée. Si oui, un branchement de 750 W soit 4 A sera suffisant, puisque le WhisperGen qui a cette puissance est capable de couvrir la consommation moyenne. La seule condition dans ce cas est que le branchement à quai soit utilisé uniquement pour recharger la batterie de service qui conserve sa fonction de tampon entre le quai et les consommateurs du bord.

L'ajout d'un simple autotransformateur permettra ensuite un raccordement sur les réseaux 110V des États Unis.

Dans le cas d'une configuration en AC avec un groupe 230V alimentant directement les appareillages du bord, un branchement de quai de 3 à 10 kW aurait été nécessaire !

Comparaison des configurations possibles pour une consommation moyenne de 600 Watts (voir chapitre 7 pour les calculs détaillés)

	WhisperGen	Générateur DC 6kW	Générateur AC 12kW
Fonctionnement			
Heures /jour	20	3	4
Consommation /jour	14 litres	12 litres	20 litres*
Bruit	-	67 dBa	69 dBa
Poids	90 kg	130 kg	300 kg
Batterie de service			
Capacité	24V/400Ah	24V/800Ah	24V/800 Ah
Poids	280 kg	700kg	700 kg
Prise de quai			
Puissance	6A	6A	8kW triphasé
Chargeurs	50A 8 kg	50A 8 kg	50A 8 kg
Convertisseurs			
Puissance	6 kW	6kW	2kW
Poids	54 kg	54 kg	18 kg
Poids total de l'installation	432 kg	892kg	1076 kg
Carburant pour 2 semaines	196 litres	168 litres	280litres
Poids total carburant 2 semaines inclus	597 kg	1033 kg	1311 kg

*La consommation du groupe AC est beaucoup plus élevée que celle du WhisperGen ou d'un groupe AC : un groupe AC tourne en moyenne à 30% de sa puissance nominale.

6.3.2. Consommation moyenne jusqu'à 2kW

Avec quelques mètres de plus, la consommation d'électricité à bord augmente fortement. Très vite, même plusieurs générateurs WhisperGen ne permettront plus de subvenir aux besoins d'énergie. Une première solution est d'utiliser un groupe WhisperGen pour couvrir le besoin de base et de compléter par un groupe DC pour fournir ponctuellement des puissances plus importantes lors de l'utilisation d'appareils électroménagers, d'un compresseur de plongée ou d'une climatisation intense.

Dans ce cas il suffira de dimensionner le groupe DC pour couvrir la puissance moyenne pendant ces « heures de pointe », les intensités maximales étant effacées par la batterie. Un aspect intéressant de cette configuration est que le WhisperGen permettra de parfaire la charge de la batterie pendant les « heures creuses ». Ainsi la batterie sera bien entretenue malgré les durées de fonctionnement limités du groupe diesel.

Un exemple:

Prenons un bateau en Méditerranée ayant une consommation moyenne de 2 kW, soit 48 kW par 24 heures. Pendant la nuit la consommation descend à environ 300 W (feux de navigation, réfrigérateur, congélateur...) lorsque la climatisation a fini de refroidir les cabines et ne tourne (presque) plus.

Le groupe WhisperGen dispose alors d'environ 8 heures pour parachever la charge des batteries avec une intensité moyenne de $(750 - 300) / 28 = 16$ A, ce qui est suffisant pour les 10% de charge manquante à une batterie de 1000 Ah.

Pendant la journée la consommation à bord augmente considérablement du fait de la climatisation et des autres appareils électriques. La puissance peut atteindre 12 kVA / 10 kW pendant 30 minutes avec des pointes à 20 kW (démarrages du climatiseur, cuisson, lave-linge). Il faut donc prévoir un ensemble de convertisseurs capable de fournir 10 kW pendant 30 minutes, soit 4 ou 5 convertisseurs du Type Phoenix 24/2000 en parallèle.

La puissance de pointe cumulée de ces convertisseurs sera de 30 kW s'il y en a 5.

Sur les 48 kW par 24 heures nécessaires 18 seront fournis par le WhisperGen qui tourne en permanence. Un groupe DC de 6 kW devra tourner pendant 5 à 6 heures pour fournir les 30 kW manquants, 3 à 4 heures suffiront pour un groupe de 10 kW.

Des groupes de cette puissance peuvent être insonorisés de manière acceptable et seront peu gênants dans le bruit ambiant de la journée.

Pendant les périodes de consommation de pointe ou d'arrêt du groupe DC la batterie de service devra fournir un complément de 6 à 10 kW (= 250 à 420 Ah). Partant d'une profondeur de décharge à 50% une batterie d'une capacité de 1000 Ah en 24 V sera suffisante.

L'alternative aurait été un groupe délivrant du courant alternatif, d'une puissance de 15 kVa / 12 kW, fonctionnant lui aussi au moins 5 heures par jour à 40% de sa puissance en moyenne. Sans le WhisperGen, la capacité de la batterie aurait dû être portée à 2000 Ah. En effet celle-ci ne serait plus chargée à 100% (les 5 heures de groupe étant insuffisantes) et fonctionnerait en état de décharge partielle (voir paragraphe 1.2.6.) entre 45% et 85%. Ainsi chaque jour jusqu'à 800 Ah seraient disponibles pour les périodes d'arrêt du groupe. Sans un ensemble de convertisseurs puissant permettant d'alimenter la climatisation, le groupe devra même tourner près de 16 heures par jour, mais à 25% seulement sa puissance en moyenne.

