

L'électricité à bord

(et l'électricité autonome en général)

Version 11
Novembre 2017

L'électricité joue un rôle de plus en plus important à bord des bateaux de plaisance ; indispensable au niveau de la navigation et des instruments de communication modernes ainsi que du nombre croissant d'appareils domestiques que l'on amène à bord.

L'objet de ce livre sera traité en deux parties :

Tout d'abord je vous parlerai de quelques sujets portant souvent à confusion, comme les batteries et leurs méthodes de recharge ainsi que de la consommation d'électricité des appareils à bord.

Deuxièmement, mon objectif est d'aider les architectes, les électriciens et les propriétaires dans leur démarche décisionnelle sur la production et la gestion de l'électricité. Certains nouveaux produits et concepts permettent de mieux gérer l'électricité à bord, et d'augmenter considérablement la sécurité ainsi que le confort.

Richard Poulin - collaboration : Solar and Wind Technology

Il est strictement interdit de reproduire cette publication, tout ou partie de son contenu, sous quelque forme que ce soit, par tout moyen et à quelque titre que ce soit.

Aucune partie de ce livre ou ce livre en entier ne peut être publié ou traduit en d'autres langues que le français, utilisés ou reproduits d'aucune manière, sans la permission écrite préalable de Richard Poulin / Canada Solar

L'électricité à bord

(et l'électricité autonome en général)

Table des matières

1. INTRODUCTION

2. LA BATTERIE : EN PRÉVENIR LE VIEILLISSEMENT PRÉCOCE

La batterie est le cœur de chaque système d'énergie autonome. Sans batterie il n'est pas possible de stocker de l'énergie électrique. En outre, la batterie est un élément précieux et vulnérable. Ce chapitre traite spécifiquement de la vulnérabilité de la batterie.

2.1. Introduction

2.2. La chimie de la batterie

- 2.2.1. La décharge
- 2.2.2. La charge
- 2.2.3. Le transport interne par diffusion
- 2.2.4. La durée de vie : perte de masse, corrosion, sulfatation

2.3. Les types les plus courants de batteries au plomb-acide

- 2.3.1. Plomb/antimoine et plomb/calcium
- 2.3.2. Les batteries dites 'ouvertes' et batteries dites 'étanches'
- 2.3.3. La batterie de démarrage à plaque plane
- 2.3.4. La batterie semi-traction à plaque plane
- 2.3.5. La batterie 'traction' à plaques tubulaires
- 2.3.6. La batterie gel 'étanche' (VRLA)
- 2.3.7. La batterie AGM 'étanche' (VRLA)
- 2.3.8. La batterie à éléments cylindriques 'étanche' (VRLA)

2.4 Fonction et utilisation de la batterie

2.5 La batterie plomb-acide en pratique

- 2.5.1. Combien coûte une batterie?
- 2.5.2. Dimensions et poids
- 2.5.3. L'effet du régime de décharge sur la capacité disponible de la batterie
- 2.5.4. Capacité et température
- 2.5.5. Vieillessement prématuré 1. Décharge profonde
- 2.5.6. Vieillessement prématuré 2. Charge trop rapide et charge partielle
- 2.5.7. Vieillessement prématuré 3. Charge insuffisante
- 2.5.8. Vieillessement prématuré 4. Surcharge
- 2.5.9. Vieillessement prématuré 5. Température
- 2.5.10. Auto-décharge

3. SURVEILLANCE DE L'ÉTAT DE CHARGE : 'LE MONITEUR DE BATTERIE'

Le moniteur de batterie indique l'état de charge d'une batterie et peut aussi être utilisé pour démarrer automatiquement le processus de recharge, ou pour indiquer qu'une recharge est nécessaire. Pour des systèmes de batteries d'accumulateurs plus importants, un moniteur avec un compteur de courant en Ampère-heures est indispensable. Commencer la recharge quand la tension est déjà en baisse, c'est tout simplement trop tard : la décharge est alors trop profonde et le mal est déjà fait.

3.1. Les différentes façons de surveiller l'état de charge d'une batterie

- 3.1.1. La densité de l'électrolyte
- 3.1.2. La tension
- 3.1.3. Le compteur de courant en Ampère-heures (Ah)

3.2. Le moniteur de batterie avec compteur de courant

3.3. Rendement énergétique d'une batterie

3.4. Rendement de courant d'une batterie

3.5. Effet de l'intensité du courant de décharge sur la capacité

3.6. Un courant de décharge élevé, conduit-il à une perte de capacité?

3.7. Autres caractéristiques utiles d'un moniteur de batterie

- 3.7.1. Comptage des événements particuliers
- 3.7.2. Saisie de données

4. RECHARGER LES BATTERIES : LA THÉORIE

Les différentes batteries doivent être chargées différemment. Ce chapitre traite les caractéristiques de recharge optimales des batteries plomb-acide les plus courantes.

4.1. Introduction

4.2. Charger en trois étapes (I U U°)

- 4.2.1. Charge à courant limité (charge principale)
- 4.2.2. Charge d'absorption
- 4.2.3. Charge d'entretien

4.3. Charge d'égalisation

4.4. Compensation de température

4.5. Résumé

4.6. Conclusion : comment charger une batterie?

- 4.6.1. La batterie de servitude
- 4.6.2. La batterie de démarrage
- 4.6.3. La batterie pour le propulseur d'étrave

5. CHARGER LES BATTERIES A L'AIDE D'UN ALTERNATEUR OU D'UN CHARGEUR DE BATTERIE

L'alternateur avec régulateur standard (tel qu'il est utilisé dans les véhicules) est loin d'être la meilleure solution, surtout en cas de plusieurs batteries séparées par un répartiteur de charge à diodes.

5.1. L'alternateur

5.2. Quand l'alternateur doit charger plusieurs batteries

- 5.2.1. Introduction
- 5.2.2. Le problème
- 5.2.3. Plusieurs solutions
 - 5.2.3.1. Simple et pas cher : coupleurs de batteries commandés par microprocesseur
 - 5.2.3.2. Augmenter la tension de l'alternateur
 - 5.2.3.3. Un régulateur en plusieurs étapes avec compensation de température et de tension
 - 5.2.3.4. La batterie de démarrage
 - 5.2.3.5. La batterie pour le propulseur d'étrave

5.3. Le chargeur de batteries électronique

- 5.3.1. Introduction
- 5.3.2. Charger de façon optimale à l'aide d'un chargeur de batterie
- 5.3.3. Charger plusieurs batteries
 - 5.3.3.1. Charger plusieurs batteries avec 1 seul chargeur
 - 5.3.3.2. Un chargeur de batterie à plusieurs sorties
 - 5.3.3.3. Coupleur de batteries commandé par microprocesseur

6. APPAREILLAGE ÉLECTRIQUE ET CONSOMMATION D'ÉNERGIE

La consommation énergétique journalière des appareils qui utilisent peu d'électricité, mais pendant une longue période (comme les feux de navigation, le réfrigérateur et le congélateur) est la plupart du temps sous-estimée, alors qu'est souvent surestimée la consommation des appareils qui utilisent beaucoup d'énergie, mais sur une courte durée (comme les treuils ou winchs électriques, le propulseur d'étrave, la machine à laver, la table de cuisson électrique).

6.1. Introduction

6.2. Puissance et énergie

6.3. Réfrigération

6.3.1. Introduction

6.3.2. Théorie de la pompe à chaleur

6.3.3. Le réfrigérateur et le congélateur en pratique

6.3.4. Climatisation

6.4. Treuils ou winchs électriques, guindeau et propulseur d'étrave

6.5. Laver le linge et faire la vaisselle sur batterie ?

6.6. Table de cuisson électrique sur batterie ?

6.7. Le compresseur de plongée

6.8. Comment éliminer le courant d'appel des moteurs électriques

6.9. Conclusion

7. LE GROUPE ELECTROGENE

7.1 Moteur diesel avec générateur 50 Hz ou 60 Hz

7.1.1. Beaucoup de charge est préférable à peu de charge

7.1.2. Un système hybride

7.1.3. Et n'oubliez pas le courant de quai (limité)

7.1.4. 3000 tr/min contre 1500 tr/min

7.2 Groupe courant continu

8. L'ÉLECTRICITÉ AUTONOME : UNE AUTRE FACON D'ATTAQUER LE PROBLEME

Ce chapitre nous amène au thème central de ce livre : l'optimisation de la sécurité et du confort, tout en réduisant simultanément le poids et les dimensions du système d'énergie.