Grâce au concept DC, la connexion au quai devient également simple, légère et économique. Un chargeur d'une puissance totale de 3 kW soit un courant de charge de 100 A et une prise de quai calibrée à 16 A suffiront à couvrir la puissance moyenne demandée à bord.

Pour pouvoir également se raccorder à des réseaux 110V-60Hz un simple autotransformateur 110/230 fera l'affaire.

Le concept AC aurait nécessité une connexion à quai de 15 kW (32 A tri) et un convertisseur très lourd et d'un prix prohibitif pour transformer les tensions de quai américaines en 230V-50Hz.

Un autre atout majeur du concept DC est sa fiabilité.

- 3 sources de tension DC fonctionnent en parallèle : les alternateurs du moteur de propulsion, le WhisperGen et le groupe électrogène DC.
- Le courant alternatif est fourni par 5 convertisseurs en parallèle. La défaillance de l'une des sources DC ou de l'un des convertisseurs affectera donc très peu la disponibilité de l'énergie à bord. Au contraire, la panne d'un unique groupe électrogène AC implique la disparition totale du réseau de bord 230V.

Comparatif des configurations pour une consommation moyenne de 2 kW par 24 heures :

	WhisperGen + Groupe DC de 6 kW	WhisperGen + Groupe DC de 15 kW	Groupe AC de 15 KVA
WhisperGen			
Heures par jour	24	24	n.a.
Consommation	17 litres	17 litres	n.a.
Poids	90 kg	90 kg	n.a.
Groupe			
Heures par jour	5	5	16
Consommation	20 litres	30 litres	60 litres
Niveau de bruit en salle machines	67 DBA	69 DBA	69 DBA
Poids	130 kg	350 kg	350 kg
Batterie			
Capacité	24 V 1000 Ah	24 V 1000 Ah	24 V 1000 Ah
Poids	1000 kg	1000 kg	1000 kg
Prise de quai	3 kVa / 3 kW	15 kVA / 12 kW	15 kVA / 12 kW
Puissance	16 A mono	32 A triphasé	32 A triphasé
Chargeur(s)	100A 12kg	100A 12 kg	100A 12 kg
Autotransformateur 110 –230 V	20 kg	n.a.	n.a.
Poids convertisseur de quai 15 kW	n.v.t.	545 kg	545 kg
Convertisseurs DC – AC			
Puissance	8 kW	6 kW	2 kW
Poids	72 kg	54 kg	18 kg
Poids total de l'installation	1324 kg	2051 kg	1925 kg
Carburant sur 2 semaines	518 litres	658 litres	840 litres
Poids total carburant inclus	1759 kg	2604 kg	2631 kg

En établissant ce comparatif, nous avons nous-mêmes chez Victron Energy été surpris du gain de poids de près d'une tonne réalisable avec le concept DC !

Si l'on souhaitait limiter le fonctionnement du Groupe AC à 5 heures au lieu de 16 (colonne de droite) il fallait porter la capacité de la batterie à 2000 Ah, soit encore une tonne de plus...

Consommation moyenne jusqu'à 10 kW

Une consommation moyenne de 10 kW est fréquente sur des unités atteignant 30 mètres de longueur. C'est alors la climatisation qui est la plus gourmande, jour et nuit si l'on navigue sous les tropiques. Une puissance de refroidissement de 100.000 BTU (= 30 kW) n'est pas rare.

Avec un rendement ou COP (Coefficient Of Performance, voir paragraphe 7.1.1.) de 3 ceci implique une puissance électrique de $30 / 3 = 10$ kW pour la seule climatisation à pleine puissance.

En moyenne sur une période de 24 heures cette climatisation ne fonctionnera réellement que pendant la moitié du temps, ramenant la puissance moyenne nécessaire à 5 kW. Les autres gros consommateurs à bord seront l'éclairage, la cuisine et le lave-sèche linge. Pendant la nuit la consommation sera moindre, de l'ordre de 5 kW contre 15 dans la journée.

Ici le WhisperGen ne peut plus jouer de rôle significatif dans la production d'énergie, sauf à fournir une charge d'entretien et à tenir le bateau hors-gel pendant les périodes d'immobilisation ou d'hivernage.

La taille du bateau et le nombre de personnes à bord correspondant à une consommation moyenne de 10 kW dépendent d'un certain nombre de facteurs, tels l'équipement pour les manœuvres, l'utilisation ou non de machines à laver remplies à l'eau chaude (hot-fill), les moyens employés pour produire l'eau chaude (chauffe-eau électriques, mixtes ou au gazole)... Dans le concept DC il faudrait ici deux groupes DC de 10 kW permettant ainsi de faire face largement aux 15 kW nécessaires pendant la journée. Pour pouvoir absorber des consommations de l'ordre de 30 kVA pendant 30 minutes lors de l'utilisation simultanée d'appareils électriques, et des pointes instantanées de 60 kVA lors du démarrage de compresseurs de climatisation, il faudra installer une batterie de service d'au moins 24V/2000 Ah (Absolyte, GNB) ou de 24V/4000 Ah (A600 Sonnenschein). Ramenées à 24V ces puissances de 30 kVA et de 60 kVA à un facteur de puissance de 0,8 signifient un courant de 1000 respectivement de 2000 Ampères. (Il serait attrayant de porter la tension nominale de la batterie de 24 à 48V pour réduire ces intensités, comme c'est habituellement le cas dans des installations de télécommunication).