8.1. Introduction

8.2. La nouvelle technologie rend le concept de CC plus attractif

- 8.2.1. Le concept CC
- 8.2.2. Groupe électrogène CC
- 8.2.3. Courant illimité du convertisseur

8.3. Le concept CA, amélioré avec *PowerControl*

- 8.3.1. Le concept CA
- 8.3.2. Le concept CA avec période de silence
- 8.3.3. *PowerControl*

8.4. Nouveau : *Powerassist*, le concept CA avec soutien de batterie

- 8.4.1. *PowerAssist*
- 8.4.2. Autres avantages des convertisseurs/chargeurs type Phoenix Multi
- 8.4.3. Courant de quai

8.5. Une autre façon d'attaquer le problème

- 8.5.1. Besoin d'énergie quotidien
- 8.5.2. Capacité de la batterie
- 8.5.3. Courant de quai

9. BESOIN EN ÉNERGIE JUSQU'À 4 kWh PAR JOUR (170 Watt en moyenne)

9.1. Introduction

9.2. Equipement de base et consommation d'électricité

- 9.2.1. Instruments de navigation
- 9.2.2. GPS
- 9.2.3. Mobilophone maritime (VHF)
- 9.2.4. Feu de tête de mât tricolore ou feu de mouillage
- 9.2.5. Pilote automatique
- 9.2.6. Récepteur de radiodiffusion
- 9.2.7. Éclairage de cabine
- 9.2.8. Réfrigérateur

9.3. Consommation pendant un jour de navigation

9.4. Au mouillage ou amarré sans raccordement 230 V

9.5. Un peu de luxe à bord

- 9.5.1. Système de navigation électronique
- 9.5.2. Émetteur à ondes courtes (BLU)
- 9.5.3. Radar
- 9.5.4. Micro-ondes
- 9.5.5. Chauffage
- 9.5.6. Climatisation
- 9.5.7. Dessalinisateur

9.6. Charger la batterie

- 9.6.1. Avec l'alternateur du moteur
- 9.6.2. Augmenter la capacité de la batterie
- 9.6.3. Un deuxième alternateur ou un alternateur plus puissant
- 9.6.4. Énergie solaire
- 9.6.5. Énergie éolienne
- 9.6.6. Génératrice entraînée par sillage (sur arbre d'hélice ou traction)
- 9.6.7. Courant de quai

9.7. Conclusion

10. BESOIN EN ÉNERGIE JUSQU'À 14 kWh PAR JOUR (600 W en moyenne)

10.1. Introduction

10.2. Équipement : le minimum

- 10.2.1. Instruments de navigation
- 10.2.2. Feux de navigation et feux de mouillage
- 10.2.3. Pilote automatique
- 10.2.4. Réfrigérateur et congélateur
- 10.2.5. Éclairage
- 10.2.6. Récepteur de radiodiffusion
- 10.2.7. Autres consommateurs

10.3. En route

10.4. Au mouillage ou amarré sans courant de quai

10.5. Un peu de confort à bord

- 10.5.1. Bouilloire électrique
- 10.5.2. Table de cuisson électrique
- 10.5.3. Petite machine à laver
- 10.5.4. Petit lave-vaisselle

10.6. Génération d'électricité

- 10.6.1. L'alternateur sur le moteur de propulsion
- 10.6.2. Sources d'énergie
- 10.6.3. Groupe électrogène
- 10.6.4. *PowerControl* et *PowerAssist*
- 10.6.5. Encore moins de courant de quai : le concept CC
- 10.6.6. Le groupe électrogène CA sur un bateau relativement petit : conclusion
- 10.6.7. Le groupe électrogène de courant continu ou générateur CC
- 10.6.8. Rendement énergétique du groupe électrogène
- 10.6.9. L'électricité sur un bateau à moteur de 9 à 15 mètres ou un bateau au mouillage

10.7. Conclusion

- 10.7.1. La solution conventionnelle : un groupe 12 kW
- 10.7.2. Une meilleure solution : poids et volume réduits avec un groupe 6 kW et *PowerAssist*, ou un groupe CC 5 kW

11. BESOIN EN ÉNERGIE JUSQU'À 48 kWh PAR JOUR (2 kW en moyenne)

11.1. Introduction

11.2. Les consommateurs les plus importants

11.3. Génération d'électricité

11.3.1. Le groupe tourne 24 heures sur 24

11.3.2. Ajouter une batterie pour une période de silence

11.3.3. Des Multis parallèles, la fonction *PowerControl*, et le concept CC pour courant de quai

11.3.4. Un pas de plus avec le MultiPlus et la fonction *PowerAssist*

11.3.5. Le groupe CC

11.3.6. Un petit groupe CC auxiliaire afin de réduire le nombre d'heures de fonctionnement du groupe primaire ainsi que la capacité nécessaire de la batterie

11.4.1 Conclusion

11.4.1. Le groupe 20 kW avec période de silence

11.4.2. *PowerControl* et le concept CC pour le courant de quai, avec groupe auxiliaire pour réduire la capacité de la batterie

11.4.3. Un groupe 10 kW avec *PowerAssist*, le concept CC pour le courant de quai et un générateur auxiliaire CC

12. BESOIN EN ÉNERGIE JUSQU'À 240 kWh PAR JOUR (10 kW en moyenne)

12.1. Introduction

12.2. Les consommateurs les plus importants

12.3. Génération d'énergie

12.3.1. Groupe électrogène

12.3.2. Installer une batterie pour créer une période de silence, avec utilisation du groupe soutenue par la batterie (*PowerAssist*)

12.3.3. Un petit groupe CA auxiliaire 8 kW afin de réduire le nombre d'heures de fonctionnement du groupe principal ainsi que la capacité nécessaire de la batterie

12.4. Une comparaison des variantes pour une utilisation de 10 kW en moyenne

13. CONCLUSION

13.1. La consommation d'électricité à bord

13.2. Produire de l'énergie

13.3. Le concept CC

13.4. *PowerAssist* : le concept CA avec soutien de batterie

13.5. La batterie

1. INTRODUCTION

Canada Solar fournit déjà depuis 25 ans des composants et des systèmes pour l'électricité autonome. Il peut s'agir de systèmes pour des bateaux de plaisance ou la marine marchande, sur mer ou en eaux douces, des habitations isolées, beaucoup de types de véhicules ainsi qu'une série presque illimitée d'autres applications, souvent inattendues.

Par expérience, nous savons que la génération et le stockage d'énergie électrique est une affaire complexe. Les composants d'un système autonome sont chers et vulnérables. La batterie, par exemple – support de stockage indispensable dans un système autonome – se révèle souvent être rapidement épuisée, ce qui provoque une “panne de courant” et des dommages suite à une décharge excessive. Les développements récents dans le domaine de l'électricité à bord des bateaux de plaisance ne facilitent pas les choses. La quantité d'appareils (ménagers) à bord augmente rapidement, alors que l'espace et le poids disponibles pour la génération et le stockage d'énergie sont réduits au strict minimum. L'espace habitable et la navigation ont tout naturellement une plus haute priorité.

Les besoins d'électricité de plus en plus importants ont conduit au développement de nouveaux produits et concepts. Dans ce livre, ces nouveaux produits et concepts seront présentés en ciblant surtout sur une intégration optimale des composants du système et sur l'utilisation quotidienne de tout le système. Lors de l'explication des composants du système, les marques déposées seront seulement mentionnées quand les produits sont uniques, c'est à dire, exclusivement disponibles sous la marque déposée en question, ou quand d'autres marques ne sont disponibles que très difficilement. Les produits uniques de Canada Solar sont les suivants :

- Des **chargeurs de batterie** avec un logiciel "intelligent" pour optimiser automatiquement la charge.

- **Convertisseurs et convertisseurs/chargeurs combinés avec possibilité de couplage en parallèle**

L'option de couplage en parallèle signifie qu'il n'y a plus de restriction en ce qui concerne la quantité de courant alternatif qui peut être fourni par une batterie. Comme nous allons le démontrer, cela donne la possibilité d'alimenter à partir de la batterie tous les appareils ménagers habituels, y compris une machine à laver et même une table de cuisson électrique. Bien que la consommation de pointe de ces appareils soit très élevée, la consommation énergétique totale est parfaitement maîtrisable et beaucoup plus faible que nous le pensions

- **PowerControl** est une fonction du **Phoenix Multi** Victron, souvent ignorée, mais très pratique. Le Multi peut fournir énormément de courant et donc charger des grandes batteries d'accumulateurs. Cela signifie une lourde charge (environ 2 kW ou presque 10 A par Multi) pour la prise de quai ou le groupe électrogène. Avec le tableau de commande Phoenix Multi Control il est possible de régler soit un courant de quai soit un courant de groupe maximal. Le Multi tient compte des autres consommateurs d'électricité et n'utilise pour recharger la batterie que le courant 'restant'.

- **PowerAssist** PowerAssist est une fonction distincte du **Phoenix MultiPlus**, qui donne une dimension supplémentaire au principe du PowerControl. Si la demande dépasse la capacité du groupe électrogène ou de la prise de quai, le convertisseur du MultiPlus prend un complément d'énergie dans les batteries et le met instantanément à disposition. Il est ainsi possible de faire face momentanément à des intensités de pointe supérieures à la puissance d'un groupe ou d'un raccordement à quai. Lorsque la puissance demandée diminue, l'excédent est utilisé pour recharger la batterie.