Il est possible que sur des voiliers la capacité de la batterie doive être encore augmentée pour alimenter des winches et un guindeau. A noter toutefois que bien qu'ayant des consommations instantanées très élevées, les utilisations d'accessoires de ce type sont très momentanées et n'ont donc pas une grande influence sur la consommation moyenne journalière (30kW pendant 1 minute équivaut à $30/60 = 0,5$ kWh, soit $0,5 / 24 = 20$ Ah!).

Une autre raison pour agrandir la capacité de la batterie serait le souhait de pouvoir rester par exemple 8 heures sans faire fonctionner le groupe. Si au cours de ces périodes la consommation moyenne peut être limitée à par exemple 5kW, soit plus de 200A sous 24V, il s'agit tout de même d'une décharge de près de 1700Ah. Pour une décharge à 60%, il faudra une batterie de 4000Ah. Il faudra ensuite de l'ordre de 10 heures aux deux groupes DC de 10kW pour recharger la batterie tout en alimentant les consommateurs du bord.

Sur une unité importante il sera possible de si bien insonoriser un groupe de 10kW qu'il sera pratiquement inaudible. Le besoin de l'arrêter pour avoir du silence pendant la navigation sera donc moins ressenti.

Dans cette configuration le courant du quai alimentera directement la batterie par l'intermédiaire de 6 chargeurs monophasés de 100A (puissance au quai 20kW).

En Europe ces chargeurs pourront être raccordés au quai sur un réseau triphasé avec neutre, soit 2 chargeurs par phase. Aux États Unis les mêmes chargeurs pourront être raccordés entre les phases d'un réseau triphasé 208V/60Hz, ou sur un réseau diphasé de 220V/60Hz.

Si le quai ne peut pas fournir les 20kW nécessaires, il suffira de réduire la puissance raccordée en arrêtant une partie des redresseurs, une puissance de 10kW étant suffisante pour couvrir la consommation moyenne du bateau. Ainsi même à quai les batteries peuvent assurer leur rôle de réserve tampon.

Selon le concept traditionnel AC la configuration pourrait être la suivante :

- 1 groupe de 50kVA / 40kW en 1 groupe de secours de 8kVA / 6,4kW
- 1 batterie de 24V/400Ah si le groupe est destiné à fonctionner en permanence ou une batterie de 4000Ah au moins si l'on souhaite des périodes "silencieuses" de 8 heures.
- Un groupe de convertisseurs de 6kW (3 x Phoenix 24/2000 en parallèle) pour les périodes "silencieuses".
- 1 chargeur de 75A pour la batterie de 400Ah ou 3 chargeurs de 100A pour la batterie de 4000Ahj.
- 1 convertisseur de quai de 50kVA.

Comparatif des concepts DC et AC pour une consommation moyenne de 10kW par 24h :

	Concept DC	Concept AC
Groupes		
Puissance	2 x 10 kW	1 x 50 kVA + 1 x 8 kVA
Heures par jour	1 x 16 heures	1 x 16 heures
	1 x 8 heures	1 x 8 heures
Consommation par jour	110 litres	200 litres
Gewicht	260 kg	1200 kg
Niveau de bruit en salle machines	70 DBA	
Batterie		
Capacité	2000 Ah	400 Ah
Poids	2000 kg	400 kg
Prise de quai	10 kW	50 kVA / 40 kW
Puissance	3x 16 A	3x 100 A
Poids autotransformateur	100kg	n.a.
Poids convertisseur de quai 60 kVA	n.a.	1300 kg
Convertisseur DC-AC		
Puissance	24 kW	6 kW
Poids	216 kg	56 kg
Chargeurs		
Puissance	600 A	75 A
Poids	80 kg	10 kg
Poids total de l'installation	2556 kg	2966 kg
Carburant sur 2 semaines	1540 litres	2800 litres
Poids total carburant inclus	3850 kg	5152 kg
Extension batterie pour 8 heures sans groupe		
Capacité	2000 Ah	3600 Ah
Poids	2000 kg	3600 kg
Poids total de l'installation pour 8 heures sans groupe	4556 kg	6566 kg
Poids total carburant inclus	5850 kg	8752 kg

Ici aussi il est étonnant de voir que le concept DC avec une batterie de 2000Ah permet de gagner 400kg sur le concept AC avec une batterie de 400Ah. Le concept DC permet des économies d'énergie importantes car les groupes tournent au plus près de la puissance nécessaire en régulant leur régime, permettant ainsi un rendement optimal. En comptant également le carburant nécessaire pour 2 semaines en mer, la configuration AC pèse une tonne de plus que l'alternative DC.

Si en plus l'on souhaite une période de silence (sans groupe) de 8 heures avec donc une batterie de 4000Ah, le gain de poids du concept DC est de 2 tonnes et même de 3 tonnes avec carburant.

De par sa simplicité et sa redondance (deux groupes identiques, 3 sources d'énergie en comptant le moteur de propulsion, convertisseurs en parallèle) le concept AC sera nettement plus fiable - car redondant - que le concept DC.

Enfin, dernier avantage, les groupes DC de 10kW seront beaucoup plus faciles à insonoriser et pourront même être rendus pratiquement inaudibles à bord d'unités importantes, ce qui serait très difficile voire impossible avec un groupe AC de 50kVA.

Chapitre 7

Mesures et calculs de consommation

7.1. Bateaux à moteur jusqu'à environ 9 mètres et voiliers jusqu'à environ 12 mètres

Supposons une installation électrique en 12V et commençons par lister les équipements que l'on pourra trouver à bord.

7.1.1 Les équipements

- Les instruments de navigation (log, girouette-anémomètre etc.). Tant qu'il n'y a pas à bord d'ordinateurs avec de grands écrans, la consommation sera limitée à quelque 10 Watts.
- Feu de navigation tricolore
25 Watts selon la norme
- VHF
Faible consommation en veille (env. 0,1A). En mode émission la consommation est importante mais courte (env. 5A), donc peu d'ampères.
- GPS
Consomme environ 0,5A
- Pilote
C'est un équipement très gourmand, le moteur atteint souvent 5A. et fonctionne 30% du temps. Donc une consommation moyenne de $5 \times 0,30 = 1,5A$
- Radio
Souvent utilisée en croisière, la radio (généralement un autoradio) consomme environ 1A.
- Éclairage intérieur
Aujourd'hui composé de lampes halogène (20W) et/ou de néons (8W), la consommation sera d'environ 10Ah par jour si l'on part sur 10 lampes.
- Réfrigérateur
C'est le plus gros consommateur à bord. Le compresseur fait 50W et fonctionne 50% du temps. Un réfrigérateur très bien isolé permettra quelques économies. Le rendement dépend aussi de la différence de température entre l'élément (la plaque froide dans le réfrigérateur) et le groupe compresseur-échangeur. Le montage fréquent où le groupe est placé sous l'évier où il fait souvent 40°C n'est certainement pas le meilleur. Il serait beaucoup plus judicieux - mais hélas aussi beaucoup plus cher - de choisir un échangeur refroidi par eau. Ceci permettrait de diviser par deux le temps de fonctionnement - et donc la consommation - du compresseur.

Pour permettre à ceux qui le souhaitent de faire des calculs précis, nous rappelons ci-dessous la formule de la pompe à chaleur, qui s'applique également aux climatiseurs.

L'énergie nécessaire pour prélever une certaine quantité de chaleur à l'environnement avec une pompe à chaleur se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$\text{COP} = n_r * n_c = n_r * T_{\text{basse}} / (T_{\text{haute}} - T_{\text{basse}})$$

Le COP est l'abréviation anglaise de Coefficient of Performance, T_{basse} est la température du côté froid de la pompe exprimée en degrés Kelvin ($=^{\circ}\text{C} + 273$), T_{haute} est la température du côté chaud de la pompe également en degrés Kelvin, et n_r est un facteur (toujours inférieur à 1) qui donne le rendement réel par rapport au rendement théorique n_c .

Exemple pour un réfrigérateur :

Température côté froid : -5°C soit $T_{\text{basse}} = 268^{\circ}\text{K}$ (il s'agit non pas de la température dans le réfrigérateur mais de celle de l'élément).

Température côté chaud : 45°C soit $T_{\text{haute}} = 318^{\circ}\text{K}$

Rendement 25%

Le COP sera de :

$$\text{COP} = 0,25 * 268 / (318 - 268) = 1,34$$

Donc pour chaque kWh de chaleur qui s'infiltré dans le réfrigérateur au travers de son isolation ou qui doit être prélevée sur les produits chauds que l'on y place, il faudra $1 / 1,34 = 0,75$ kWh d'énergie électrique.

Si dans ce cas l'on refroidissait le côté chaud à 20°C avec un système de circulation d'eau, le résultat sera :

$$\text{COP} = 0,25 * 268 / (293 - 268) = 2,68$$

Donc seulement $1 / 2,68 = 0,37$ kWh suffiront ici à compenser les fuites de chaleur.

Pour illustrer le calcul :

Si vous placez dans le réfrigérateur 5 litres d'eau réchauffée à 35°C par le soleil et la refroidissez ensuite à 20°C il faudra prélever 0,145 kWh (1 litre d'eau a une capacité calorique de 1,16 Wh par $^{\circ}\text{C}$). Avec un COP de 1,34 il faudra ici $0,14 / 1,34 = 0,108$ kWh, soit $0,108 / 12 = 9$ Ah.

C'est peu, sauf si vous répétez l'opération plusieurs fois dans la journée. La majeure partie de la consommation électrique est imputable aux pertes de chaleur par l'isolation.

- Divers

Enfin, l'on peut encore trouver à bord divers autres consommateurs, comme plusieurs pompes (groupe d'eau, pompe de cale, lavage de pont) qui consomment beaucoup mais pendant peu de temps. Nous prendrons pour cela 5 Ah par jour, soit 10 A pendant 10 minutes.

Dans les paragraphes qui suivent nous allons estimer la consommation électrique d'un bateau qui navigue puis du même bateau au mouillage et sans raccordement à une source de 230 V (quai).

7.1.2. A la voile

Nous partons d'une période de navigation à la voile de 24 heures. Lors de la navigation au moteur la consommation est sans importance car l'alternateur du moteur de propulsion suffit amplement aux besoins du bateau.

Ensuite nous calculerons la capacité nécessaire de la batterie de service pour alimenter l'ensemble du bateau pendant ces 24 heures.