Bien que cet aperçu soit surtout orienté pour les bateaux de plaisance, la plupart des solutions proposées peuvent également être utilisées pour d'autres systèmes d'énergie autonome, comme les habitations isolées, les camping-cars ou les véhicules spécialisés.

2. LA BATTERIE : PRÉVENIR LE VIEILLISSEMENT PRÉCOCE

2.1. Introduction

J'aime les moteurs, et surtout les moteurs d'autrefois, sans fioritures électroniques. S'ils ne marchent pas correctement, on peut regarder, écouter, sentir et les démonter s'il le faut. Les pièces peuvent être remplacées, réparées ou révisées. Puis on assemble le tout, et ça marche à nouveau !

Avec une batterie, c'est impossible. La batterie est un produit mystérieux. De l'extérieur, on ne peut rien savoir sur la qualité, le vieillissement éventuel ou l'état de charge. Il n'est même pas possible de la démonter pour évaluer le vieillissement interne. Ouvrir en la sciant serait possible, mais la batterie serait alors définitivement inutilisable ; seulement des spécialistes peuvent en analyser le contenu pour éventuellement connaître la cause du problème.

Si une batterie ne marche plus correctement, elle doit être remplacée. La réparer est impossible.

La batterie coûte chère, elle prend de la place et est très lourde. Imaginez-vous : avec seulement 10 litres (= 8,4 kg) de gasoil et un groupe électrogène diesel, vous pouvez charger une batterie de 24 V 700 Ah (contenu d'énergie $24 \times 700 = 16,8$ kWh). Cette batterie a un volume de 300 dm³ (= 300 litres) et pèse 670 kg !

Par ailleurs, les batteries sont très vulnérables. Trop les charger ou pas assez, les décharger à l'excès, les charger trop rapidement, une température trop élevée.... Tout peut arriver et les conséquences en sont désastreuses.

L'objectif de ce chapitre est d'expliquer pourquoi les batteries vieillissent parfois trop rapidement et ce que vous pouvez faire pour leur donner une durée de vie plus longue.

Et si vous voulez regarder à l'intérieur d'une batterie endommagée, ne l'ouvrez pas vous-même. C'est un travail très salissant qui vous coûtera un pantalon (une goutte d'acide sulfurique sur votre pantalon, et vous pouvez le jeter!) Vous pouvez aussi bien acheter le livre de Nigel Calder, "Boatowner's Mechanical and Electrical Manual", et étudier les nombreuses photographies détaillées et explicatives de batteries endommagées dans le 1^{er} chapitre de ce livre.

2.2. La chimie de la batterie

2.2.1. La décharge

Quand un élément se décharge, il se forme du sulfate de plomb sur les plaques positives et négatives, par incorporation d'acide en provenance de la solution électrolytique. La quantité d'électrolyte dans les éléments reste pratiquement identique. Cependant, l'acidité de l'électrolyte diminue, ce qui est perceptible au changement de la densité.

2.2.2. La charge

Lors de la charge, l'opération inverse a lieu. L'acide se libère sur les deux plaques, ce qui fait que la masse active est transformée en oxyde de plomb sur la plaque positive et en plomb poreux et spongieux sur la plaque négative. Quand le cycle de charge se termine et que le sulfate de plomb est en majeure partie transformé, une partie de l'énergie apportée sera utilisée pour séparer l'eau en hydrogène et oxygène gazeux. Ceci est un mélange extrêmement explosif, ce qui explique pourquoi la présence de flammes ou d'étincelles à proximité d'une batterie peut être très dangereuse lors de la charge. C'est la raison pour laquelle **un local à accumulateurs doit toujours être efficacement aéré.**

2.2.3. Le transport interne par diffusion

Quand une batterie se décharge, les ions se déplacent par la solution électrolytique et par la matière active des plaques, afin de pouvoir entrer en contact avec le plomb et l'oxyde de plomb qui n'a pas encore été transformé chimiquement en sulfate de plomb. Ce transport d'ions au travers de la solution électrolytique est appelé diffusion. Quand la batterie est en charge, le procédé de diffusion inverse se produit. La diffusion s'effectue relativement lentement et, comme vous pouvez imaginer, la réaction chimique a d'abord lieu à la surface des plaques et seulement après (et plus lentement aussi) bien à l'intérieur de la matière active des plaques.

2.2.4. La durée de vie

Selon la construction et l'utilisation, la durée de vie de la batterie peut varier de quelques années à 10 ans et même plus.

Voici les raisons les plus importantes du vieillissement des batteries :

- **Perte de masse.** Un « cyclage » intensif (= décharger et recharger la batterie) est la principale cause de perte de masse. L'effet de la transformation chimique répétitive de la masse active dans les plaques a tendance à diminuer la cohésion ; la matière active se détache alors des plaques et tombe au fond de la batterie.

- **Corrosion** de la grille de la plaque positive. Cela arrive lors de la charge de la batterie, surtout à la fin du cycle de charge quand la tension de la batterie est élevée. C'est un processus lent, mais continu, durant la charge d'entretien de la batterie. La corrosion fait que la résistance interne augmente et aura pour résultat final la décomposition des plaques positives.

- **Sulfatation.** Contrairement au deux processus de vieillissement mentionnés ci-dessus, la sulfatation peut être évitée. Quand une batterie se décharge, la masse active est transformée en de tous petits cristaux de sulfate de plomb aussi bien dans les plaques positives que dans les négatives. Si la batterie n'est pas rechargée rapidement, ces cristaux ont tendance à croître et à se durcir pour former une couche impénétrable qui ne peut être retransformée en matière active. Le résultat est une perte de capacité progressive, jusqu'à ce que la batterie soit devenue inutilisable.

2.3. Les types de batterie plomb-acide les plus courants

2.3.1. Plomb-antimoine et plomb-calcium

Le plomb est allié à l'antimoine (avec une faible addition de quelques autres éléments tels que le sélénium ou l'étain) ou au calcium, pour que la matière devienne plus durable et plus facile à traiter. Pour l'utilisateur, il est important de savoir que, par rapport aux batteries plomb-calcium, les batteries alliées à l'antimoine présentent une autodécharge plus élevée et nécessitent une tension de charge plus élevée. Par contre elles peuvent aussi supporter un plus grand nombre de cycles de charge/décharge.

2.3.2. Les batteries dites 'ouvertes' et les batteries dites 'étanches'

Les batteries 'ouvertes' contiennent de l'électrolyte liquide. Dans la batterie étanche, l'électrolyte est généralement gélifié (la batterie gel) ou absorbé en matière microporeuse (la batterie AGM, **A**bsorbent **G**lass **M**at).

Dans le cas d'une batterie ouverte il est normal qu'un bouillonnement apparaisse en fin de charge. Il s'agit de gaz hydrogène et oxygène qui se dégagent, voir paragraphe 2.2.2.

Dans le cas des batteries étanches, l'oxygène gazeux qui se forme sur les plaques positives, se déplace vers les plaques négatives, où, après une réaction chimique compliquée, il se combine à nouveau à l'hydrogène pour redevenir de l'eau (donc strictement : il faudrait parler de batteries à recombinaison de gaz). Il n'y a pratiquement pas de gaz qui s'échappe de la batterie **sauf lorsque la tension et le courant de charge sont trop élevés** ! Le gaz s'échappe alors par une soupape de sécurité. C'est pourquoi les batteries étanches sont aussi appelées VRLA (Valve Regulated Lead Acid). Les batteries dites étanches ne sont donc pas vraiment étanches ! Si, suite à une surcharge, il y a régulièrement du gaz qui s'échappe de la batterie étanche, l'électrolyte se dessèchera et la batterie deviendra inutilisable.

On peut distinguer les différentes batteries en se basant sur leur construction et leur utilisation, comme décrit dans les paragraphes suivants.

2.3.3. La batterie de démarrage à plaque plane (ouverte)

C'est la batterie utilisée dans les voitures. Cette batterie a été développée pour un courant de décharge élevé de très courte durée (le démarrage d'un moteur) et c'est la raison pour laquelle elle a des plaques fines avec une grande surface. En cas de décharge profonde répétitive, les plaques peuvent se déformer et une perte de masse se produira rapidement. Tout de même, les batteries de démarrage à plaque plane "heavy duty" (batteries camion) sont souvent utilisées comme batterie de servitude sur des bateaux de plaisance de petite taille.

2.3.4. La batterie semi-traction à plaque plane (ouverte)

Cette batterie possède des plaques plus épaisses ainsi que de meilleurs séparateurs entre les plaques pour prévenir la déformation et la perte de masse en cas d'utilisation cyclique.