Consommateurs	Valeur nominale		Durée/ 24h	Durée en %	Consommation / 24 heures	
	Watts	Ampères	Heures	%	KWh	Ah / 12V
Instruments de navigation	10		24		0,240	20
Feu de navigation tricolore	25		8		0,200	17
VHF veille		0,1	10			1
Émission		5	0,2			1
GPS		0,5	6			3
Pilote		5	12	30		18
Radio		1	3		0,036	3
Éclairage intérieur, 10 lampes de 20 W	200		0,6		0,120	10
Réfrigérateur à échangeur air ambiant	50		24	50	0,600	50
Divers						5
Consommation totale en 24 heures		5,3			1,536	128
Capacité minimale de la batterie de service du bateau sous voiles, partant d'une charge de 80% au départ et de 30% après 24 heures						256

L'on remarquera que le réfrigérateur est de loin le plus grand consommateur. Sa consommation pourra être réduite de moitié en utilisant un échangeur à eau : la consommation totale en 24 heures serait alors de 103 Ah.

Un réfrigérateur à gaz réduirait même la consommation à 78Ah, mais cette solution n'est envisageable que sur des bateaux à moteur navigant en eau calme.

7.1.3. Au mouillage et sans source de 230 V

Nous partons encore d'une période de 24 heures, et le calcul vaut aussi bien pour un voilier que pour un bateau à moteur.

Consommateurs	Valeur nominale		Durée/ 24h	Durée en %	Consommation / 24 heures	
	Watts	Ampères	Heures	%	KWh	Ah / 12V
Feu de mouillage	25		8		0,200	17
Radio		1	3		0,036	3
Éclairage intérieur, 10 lampes de 20 W	200		0,6		0,120	10
Réfrigérateur à échangeur air ambiant	50		24	50	0,600	50
Divers						5
Consommation totale en 24 heures		3,5			1,020	85
Capacité minimale de la batterie de service du bateau sous voiles, partant d'une charge de 80% au départ et de 30% après 24 heures						170

7.1.4. Comment recharger la batterie ?

7.1.4.1 Par le moteur de propulsion.

Ce moteur est généralement équipé d'un alternateur de 60 A, qui peut produire au maximum 60 A à 6000 tours/minute. En admettant un rapport de multiplication des poulies d'entraînement de 2 : 1 cela signifie que le moteur devra tourner à 3000 tours/minute pour fournir un courant de charge de 60 A. Dans la pratique personne ne le fera, (trop de bruit et pas très bon pour le moteur) et le moteur sera réglé à 1000 ou 1500 tours. Le courant de charge sera alors de 40% à 80% du nominal soit 30 à 50 A. Il faudra donc faire tourner le moteur ainsi pendant deux à 3 heures tous les jours ! C'est une perspective peu alléchante pour un voilier, sauf si l'on a l'intention ou l'obligation (absence de vent) de naviguer un bon bout au moteur.

Comment faire mieux ?

1 : agrandir la capacité de la batterie pour pouvoir « tenir » plusieurs jours sans moteur

C'est une solution simple et économique, mais qui n'a de sens que si l'on est certain d'utiliser le moteur ou d'atteindre un point de raccordement au 230 V en quelques jours.

2 : deuxième alternateur ou un alternateur plus puissant

Quelques complications se présentent immédiatement :

Le courant de charge peut devenir trop élevé pour permettre le couplage de la batterie de démarrage avec la batterie de service par l'intermédiaire d'un relais automatique (Bosch ou équivalent) car les contacts du relais pourront brûler et rester collés. Il faudra donc utiliser un répartiteur de charge, ce qui nécessite l'adaptation de l'alternateur ou de son régulateur (voir à ce sujet le paragraphe 4.2).

3 : panneaux solaires.

Montés horizontalement, les panneaux solaires fourniront environ 300 Wh par m² et par jour en Europe du Nord, soit 25Ah sous 12V par m² et par jour. En Méditerranée l'on pourra atteindre de l'ordre de 35Ah.

4 : éolienne

Une éolienne d'un diamètre d'un mètre pourra fournir environ 25 W (2 A de charge sous 12V) avec 10 nœuds de vent. Une contribution de 40 à 80 Ah par 24 heures est donc possible.

Avec une consommation réduite à bord, des panneaux solaires et une éolienne peuvent donc contribuer de manière très significative et permettront de réduire fortement les recharges à l'aide du moteur. Ces panneaux et l'éolienne seront également très utiles pour recharger et maintenir à 100% les batteries pendant les périodes où le bateau n'est pas utilisé. Il faudra seulement prendre soin d'installer de bons régulateurs pour éviter les surcharges.

5: hydrogénérateur

Pendant la navigation l'on peut produire de l'énergie supplémentaire avec un générateur d'arbre (inconvenient : forte résistance et usure) ou avec un hydrogénérateur fixé sur l'arrière du bateau ou traîné. L'on obtiendra une production d'environ 12W soit 1A par nœud de vitesse, soit 40 à 100 Ah sous 12V par 24 heures, ce qui couvre largement la différence de consommation du bateau en marche par rapport à la consommation au mouillage.

L'utilisation d'une ou de plusieurs des sources d'énergie ci-dessus réduira les sollicitations de la batterie de service et permettront d'en réduire la capacité. Un bon compromis serait alors une batterie de 200Ah permettant ainsi une marge de sécurité pour son vieillissement et pour des cas de défaillance d'une source d'énergie.

7.1.5. Les extras

Nous décrivons ci-dessous quelques options permettant un plus grand confort à bord. Pour certaines d'entre-elles, il faudra un convertisseur. Le rendement des convertisseurs modernes étant supérieur à 90%, l'on ne prendra pas en compte la perte d'énergie qu'ils entraînent.

7.1.5.1. Four à micro-ondes

Très gourmand en énergie (jusqu'à 1500 watts) pendant des périodes brèves.

Utilisé 12 minutes par jour, un four à micro-ondes consommera $1500 \times 0,2 / 12 = 25\text{Ah}$ sous 12V

7.1.5.2. Bouilloire électrique

Très pratique pour chauffer rapidement et efficacement de l'eau. La capacité calorifique de l'eau étant de 1,16Wh par °C il faudra environ 0,1kWh soit 8,3Ah sous 12V pour porter à ébullition 1 litre d'eau.

7.1.5.3. Plaque de cuisson électrique

Le gaz à bord est dangereux et les remplacements de bouteilles de gaz sont désagréables. Une plaque électrique de deux éléments de 2kW nécessite une puissance maximale de 4kW soit près de 400A sous 12V, mais quelques précautions permettront de limiter cette puissance à 2kW.

La préparation d'un repas pour 4 personnes demandera en moyenne 1kWh soit 100A. c'est réalisable avec un convertisseur ou Combi d'une puissance nominale de 1,6kW (puissance P30 de 2,5kW), et mieux avec une batterie de service de 400Ah et en faisant tourner le moteur pendant la préparation du repas.

7.1.5.4. Chauffage

D'évidence l'on utilisera un chauffage au gazole, la consommation d'électricité sera ainsi limitée à celle de la pompe et des ventilateurs, soit environ 5A.

7.1.5.5. Climatisation

Victron Energy propose un climatiseur dont tous les éléments sont optimisés pour limiter au maximum la consommation électrique.

Un COP de 6 a ainsi pu être atteint, ce qui est deux fois meilleur que la moyenne habituelle. La consommation nominale est de 30A sous 12V pour une capacité de refroidissement de 2kW (6800 BTU). En fonctionnement typique à 50% la consommation sera donc de 15A. Sur un bateau qui navigue souvent au moteur ou qui

vient régulièrement à quai pour recharger ses batteries, c'est faisable moyennant quelques précautions.

7.1.5.6. Dessalinisateur

De plus en plus de marques proposent maintenant des dessalinisateurs très efficaces en 12 et 24V. le courant n'est souvent que d'une bonne dizaine d'ampères pour une capacité de 30 à 60 litres/heure. L'on peut donc maintenant envisager ce type de matériel sur de petites unités qui pratiquent la grande croisière.

7.2. Bateaux à moteur de 9 à 15 mètres et voiliers de 12 à 18 mètres environ

Sur des unités de cette taille nous présumons une installation en 24V.

Un luxe certain s'installe, les équipements du bord sont plus nombreux et plus puissants.

7.2.1. Les équipements

- Instruments de navigation
Un ordinateur (une centrale) de navigation est très fréquemment standard. La consommation électrique passe à 5A sous 24V, GPS, VHF radar etc. inclus. En réduisant les temps de fonctionnement des divers composants, la consommation moyenne pourra être réduite d'une bonne moitié.
- Feux de navigation
Les feux de route sont le plus souvent indépendants (3 x 25W), le feu de mouillage est de 25W.
- Pilote
La puissance moyenne reste d'environ 1,5A, mais sous 24V, donc malgré tout le double de celle sur les petites unités.
- Radio
Plus puissante, avec lecteur de CD et plus de haut-parleurs, consommation 2A.
- Éclairage intérieur
Plus de lampes et une utilisation moins parcimonieuse que sur les petites unités. Nous partons sur 20Ah/jour.
- Réfrigérateur et congélateur
Prenons deux compresseurs de 50W. Pour un bon rendement, l'isolation a été soignée et l'on a installé un échangeur eau de mer. Le cycle de fonctionnement du réfrigérateur est limité à environ 25%, celui du congélateur à 50%.
- Divers
Un plus grand nombre de pompes (par exemple pour la douche) porte notre estimation à 10Ah.

7.2.2. A la voile

Nous savons déjà que la consommation sera importante, les seuls instruments de navigation prendront 2A en faisant très attention.

Consommateurs	Valeur nominale		Durée/ 24h	Durée en %	Consommation / 24 heures	
	Watts	Ampères	Heures	%	KWh	Ah / 24V
Instruments (centrale) de navigation		2	24		1,152	48
Feux de navigation	3x25		8		0,600	25
Pilote		5	12	30	0,432	18
Radio		2	3		0,144	6
Éclairage intérieur, 20 lampes de 20 W	400		1,2		0,480	20
Réfrigérateur et congélateur	50+50		24	25+50	0,900	38
Divers						10
Consommation totale en 24 heures		6,2			3,960	165
Capacité minimale de la batterie de service du bateau sous voiles, partant d'une charge de 80% au départ et de 30% après 24 heures						412

Si la centrale de navigation fonctionne en permanence, la consommation journalière passerait à 225Ah, et il serait prudent de tenir compte de cette éventualité qui peut dans certaines conditions être une nécessité (conditions de navigation difficiles).
Pour une autonomie de 24 heures il faudra alors une batterie de 450Ah.

7.2.3. Au mouillage et sans source de 230 V

La centrale de navigation et le pilote étant arrêtés, la consommation diminue fortement.