2.3.5. La batterie "traction" (ouverte)

Ces batteries aux plaques tubulaires sont extrêmement robustes et adaptées au « cyclage » journalier. Les batteries de traction sont utilisées par exemple dans les chariots élévateurs, où la batterie est déchargée tous les jours de 60 à 80% de sa capacité et rechargée chaque nuit.

En cas de « cyclage » intensif, la batterie de traction doit subir périodiquement une charge d'égalisation. La charge d'égalisation consiste à poursuivre la recharge de la batterie quelques heures de plus avec relativement peu de courant, après avoir terminé le cycle de charge normal. La tension de charge alors monte. La hauteur que la tension peut atteindre dépend de la composition chimique et de l'âge de la batterie.

Une tension de charge élevée est nécessaire, entre autres, pour transformer en matière active le sulfate éventuellement restant et pour prévenir la **stratification** de la solution électrolytique. L'acide sulfurique (H_2SO_4) qui se forme pendant la charge de la batterie, possède une densité plus élevée que celle de l'eau et descend donc au fond du bac ; la concentration d'acide au fond de la batterie devenant alors plus importante que celle du niveau supérieur de la batterie. Le bouillonnement pendant la charge d'égalisation permet à l'électrolyte d'être à nouveau bien mélangée.

Les éléments des batteries à plaques tubulaires sont étroits et hauts. Dans les batteries à plaque plane, les éléments sont justement plats et bas. C'est pourquoi il faut beaucoup plus de bouillonnement dans une batterie à plaques tubulaires que dans une batterie à plaque plane pour bien mélanger l'électrolyte.

2.3.6. La batterie gélifiée (VRLA)

Ici, l'électrolyte est immobilisé en tant que gel. Cette batterie est très connue sous le nom Sonnenschein Dryfit A200, Sportline ou Exide Prevailer.

2.3.7. La batterie AGM (VRLA)

AGM signifie Absorbent Glass Mat. Dans cette batterie, l'électrolyte est absorbé par une natte en fibre de verre, serrée entre les plaques. Dans une batterie AGM, les porteurs de charge, les ions hydrogènes (H_2) et les ions sulfate (SO_4), se déplacent plus facilement entre les plaques que dans une batterie gel. C'est pourquoi une batterie AGM est plus adaptée pour fournir un courant très élevé de courte durée, qu'une batterie gel.

2.3.8. La batterie à éléments cylindriques (VRLA)

Cette batterie, connue sous le nom Optima (Exide possède un produit similaire), est une variante de la batterie AGM. Chaque élément est un assemblage enroulé d'une plaque positive et d'une plaque négative avec une natte entre les deux, dans laquelle l'électrolyte est absorbé. Le résultat est une grande solidité mécanique et une très faible résistance électrique. La batterie à éléments cylindriques peut fournir à courte durée un courant très élevé ; elle supporte des courants de charge élevés sans échauffement et, en tant que batterie VRLA, résiste à une tension de charge très élevée (jusqu'à 15 Volt pour une batterie de 12 Volt) sans qu'il y ait du gaz qui s'échappe.

2.4. Fonction et utilisation de la batterie

Dans un système d'énergie autonome, la batterie fonctionne comme tampon entre les sources de courant (chargeur de batterie, plaques solaires, éolienne, alternateurs) et les consommateurs. Dans la pratique, cela signifie une utilisation cyclique, mais ici dans une variante "irrégulière" et très spéciale, contrairement à l'exemple du chariot élévateur, où le cycle opérationnel est tout à fait prévisible.

Par exemple : sur un bateau de plaisance, les situations suivantes peuvent se produire :

- Le bateau est au mouillage ou navigue dans une jolie baie. Les passagers ne veulent pas de bruit, donc toute l'électricité est fournie par la batterie. Une ou deux fois par jour, le moteur de propulsion ou le groupe diesel est mis en route pendant quelques heures pour charger suffisamment la batterie de servitude pour la prochaine période de silence. Il s'agit d'un « cyclage » pendant lequel le temps de charge est trop court pour complètement recharger la batterie.
- Pendant plusieurs heures d'affilée le bateau navigue au moteur. Les alternateurs ont alors le temps de charger complètement la batterie.
- Le bateau est à quai. Les chargeurs de batteries sont raccordés au courant de quai ; la batterie est 24 heures sur 24 sous charge. Si on fait usage du concept CC (= Courant Continu, voir paragraphe 8.2), il peut y avoir quotidiennement plusieurs légères décharges.
- Pendant l'hiver, le bateau n'est pas utilisé. Les batteries s'auto déchargent lentement (voir paragraphe 2.5.10), elles sont sous charge d'entretien d'un chargeur de batterie ou sont gardées chargées au moyen d'un panneau solaire ou d'une éolienne.

Le nombre de cycles annuels, la température ambiante et beaucoup d'autres facteurs influençant sur la durée de vie d'une batterie, peuvent varier selon l'utilisateur.

Tous ces facteurs seront traités brièvement ci-dessous.

2.5. La batterie plomb-acide en pratique

2.5.1. Combien coûte une batterie?

Ici nous donnons une estimation des prix. En plus de toutes les considérations de qualité et d'utilisation, le prix est, naturellement, lui aussi, important.

Type de batterie	Application	Tension de système appliquée, capacité et contenu d'énergie			Indication de prix H.TVA.	Indication de prix par kWh
		V	Ah	kWh		
Démarrage 'ouverte'	Démarrer	12	100	1.2	100	80
Éléments cylindriques (VLRA)	Démarrer, propulseur d'étrave	12	60	0.72	250	350
Semi-traction 'ouverte'	Batterie de service jusqu'à environ 600 Ah	12	200	2.4	300	125
Batterie AGM (VRLA)	Batterie de service jusqu'à environ 600 Ah. A la fois démarrage et propulseur d'étrave	12	230	2.8	600	210
Traction (plaques tubulaires) 'ouverte'	Batterie de service jusqu'à environ 2000 Ah	24	1000	24	4.500	190
Sonnenschein Dryfit A200 gel (VRLA)	Batterie de service jusqu'à environ 600 Ah	12	200	2.4	500	210
Sonnenschein Dryfit A600 gel (VRLA)	Batterie de service jusqu'à environ 1500 Ah	24	1500	36	11.000	305

A partir du tableau on peut constater que les coûts varient considérablement, en fonction du choix de batterie, et que les batteries ouvertes sont moins chères que les batteries étanches.

Les batteries étanches par contre, offrent beaucoup de facilités d'emploi :

- elles sont sans entretien.
- elles ne gazent pas ou presque pas (à condition que la batterie ne soit pas chargée avec une tension trop élevée).
- elles peuvent être installées, pour cette raison, dans des endroits difficilement accessibles.

D'autre part, les batteries étanches résistent moins bien à la surcharge (sauf la batterie à éléments cylindriques). La surcharge provoque des dégagements gazeux (par la soupape de sécurité) ayant pour résultat une perte d'eau qui ne peut plus être récupérée. Les conséquences en sont une perte de la capacité et un vieillissement prématuré .

2.5.2. Dimensions et poids

Type de batterie	V	Ah	kWh	Volume dm ³	Poids kg	Volume spécifique Wh / dm ³	Poids spécifique Wh / kg
Démarrage 'ouverte'	12	100	1.2	16	28	75	43
Eléments cylindriques (VRLA)	12	60	0.72	8.5	17.2	81	42
Semi-traction 'ouverte'	12	200	2.4	33	60	73	40
Batterie AGM (VRLA)	12	230	2.8	33	62	85	45
Traction (plaques tubulaires) 'ouverte'	24	1000	24	280	770	85	32
Sonnenschein Dryfit A200 gel (VRLA)	12	200	2.4	33	70	72	34
Sonnenschein Dryfit A600 gel (VRLA)	24	1500	36	600	1440	60	25

Ce tableau révèle que les batteries sont lourdes et peu commodes.

Pour revenir sur la comparaison faite dans le paragraphe 2.1 :

Comparées à l'énergie qui se libère lors de la combustion du gasoil par exemple, les batteries restent à part. Lors de la combustion, 10 litres de gasoil (poids 8,4 kg), donnent 100 kWh d'énergie thermique. Donc un générateur diesel peut générer 20 kWh d'énergie électrique avec 10 litres de gasoil et un rendement de 20% en moyenne. C'est l'énergie qu'il faut pour charger une batterie de 24 V et 700 Ah. Une telle batterie a un volume de 300 dm³ (= 300 litres) et pèse 670 kg !

Une autre comparaison frappante : chauffer de l'eau. Pour faire bouillir 1 litre (= 1 kg) d'eau dans une bouilloire électrique, il faut 0,1 kWh. Pour fournir ce 0,1 kWh nécessaire, on a besoin d'une batterie d'environ 4 kg !