Consommateurs	Valeur nominale		Durée/ 24h	Durée en %	Consommation / 24 heures	
	Watts	Ampères	Heures	%	KWh	Ah / 24V
Feu de mouillage	25		8		0,200	8
Radio		2	3		0,144	6
Éclairage intérieur, 20 lampes de 20 W	400		1,2		0,480	20
Réfrigérateur et congélateur	50+50		24	25+50	0,900	38
Divers						10
Consommation totale en 24 heures		3,4			1,968	82
Capacité minimale de la batterie de service du bateau sous voiles, partant d'une charge de 80% au départ et de 30% après 24 heures						164

7.2.4. Comment recharger la batterie ?

7.2.4.1 Par le moteur principal

Avec un alternateur 28V/60A délivrant en pratique 40A (voir au paragraphe 7.1.4.1) le moteur devra tourner pendant 4 heures. Avec un alternateur supplémentaire l'on pourra réduire de moitié.

7.2.4.2 Les sources d'énergie alternatives

Un panneau solaire (1m²), un hydrogénérateur et une éolienne d'un mètre de diamètre (estimée à 60W à une vitesse de 5 nœuds) fourniront ensemble de l'ordre de 2,4kW = 100Ah par jour. Ce n'est donc pas suffisant, mais 1 heure de charge par le moteur permettra de compléter (en navigation comme à l'arrêt car dans ce dernier cas l'hydrogénérateur ne participe plus). La situation devient nettement plus acceptable.

7.2.5. Les extras

Les équipements supplémentaires décrits pour les plus petites unités en 7.1.5 font généralement partie de l'équipement standard sur un bateau à moteur de 12 mètres ou sur un voilier de 15 mètres. Leur consommation sera également plus importante du fait d'un plus grand nombre d'équipiers.

En plus, l'on voit souvent apparaître un lave-linge et même un lave-vaisselle. Ces appareils sont souvent plus petits que ceux à usage domestique.

7.2.5.1 Lave-linge

Nous l'avons déjà abordé au paragraphe 6.2.

Il consommera environ 2,7kWh pour un cycle de lavage/séchage.

7.2.5.2 Lave-vaisselle

Consommation environ 1 kWh

La consommation journalière de tout ce luxe s'estime comme suit :

	Valeur nominale	Durée/24h	Consommation/24h	
	Watts	Heures	kWh	Ah / 24V
Four à micro-ondes	1500	0,25	0,375	16
Bouilloire, 6 litres par jour	2000		0,600	25
Cuisson électrique, 6-8 personnes	6000		2,000	83
Climatisation, puissance 4 kW	700	12x 0,5 = 6	4,200	175
Dessalinisateur, 200 litres par jour			0,792	33
Lave-linge, 1 fois tous les 2 jours	2000		0,5*2,700	56
Lave-vaisselle, 1 fois par jour	2000		1,000	42
Supplément pour les pompes	100	0,5	0,050	2
Total par 24 heures			10,368	432

Ajoutée à la consommation de base du voilier en navigation la consommation journalière totale passe maintenant à 165 + 432, avec une intensité moyenne de 597/24 = 25A. Ces chiffres sont très proches de ceux traités dans le concept DC au paragraphe 6.3. Le plus gros consommateur –et de loin- est le climatiseur malgré une puissance de refroidissement modeste de 4kW et un fonctionnement de 12 heures par jour à 50%.

7.2.6. La production d'énergie sur un voilier de 12 à 18 mètres.

7.2.6.1. Groupe électrogène 230V.

La solution la plus courante est l'installation d'un groupe diesel 230V que l'on démarre lorsque le besoin en énergie à bord est important. L'on en profite alors pour recharger les batteries via un ou plusieurs chargeurs.

Ce groupe pourra par exemple tourner pendant 4 heures chaque soir, de la préparation du repas jusqu'à la fin du cycle du lave-vaisselle. Entre-temps l'on en profitera pour faire une tournée de lave-linge.

Cette donnée va nous permettre de calculer ce que devra fournir la batterie pendant tout le temps où le groupe est à l'arrêt.

Pour commencer il y a la consommation de base du paragraphe 7.2.2 pendant $24-4 = 20$ heures, soit $165 \times 20 / 24 = 137\text{Ah}$. Prenons ensuite le four à micro-ondes, la bouilloire et la climatisation pendant deux-tiers du temps : $16 + 25 + 175 \times 2 / 3 = 158\text{Ah}$.

Le total sera ainsi de $137 + 158 = 295\text{ Ah}$.

Il faudra donc une batterie d'une capacité de 600Ah au moins, disons de 800Ah avec un peu de réserve.

Nous retrouvons la capacité retenue au paragraphe 1.5.6. et pour le concept DC au paragraphe 6.3.1.

Voyons maintenant les chargeurs et les convertisseurs.

Un Combi 24/2000/50 suffit en tant que convertisseur, mais ne fournira que $4 \times 50 = 200\text{Ah}$ pendant la période les 4 heures de fonctionnement du groupe. Pendant cette période il faut recharger au moins 281Ah plus la consommation de base soit $6,2 \times 4 = 25\text{Ah}$. Avec une petite marge l'on arrive à un courant de charge de 100A. Il faudra donc installer un chargeur 24V/50A en plus du Combi.

Le groupe électrogène

En évitant de mettre en marche les appareils électroménagers en même temps l'on pourra se contenter de 6kW pour la plaque de cuisson et de $100\text{A} \times 30\text{V} = 3\text{kW}$ pour les chargeurs. Soit un groupe d'une puissance de 10kW, voire de 12kW si l'on souhaite une petite marge. En présence d'une climatisation plus importante en 230V ou même en 380V, la consommation et donc la puissance du groupe augmenteraient encore fortement.

Pour terminer, le branchement au quai et le convertisseur de fréquence : dans cet exemple la puissance au quai pourra être limitée à 8kW car l'on dispose de beaucoup plus de temps pour recharger la batterie. Par contre cette puissance implique une connexion triphasée. Aux États-Unis, il faudra un convertisseur de fréquence, également d'une puissance de 8kW.

En lisant les calculs qui précèdent, vous avez certainement déjà pensé que tout ceci est impossible sur un voilier de 12 mètres, et c'est exact : le système est trop compliqué, trop lourd et trop cher.

C'est pourquoi des configurations de ce genre ne se trouvent que sur des unités nettement plus importantes, par exemple sur des bateaux à moteur de 15 mètres et sur des voiliers de 20 mètres.

Ce qui suit va démontrer qu'avec un WhisperGen le système d'énergie deviendra infiniment plus simple et plus léger et permettra effectivement tout ce confort à bord de bateaux plus petits. Avec en plus la cuisson électrique par plaques à induction, plus sûres et d'une efficacité parfaite car toute la chaleur est directement et uniquement transférée à la casserole.

7.2.6.2. La Micro-Centrale WhisperGen.

Le WhisperGen est capable de fournir 30A sous 24V, alors que la demande moyenne est de 24A. Une marge confortable qui permettra d'embarquer le sèche-cheveux et le grille-pain. Ici aussi l'on pourra limiter la puissance de l'installation en faisant fonctionner les appareils électroménagers séparément. La vaisselle et la tournée de linge se feront le matin. La consommation sera la plus importante le soir entre 18 et 23 heures : préparation du dîner, éclairage intérieur et climatisation à fond. Pendant 5 heures, en plus de la consommation de base de quelque 35Ah si le bateau navigue, la demande d'énergie sera majorée de $83+20+117 = 220\text{Ah}$, soit 255Ah au total.

Pendant ces 5 heures, le WhisperGen fournira déjà 150Ah (5x30), la décharge de la batterie de service sera donc de $255-150 = 105\text{Ah}$ sans tenir compte de ce que produiront les éventuelles autres sources d'énergie (éolienne etc.). Sans climatisation, la décharge en fin de soirée serait même presque nulle. En partant du principe que la batterie était presque totalement chargée en début de soirée, l'on pourrait se contenter -avec une marge suffisante- d'une batterie de service de 400Ah.

Une batterie de cette capacité pouvant être composée de 4 blocs de 12V/200Ah, elle sera légère (280kg) et peu coûteuse.

Les chargeurs et convertisseurs.

Trois Combis Phoenix 24/2000/50 en parallèle feront largement l'affaire (puissance P30/30 minutes = 9kW), et en prenant quelques précautions deux suffiront, 100A de courant de charge également.

150A de charge (trois combis) permettrait de moins solliciter la batterie si l'on reste longtemps à bord pendant que le bateau est au port.

La connexion au quai

Avec un branchement de 6A et 200V seulement les chargeurs fourniront encore près de 40A. C'est suffisant sachant que les batteries pourront faire office de tampon pour effacer les pointes de consommation. Sans comparaison donc avec la prise de quai de 8kW que nous avons vue précédemment dans le cas du groupe diesel 230V.

Plus besoin non plus de convertisseur de fréquence. Aux États-Unis le chargeur sera alimenté directement en 220V 60Hz ou via un autotransformateur 110/220.

Le poids et l'encombrement du système sont si réduits que tous les extras de la liste du paragraphe 7.2.5 sont rendus possibles même sur des bateaux de moins de 15 mètres.

7.2.7. La production d'énergie sur un bateau à moteur de 9 à 15 mètres.

En navigation, les alternateurs du ou des moteurs de propulsion suffiront amplement à produire les 24A nécessaires.

Au mouillage la consommation y-compris les extras du paragraphe 7.2.5 sera de l'ordre de 22A, les instruments de navigation et le pilote étant arrêtés.

Un groupe électrogène 230V devra malgré tout avoir une puissance de 10 à 12kW et fonctionner 4 heures par jour, associé à une batterie de service de 800Ah. La connexion au quai aussi sera alors de 8kW.

Ici aussi, un WhisperGen et des convertisseurs en parallèle permettront de réduire la capacité des batteries à 400Ah et la puissance au quai à 6A.

7.2.6. Conclusion.

Le tableau du paragraphe 6.3.1. (comparaison des possibilités pour une consommation moyenne de 600W) démontre que le concept DC apporte un gain de poids de 600kg. C'est considérable pour un bateau, quelle que soit sa taille. Bien entendu, le gain de poids sera encore plus grand si l'on installe qu'une partie des extras et de l'électroménager cité. Sans climatisation par exemple, la consommation en soirée descend à 117Ah. Une batterie de service de 24V/200Ah serait alors suffisante.

7.3. Unités jusqu'à 30 mètres.

Sur ce type de bateau, nous retrouvons les mêmes équipements que ceux décrits au paragraphe 7.2 mais la consommation d'énergie augmente sur toute la ligne pour atteindre rapidement des moyennes de 2kW voire de 10kW avec des climatiseurs puissants. Si plusieurs groupes électrogènes et un convertisseur de fréquence sont installés, le tout pouvant fonctionner en parallèle et sans coupure lors du transfert des groupes vers le quai et inversement, le système électrique du bateau devient extrêmement complexe, coûteux et vulnérable.

Même sur des unités de cette importance, le concept DC présente des avantages considérables.