2.5.3. L'effet du régime de décharge sur la capacité disponible de la batterie

La capacité disponible d'une batterie dépend du régime de décharge. Plus une batterie est déchargée rapidement (autrement dit, plus le courant de décharge est élevé), plus la capacité disponible (exprimée en Ampère-heures ou Ah) est faible. Cela est en rapport avec le procédé de diffusion (par. 2.2.3). Généralement, la capacité est indiquée pour un temps de décharge de 20 heures (courant de décharge $I = C / 20$)

Pour une batterie de 200 Ah, cela signifie que la capacité nominale peut être livrée en cas d'un courant de décharge de 200 Ah / 20 heures = 10 Ampères.

Avec un courant de décharge de 200 A, la même batterie se "vide" beaucoup plus rapidement. Une batterie gel de 200 Ah, par exemple, possède alors une capacité disponible de seulement 100 Ah, c'est-à-dire qu'elle sera déchargée après 30 minutes. (voir aussi chapitre 3 : le moniteur de batterie).

Les tableaux suivants donnent une impression de la capacité en fonction du régime de décharge.

Dans la 2^e colonne du premier tableau, la capacité nominale indiquée par le fabricant est mentionnée ensemble avec le temps de décharge complémentaire, qui est souvent de 20 heures, mais cela peut être aussi bien 10 ou 5 heures.

A partir des tableaux, nous pouvons constater comment la capacité disponible diminue avec un courant de décharge croissant ; nous pouvons également constater que les batteries AGM (surtout la batterie à éléments cylindriques) sont plus performantes que les batteries gel quand le courant de décharge est élevé.

Type	Courant de décharge	Capacité nominale et temps de décharge correspondant	Temps de décharge	Courant de décharge	Capacité effective 1.83 V / cellule (11 V)		Temps de décharge
					Ah	%	
	Ampères (nominal)		heures	A (C / 5)	Ah	%	heures
Démarrage 'ouverte'	5	100 Ah / 20 h	20				
Éléments cylindriques (VRLA)	2.8	56 Ah / 20 h	20	11.2	52	93	4.6
Semi-traction 'ouverte'	10	200 Ah / 20 h	20	40	150	75	3.75
Batterie AGM (VRLA)	11.5	230 Ah / 20 h	20	46	198	86	4.3
Traction (plaques tubulaires) 'ouverte'	200	1000 Ah / 5 h	5	200	1000	100	5
Sonnenschein Dryfit A200 gel (VRLA)	10	200 Ah / 20 h	20	40	158	79	4
Sonnenschein Dryfit A600 gel (VRLA)	150	1500 Ah / 10 h	10	300	900	60	3

Type	Courant de décharge	Capacité effective 1.83 V / élément (11 V)		Temps de décharge	Courant de décharge	Capacité effective 1.75 V / élément (10.5 V)		Temps de décharge
		Ah	%			Minutes	A (C / 1)	
	A (C / 2)	Ah	%	Minutes	A (C / 1)	Ah	%	Minutes
Démarrage 'ouverte'								
Éléments cylindriques (VRLA)	28	43	77	92	56	42	75	45
Semi-traction 'ouverte'	100	110	55	66	200	90	45	27
Batterie AGM (VRLA)	115	157	68	82	230	142	62	37
Traction (plaques tubulaires) 'ouverte'	500	700	70	80	1000	400	40	24
Sonnenschein Dryfit A200 gel (VRLA)	100	120	60	72	200	100	50	30
Sonnenschein Dryfit A600 gel (VRLA)	750	375	25	15	1500	0*	0	0*

* Avec un courant de décharge de 1500 A (C / 1), la tension d'une batterie A600 baisse presque immédiatement à 1,65 V par élément (c'est à dire 9,9 V pour un système de 12 V et 19,8 V pour un système de 24 V).

Le courant de décharge est souvent exprimé au rapport de la capacité nominale. Pour une batterie de 200 Ah, C / 5, par exemple, veut dire un courant de décharge de 40 A (= 200 Ah / 5 H)

2.5.4. Capacité et température

La capacité réelle d'une batterie varie inversement avec la température.

0 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
80 %	92 %	95 %	100 %	103 %	105 %

2.5.5. Vieillesse prématuré 1. Décharge trop profonde de la batterie.

Plus les batteries sont déchargées profondément, plus elles vieillissent rapidement (suite à une perte accélérée de la masse active, voir par. 2.2.4.) Quand une certaine limite est dépassée (environ 80 % de décharge), le processus de vieillissement s'intensifie de façon disproportionnée. De plus, si une batterie est laissée déchargée, ses plaques se mettent à sulfater (2.2.4.).

Comme cela a été expliqué dans le paragraphe 2.2.4, une batterie vieillit, même quand elle est chargée, sans être utilisée, surtout suite à la corrosion de la grille des plaques positives.

Le tableau suivant donne un aperçu général sur le nombre de cycles de charge/décharge que les batteries peuvent supporter jusqu'à la fin de leur vie et sur leur extrême sensibilité à la sulfatation et à la corrosion.

Type	Nombre de cycles jusqu'à la fin de la durée de vie		Sulfatation en cas de décharge à 100 %	Durée de vie quand la batterie est presque en permanence sous charge et pratiquement jamais déchargée (température ambiante 20°C) Années
	Profondeur de décharge 80 %	Profondeur de décharge 60 %		
Démarrage 'ouverte'	Ne convient pas à l'utilisation cyclique			5
Éléments cylindriques (VRLA)	400	650	En quelques jours irrémédiablement sulfatée	10
Semi-traction 'ouverte'	200	350	En quelques jours irrémédiablement sulfatée	5
Batterie AGM (VRLA)	250	450	Survit au maximum 1 mois en état court-circuité	4 - 10
Traction (plaques tubulaires) 'ouverte'	1500	2500	Survit au maximum 1 mois en état déchargé	10 – 15
Sonnenschein Dryfit A200 gel (VRLA)	250	450	Survit au maximum 1 mois en état déchargé	4 – 5
Sonnenschein Dryfit A600 gel (VRLA)	600	900	Survit au maximum 1 mois en état déchargé	15 – 18

Le nombre de cycles de charge/décharge qu'une batterie peut accepter dépend fortement de la profondeur de la décharge (anglais : Depth of Discharge, = DoD)

On considère que les batteries ont atteint la fin de leur durée de vie quand la capacité est réduite à 80% de la capacité nominale.

Bien que la plupart des batteries puissent se rétablir après une décharge complète, c'est tout de même très dommageable pour sa durée de vie. Les batteries ne doivent **jamais** être déchargées complètement et surtout ne pas être laissées en état de décharge. Notez aussi que la tension d'une batterie en utilisation n'est pas un bon critère pour le niveau de décharge. La tension de la batterie est trop influencée par d'autres facteurs, tel que le courant de décharge et la température. Ce n'est que quand la batterie est presque complètement déchargée (DoD 80% jusqu'à 90%) que la tension baissera rapidement. La batterie doit être rechargée **avant** que cela se produise. C'est pourquoi il est fortement conseillé d'utiliser un moniteur de batterie pour bien gérer les grands parcs de batteries assez coûteux (chapitre 3).

2.5.6. Vieillesse prématuré 2. Charge trop rapide et charge partielle.

La plupart des batteries acceptent un courant de charge élevé jusqu'à ce que la tension de gazage soit atteinte. Cependant un courant de charge élevé réduira considérablement la durée de vie de la plupart des batteries. La raison en est la dégradation accélérée de la cohésion de la matière active. En général, il est conseillé de limiter le courant de charge à $C / 5$, c'est-à-dire à 20 % de la capacité nominale.

Par ailleurs, si une batterie est chargée avec un courant supérieur à $C / 5$, la température peut augmenter considérablement. Une compensation de température de la tension de charge est alors une nécessité absolue (voir par. 2.5.9). Selon ma propre expérience, la recharge d'une batterie de 12 V 100 Ah, déchargée à 50 %, avec un courant de 33 A ($C / 3$) aboutit à une augmentation de température de 10 à 15 °C. La température maximum est atteinte à la fin de l'étape principale. Les batteries plus grandes deviennent même encore plus chaudes (parce que la quantité de chaleur produite augmente avec le volume et l'émission de la chaleur augmente avec la surface).

Un exemple :

Supposons qu'un voilier de 15 mètres soit équipé d'une batterie de servitude de 24 V avec une capacité de 800 Ah. Le courant de charge maximal serait alors de $C / 5 = 160$ A. En deux heures, 320 Ah pourraient alors être chargés. Si au même moment il y a une consommation de 15 A, le chargeur devrait fournir 175 A. Sur les 22 heures restantes de la journée, $320 \text{ Ah} / 22 \text{ heures} = 14,5$ A en moyenne peuvent alors être utilisés, ce qui signifie une décharge de seulement $320 / 800 = 40$ %. Cela paraît peu, mais hélas c'est le maximum réalisable, si la période, dans laquelle le générateur est utilisé, est limitée à 2 heures. La batterie, utilisée de cette façon, se charge en effet jusqu'à 80 % environ (au-delà de ce pourcentage, la tension de charge augmente et le courant de charge diminue) et se décharge jusqu'à environ 60 %. Décharger encore plus et charger plus rapidement conduirait à un raccourcissement considérable de la durée de vie.

Dans l'exemple décrit ci-dessus, la batterie est utilisée dans un **état de charge partielle** (entre 20 % et 60 % de la charge totale).

Il y a deux raisons principales pour que le nombre de cycles d'utilisation en état partiellement chargé doit être limité :

1) Stratification de l'électrolyte

Ce problème s'applique en particulier aux batteries ouvertes, voir par. 2.3.5.

2) Déséquilibre de l'état de charge des éléments.

Les éléments d'une batterie ne sont jamais tout à fait identiques. Certains ont un peu moins de capacité. Il y a aussi certains éléments qui se chargent moins facilement (voir § 3.4). En cas de « cyclage » en état de charge partielle, ces éléments "plus faibles" seront de moins en moins chargés. Afin de recharger complètement l'élément le plus faible, les autres éléments devront être surchargés, voir le § 4.3.

La stratification et le déséquilibre de l'état de charge des éléments se produisent plus rapidement en cas de décharges très profondes et en cas de courant de charge très élevé. Afin de prévenir le déséquilibre excessif des éléments, une batterie doit être chargée complètement au moins tous les 30 à 60 cycles.

La charge d'une batterie traction devra être suivie par une charge d'égalisation, voir le § 4.3.

2.5.7. Vieillesse prématuré 3. Charge insuffisante

Comme décrit dans le § 2.2.4., la sulfatation a lieu quand une batterie est laissée dans un état de décharge complète. La sulfatation apparaîtra, mais plus lentement, également quand une batterie est laissée en état de décharge partielle. C'est pourquoi il est recommandé de ne jamais laisser une batterie déchargée à plus de 50 %, et de régulièrement recharger la batterie à 100 %.

La recharge insuffisante ajoutée à une décharge excessive est le facteur principal du vieillissement prématuré d'une batterie.

2.5.8. Vieillessement prématuré 4. Surcharge..

La surcharge provoque un bouillonnement excessif et de ce fait aussi une perte d'eau. Pour les batteries ouvertes, la perte d'eau peut être compensée en rajoutant de l'eau déminéralisée (mais la corrosion accélérée des plaques positives, ayant lieu en même temps, est irréparable). Les batteries étanches sont plus sensibles à la surcharge puisque la perte d'eau ne peut être compensée. Une cause courante de surcharge est l'absence de compensation de température (voir §4.4.). Une autre raison peut être la charge simultanée de plusieurs batteries à l'aide d'un répartiteur de charge à diodes (voir chapitre 5).

2.5.9. Vieillessement prématuré 5. Température.

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

- La charge et la décharge rapides échauffent la batterie (voir § 2.5.6 et 2.5.8).
 - L'emplacement de la batterie. Dans la salle des machines d'un bateau, la température peut aller au-delà de 50°C. Dans un véhicule, la température peut varier de - 20°C à + 50°C.
- Une température de fonctionnement élevée mène à un vieillissement accéléré, car les processus chimiques de décomposition dans la batterie se déroulent plus rapidement. Généralement, la durée de vie d'une batterie est indiquée par le fabricant pour une température ambiante de 20°C. La durée de vie d'une batterie est **réduite de moitié** pour chaque élévation de température de 10°C. Le tableau ci-dessous donne une impression de la durée de vie pour des températures différentes.

Type batterie	Durée de vie quand la batterie est continuellement sous charge (années)		
	20°C	25°C	30°C
Démarrage 'ouverte'	5	3.6	2.5
Eléments cylindriques (VRLA)	10	7	5
Semi-traction 'ouverte'	5	3.6	2.5
Batterie AGM (VRLA)	8	6	4
Traction (plaques tubulaires) 'ouverte'	10	7	5
Sonnenschein Dryfit A200 gel (VRLA)	5	3.6	2.5
Sonnenschein Dryfit A600 gel (VRLA)	16	11	8

Finalement, la température joue un rôle très important lors de la charge de la batterie. En effet, la tension du gazage, et avec elle, la tension d'entretien et d'absorption optimale, diminue au fur et à mesure que la température de la batterie augmente. Ce qui signifie qu'avec une tension de charge constante, une batterie chaude sera surchargée et une batterie froide sera insuffisamment chargée. Voir le § 4.4 pour plus d'informations sur la température et la charge des batteries.

2.5.10. Autodécharge

Une batterie inutilisée perd sa capacité suite à l'autodécharge. Plus la température de stockage sera élevée, plus l'auto décharge sera rapide.

Type	Alliage	Autodécharge par mois 20°C	Autodécharge par mois 10°C
Démarrage 'ouverte'	Antimoine (1,6 %)	6 %	3 %
Éléments cylindriques (VRLA)	Pur plomb	4 %	2 %
Semi-traction 'ouverte'	Antimoine (1,6 %)	6 %	3 %
Batterie AGM (VRLA)	Antimoine (1,6 %)	3 %	1.5 %
Traction (plaques tubulaires) 'ouverte'	Antimoine (5 %)	12 %	6 %
Sonnenschein Dryfit A200 gel (VRLA)	Calcium	2 %	1 %
Sonnenschein Dryfit A600 gel (VRLA)	Calcium	2 %	1 %

Les batteries ouvertes plomb-antimoine doivent, quand elles ne sont pas utilisées, être rechargées au moins tous les 4 mois, sauf si la température ambiante moyenne est basse.

Les batteries étanches peuvent supporter une période de repos de 12 mois sans être rechargées.

Quand une batterie n'est pas utilisée pendant une longue période, il est important qu'elle soit déconnectée du système électrique pour qu'il n'y ait pas de décharge accélérée suite à de courants de fuite ailleurs dans le système.

3. SURVEILLANCE DE L'ETAT DE CHARGE D'UNE BATTERIE 'LE CONTROLEUR DE BATTERIE'

3.1. Les différentes façons de surveiller l'état de charge d'une batterie

3.1.1. La densité de l'électrolyte

Comme il a été expliqué dans le § 2.2.1, l'électrolyte d'une batterie plomb-acide se compose d'un mélange d'eau et d'acide sulfurique. Dans une batterie complètement chargée, la masse active des plaques négatives est en plomb pur et spongieux; et celle des plaques positives en oxyde de plomb. La concentration d'acide sulfurique (ainsi que la densité de l'électrolyte) est alors élevée.

Pendant la décharge, l'acide sulfurique réagit avec la matière active des plaques positives et négatives, avec comme résultat la formation de sulfate de plomb et d'eau. De ce fait, la teneur en acide sulfurique diminue ainsi que la densité de l'électrolyte.

Pendant la décharge, l'état de charge de la batterie peut être assez bien suivi en déterminant la densité de l'électrolyte à l'aide d'un pèse-acide :

Profondeur de la décharge (%).	Densité	Tension
0	Entre 1.265 et 1.285	12.65 +
25	1.225	12.45
50	1.190	12.24
75	1.155	12.06
100	1.120	11.89

Pendant la charge, le processus inverse a lieu et de l'acide sulfurique est à nouveau formé. Étant donné que l'acide sulfurique est plus lourd que l'eau, celle-ci a tendance à s'accumuler au fond du bac batterie tandis qu'au-dessus des plaques, la concentration d'acide dans le liquide ne change pratiquement pas! (Ceci ne concerne pas les batteries à électrolyte immobilisé : gel et AGM),

Informations utiles sur l'électrolyte:

- Stratification

Quand, à la fin de la période principale "bulk", la tension de gazage est atteinte (2,39 V par élément, soit 14,34 V pour une batterie de 12 V à 20 °C), petit à petit l'électrolyte sera à nouveau bien mélangée grâce aux bulles de gaz qui remontent ("gazage" ou "bouillonnement").

Le temps nécessaire dépend de la construction de la batterie et de l'intensité du bouillonnement. Le bouillonnement dépend de la tension de charge, de la teneur en antimoine et de l'âge de la batterie. Les batteries ayant une teneur en antimoine relativement élevée (2,5 % ou plus), ont généralement suffisamment de bouillonnement pendant la charge d'absorption pour homogénéiser l'électrolyte.

Les batteries modernes avec une faible teneur en antimoine (1,6 % ou moins) présentent si peu de bouillonnement que le cycle de charge normal est insuffisant. Il faudra une charge d'entretien de plusieurs semaines (avec très peu de bouillonnement) avant que l'électrolyte soit de nouveau bien mélangé. **Par conséquent, on peut mesurer une densité insuffisante même après avoir chargé complètement une batterie ouverte.**

NB : Les vibrations et les mouvements d'un bateau ou d'un véhicule contribueront également au bon mélange de l'électrolyte.

- Correction de température pour les mesures de densité à l'aide du pèse-acide:

La densité est inversement proportionnelle à la température. Chaque élévation de température de 14 °C, diminue la densité mesurée de 0,01. Un relevé de 1,27 à 34 °C est donc équivalent à un relevé de 1,28 à 20 °C.

- Variations de densité par région :

Les densités mentionnées dans le tableau ci-dessus sont typiques pour un climat tempéré. Pour un climat chaud, on utilise généralement l'électrolyte avec une concentration d'acide sulfurique plus faible pour réduire l'effet négatif de la température ambiante élevée sur la durée de vie de la batterie.

Densité d'une batterie complètement chargée, climat tempéré :	1.265	-1.285
Densité d'une batterie complètement chargée, climat subtropical :	1.250	-1.265
Densité d'une batterie complètement chargée, climat tropical :	1.235	-1.250

3.1.2. La tension de la batterie

Une mesure de tension peut être utilisée en tant qu'indication globale de l'état de charge de la batterie (voir tableau dans paragraphe 3.1.1). Une mesure de tension valable est uniquement possible quand la batterie est restée au repos pendant quelques heures (sans charge ou décharge).

3.1.3. Le compteur de courant en Ampère-heures (Ah)

C'est la façon la plus pratique et exacte pour suivre l'état de charge d'une batterie. Le produit spécialement conçu à cette fin, est le moniteur de batterie. Dans les paragraphes suivants, l'utilisation du moniteur de batterie est traitée en détail.

3.2. Le principe de fonctionnement du moniteur de batterie avec compteur de courant

La fonction la plus importante du moniteur de batterie est le suivi et l'indication de l'état de charge d'une batterie.

Un moniteur de batterie suit les courants de charge et de décharge de la batterie. L'intégration de ce courant rapporte le nombre d'Ampères-heures (Ah) de charge ou de décharge.

Avec un courant constant, l'intégration revient à la multiplication du courant et du temps. Par exemple : un courant de décharge de 10 A pendant 2 heures signifie que la batterie est déchargée avec $10 \times 2 = 20$ Ah.

3.3. Rendement énergétique d'une batterie

Il se crée une perte lors de la charge et de la décharge d'une batterie. La quantité totale d'énergie électrique fournie par une batterie pendant la décharge est d'environ 25 % inférieure à l'énergie absorbée pendant la charge, ce qui signifie que le rendement est de 75 %. Un courant de charge et de décharge élevé réduit le rendement. La perte plus importante vient du fait que la tension est plus basse pendant la décharge que pendant la charge. De plus, il y a également une perte à la fin du cycle de charge, car l'eau y est transformée en oxygène et hydrogène. Les batteries ayant peu de bouillonnement (les batteries avec une basse teneur en antimoine) et une faible résistance électrique sont les plus efficaces.

Quand une batterie est utilisée dans un état partiellement chargé (voir l'exemple du paragraphe 2.4.6.), Le rendement énergétique est très élevé (pas de bouillonnement) : environ 89 %.

3.4. Rendement de courant d'une batterie

Une batterie restituera moins d'Ampères-heures durant la décharge que le nombre d'Ah nécessaires pour la charger. C'est ce qu'on appelle le rendement de courant, ou bien le rendement Ah ou Coulombien ($1 \text{ Ah} = 3600 \text{ C}$).

Le rendement de courant d'une batterie est presque de 100 %, tant qu'il n'y a pas de bouillonnement.

Bouillonnement veut dire qu'une partie du courant de charge n'est pas transformée en énergie chimique stockée dans les plaques, elle est utilisée alors pour transformer l'eau en oxygène et hydrogène (ceci concerne également la fin du cycle de charge d'une batterie étanche, voir paragraphe 2.3.2.). Seuls les "Ampères-heures" stockées dans les plaques peuvent être récupérées lors de la décharge suivante.

Par conséquent le rendement de courant dépend :

A. Du type de batterie : peu de bouillonnement = rendement de courant élevé

B. De la façon dont la batterie est chargée : le rendement de courant moyen sera élevé, quand une batterie est surtout utilisée en état partiellement chargé (voir l'exemple au paragraphe 2.4.6.) et si elle n'est complètement chargée qu'occasionnellement.

C. Courant de charge. Quand la charge se fait avec un courant élevé, donc avec également une tension et une température élevée, le bouillonnement commence plus rapidement et de façon plus intense. Cela a pour conséquence une diminution du rendement de courant (ainsi que du rendement énergétique).

Dans la pratique, le rendement de courant varie entre 80 et 95 %. Un moniteur de batterie doit prendre en compte le rendement de courant, autrement la valeur indiquée serait trop optimiste.

3.5. Effet du régime de décharge sur la capacité

Comme il a déjà été précisé dans paragraphe 2.5.3, la capacité disponible d'une batterie dépend du courant de décharge. Plus la décharge est rapide, moins il y aura de capacité disponible.

En 1897, le scientifique Peukert, a découvert que la relation entre le courant de décharge I et le temps de décharge T (de charge totale à la décharge totale) peut être décrite ainsi:

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

où C_p est une constante (la 'capacité Peukert') et où "n" est appelé l'exposant de Peukert. L'exposant de Peukert est toujours supérieur à 1. Plus "n" est grand, plus la prestation de la batterie sera mauvaise en cas de courant de décharge élevé.

L'exposant de Peukert peut être calculé comme suit, en fonction de mesures effectuées sur la batterie ou en fonction des tableaux ou graphiques de décharge du fabricant.

Quand on détermine ou quand on mesure le temps de décharge T_1 et T_2 pour deux courants de décharge différents, I_1 et I_2 , alors:

$$C_p = I_1^n \times T_1 = I_2^n \times T_2$$

et donc :

$$n = \log(T_2 / T_1) / \log(I_1 / I_2)$$

Comme nous le montrent les tableaux du paragraphe 2.5.3, l'augmentation du courant de décharge de $C / 20$ à $C / 1$ (= l'augmentation du courant de décharge d'une batterie de 200 Ah de $200 / 20 = 10$ A à $200 / 1 = 200$ A) peut diminuer la capacité disponible de 50% !

Un moniteur de batterie doit donc compenser la capacité en fonction de l'intensité de décharge. Dans la pratique cela est très compliqué, car l'intensité de décharge n'est pas toujours constante.

3.6. Un courant de décharge élevé, conduit-il à une perte de capacité ?

Dans le paragraphe 2.5.3, nous avons vu l'exemple d'une batterie dont la capacité nominale avec une décharge en 20 heures était de 200 Ah et donc $C_{20} = 200$ Ah. Le courant de décharge correspondant est :

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

Avec un courant de décharge de 200 A, la batterie est déchargée en 30 minutes. Donc bien que nous ayons commencé avec une batterie de 200 Ah, celle-ci se retrouvait "vide" après une décharge de seulement 100 Ah. Cela ne signifie pas qu'avec un courant de décharge de 200 A, la différence de capacité de 100 Ah ($C_{20} - C_1 = 200 - 100 = 100$ Ah) ait "disparue", mais seulement que le processus chimique (diffusion, voir § 2.2.3.) s'accomplit lentement, ce qui fait que la tension de la batterie devient trop faible. Une batterie qui est déchargée avec un courant de 200 A et qui est "vide" en 30 minutes, sera donc à nouveau (presque) pleine après une recharge avec 100 Ah, tandis que la même batterie qui est déchargée avec $I_{20} = 10$ A, vide en 20 heures, sera presque pleine après une recharge avec 200 Ah.

Une batterie déchargée avec un courant élevé peut même se rétablir au bout d'un certain temps et la capacité restante peut être utilisée.

3.7. D'autres caractéristiques utiles d'un moniteur de batterie

Le comptage des événements particuliers et la saisie de données sont des fonctions très utiles d'un moniteur de batterie.

3.7.1. Comptage des événements particuliers

Compter des événements particuliers signifie que les événements spécifiques, surtout les événements qui sont probablement nuisibles ou qui sont nécessaires pour l'entretien de la batterie, sont stockés dans la mémoire de la batterie.

Ces événements peuvent être :

- surtension
- décharge trop profonde
- nombre de cycles de charge/décharge

3.7.2. Saisie de données

La saisie de données signifie que les données de la batterie sont enregistrées à intervalles réguliers, pour que l'historique d'utilisation puisse être reproduit plus tard.

4. RECHARGER DES BATTERIES : LA THEORIE

4.1. Introduction

Il serait facile de décrire le chargement des batteries s'il existait une recette universelle, quels que soient les conditions d'utilisation et le type de la batterie. Malheureusement ce n'est pas le cas.

Un facteur qui rend le tout encore plus compliqué, est qu'il y a souvent plus d'un appareil de charge connecté sur la batterie, et que le courant de charge net n'est pas continu en raison des consommateurs qui sont également raccordés sur la batterie.

Charger avec une tension constante est la meilleure façon d'éliminer au mieux l'influence d'autres chargeurs et des consommateurs. De là provient la caractéristique de charge à 3 étapes bien connue, avec une étape de courant limité ou charge principale (anglais : "bulk") avec ensuite 2 étapes de tension limitées, la tension d'absorption et la tension d'entretien.

Dans le paragraphe 5.3.2, vous trouverez une description plus détaillée d'un régime de charge plus évolué, élaboré par Victron Energy : le régime **adaptatif** de charge.

4.2. Charger en trois phases (I U ° U)

4.2.1. Première étape : courant limité

Au début du cycle de charge d'une batterie, la tension monte rapidement à environ 2,1 V / élément (12,6 V pour une batterie de 12 V et 25,2 V pour une batterie de 24 V). Ensuite, la tension monte plus lentement, jusqu'à ce que la tension d'absorption soit atteinte. Pendant la phase principale de la recharge, la batterie accepte tout le courant de charge proposé : le courant de charge est limité par le chargeur.

Pour de grandes batteries d'accumulateurs il est plutôt conseillé de limiter le courant à C / 5, ou encore mieux, à C / 10, ce qui signifie que 10 à 20 % de la capacité totale est chargée par heure, par exemple de 100 à 200 A pour une batterie de 1000 Ah.

Des batteries plus petites et moins chères sont souvent chargées avec un courant relativement plus élevé, par exemple C / 3, même si cela induit une réduction de durée de vie pour la batterie.

Une batterie accepte tout le courant de charge proposé jusqu'à ce qu'elle soit chargée à environ 80 %. La tension d'absorption est alors atteinte. A partir de ce moment là, la batterie absorbera de moins en moins de courant au lieu d'accepter tout le courant "proposé". Pour cette raison, la première limite de tension est appelée : la tension d'absorption, et la seconde phase du cycle de charge : la phase d'absorption.

Un courant de charge élevé provoque une élévation de la température de la batterie, conduit à plus de bouillonnement et à un temps d'absorption supérieur nécessaire pour charger complètement la batterie. Autrement dit : un courant de charge très élevé n'est pas vraiment efficace et ne réduit que relativement peu le temps de charge.

Dans tous les cas, dès que la tension de gazage est atteinte le courant de charge doit être limité à C / 5 ou moins, (à 20 °C, la tension de gazage est d'environ 2,4 V / élément, soit 14,4 V ou 28,8 V respectivement). Sinon, la masse active sera repoussée en dehors des plaques par un bouillonnement excessif.

4.2.2. Deuxième étape : charge d'absorption

Quand la tension d'absorption est atteinte, la charge est limitée à la quantité de courant que la batterie absorbe. Pendant la phase d'absorption, le courant diminue constamment, tandis que la batterie atteint l'état complet de charge.

Comme il a été mentionné au § 2.2.3, la charge (et la décharge) d'une batterie indique qu'un procédé de diffusion doit se produire. Ce procédé de diffusion explique le comportement de la batterie sous charge et sous décharge :

- Quand une batterie subit une décharge partielle et rapide le processus chimique reste cantonné à la surface des plaques. Pour recharger la batterie, une période d'absorption n'est alors pas ou peu nécessaire (la batterie d'une voiture est chargée avec une valeur fixe d'environ 14 V). Après une décharge longue et importante, une longue période d'absorption sera nécessaire pour récupérer et retransformer toute la matière active à l'intérieur des plaques.
- Les batteries de démarrage avec des plaques minces, nécessitent une période d'absorption moins longue que les batteries à plaques épaisses ou tubulaires.

- Le temps d'absorption se raccourcit au fur et à mesure qu'une tension d'absorption plus élevée est choisie. Une tension plus élevée provoque des champs électriques plus forts, ce qui augmente la vitesse de diffusion.

Mais attention : au fur et à mesure que la tension d'absorption est augmentée, le bouillonnement s'intensifie, ceci jusqu'à ce que la matière active soit repoussée à l'extérieur des plaques. Dans le cas des batteries 'étanches', du gaz s'échappera par les soupapes de sécurité, ce qui conduit au dessèchement de l'électrolyte.

Les théories présentées ci-dessus conduisent aux conclusions suivantes par type de batterie :

1) Les batteries plomb-antimoine ouvertes

Ici nous avons à faire à des limites de tension d'absorption plutôt larges, allant de 2,33 V par élément (14 V) et une longue période d'absorption, à 2,6 V par élément (15,6 V) et une période d'absorption beaucoup plus courte.

Afin de prévenir un bouillonnement excessif, le courant de charge doit être limité à un maximum de 10 % de la capacité de la batterie (mais 5 % est nettement meilleur) une fois que la tension de gazage (2,4 V par élément) est dépassée: par exemple 40 A pour une batterie de 400 Ah. Ce courant de charge limité est obtenu en limitant le courant du chargeur, ou en limitant la vitesse avec laquelle la tension de charge monte jusqu'à environ 0,1 V par élément et par heure (c'est à dire 0,6 V par heure pour une batterie 12 V, et 1,2 V par heure pour une batterie de 24 V).

Il est également important de savoir que les batteries ne doivent pas nécessairement être chargées à saturation après chaque décharge. Il est tout à fait acceptable de les charger jusqu'à 80 % ou 90 % en moyenne (charge partielle, de préférence avec un peu de bouillonnement pour limiter la stratification) et de charger la batterie complètement par exemple une fois par mois.

2) La batterie à éléments cylindriques est un cas à part, parce que cette batterie est 'étanche' en acceptant tout de même des larges limites de tension d'absorption, de 14 V à 15 V.

3) Les autres batteries VRLA ont une limite de tension d'absorption plus basse qui **ne doit jamais être dépassée**. En cas de tension de charge trop élevée, il y aura dégagement de gaz par les soupapes de sécurité, ce qui fait que la batterie se desséchera .

4.2.3. Troisième étape : charge d'entretien

Après avoir rechargé complètement la batterie, la tension est baissée pour limiter le plus possible la corrosion et le bouillonnement. Mais la tension doit rester suffisamment élevée pour compenser l'autodécharge, c'est à dire, pour conserver la batterie complètement chargée.

Trop de tension provoque un vieillissement accéléré dû à la corrosion des plaques positives. La vitesse avec laquelle la grille des plaques positives se corrode, doublera grosso modo à chaque augmentation de 50 mV de tension par élément (0,3 V et 0,6 V respectivement pour des batteries de 12 V et 24 V) .

En revanche, avec trop peu de tension, la batterie se déchargera lentement, ce qui aboutira finalement à la sulfatation.

En ce qui concerne la tension de charge d'entretien, nous devons faire une différence entre les batteries ouvertes et les batteries VRLA :

1) Les recommandations pour la charge d'entretien des **batteries ouvertes** varient de 2,15 V à 2,33 V par élément (12,9 V à 14 V pour une batterie de 12 V). Les types de batteries ouvertes traitées ici **ne sont pas prévues pour une charge d'entretien de longue durée** (c'est à dire, plusieurs mois ou plusieurs années).

La charge d'entretien avec une tension relativement élevée diminuera la durée de vie à cause de la corrosion accélérée des grilles des plaques positives. Et le niveau de l'électrolyte des batteries à teneur en antimoine élevée devra être régulièrement remis à niveau avec de l'eau déminéralisée.

La charge d'entretien à tension basse, par exemple 2,15 V par élément, réduit le vieillissement et la perte d'eau dû au bouillonnement, mais il faudra une "charge de rafraîchissement" régulière pour conserver la batterie complètement chargée.

2) Par contre, toutes les batteries VRLA mentionnées sont prévues pour une charge d'entretien de longue durée. Cependant, certaines études ont démontré qu'un traitement comparable à celui présenté ici pour des batteries ouvertes, prolonge également la durée de vie des batteries VRLA (voir exemple "Batterie Technik" par Heinz Wenzl, Expert Verlag, 1999).

Le tableau suivant donne le volume de perte d'eau dû au bouillonnement dans le cas d'une batterie relativement neuve à basse teneur en antimoine.
Important : le bouillonnement augmente au fur et à mesure que la batterie vieillit, et les batteries ayant plus d'antimoine consomment 2 à 5 fois plus d'eau !

	Tension par élément (V)	Tension de batterie (V)	Bouillonnement par 100 Ah	Consommation d'eau par 100 Ah	Intervalle de remplissage	Perte d'eau par cycle de charge	Perte de capacité par 100 Ah de capacité de batterie
Batterie débranchée	2,13	12,8	20 cc / heure	0,1 l / an	5 ans		44 / an
Entretien	2,17	13	25 cc / heure	0,1 l / an	5 ans		54 / an
Entretien	2,2	13,2	60 cc / heure	0,3 l / an	1,5 ans		130 / an
Entretien	2,25	13,5	90 cc / heure	0,4 l / an	1 an		200 / an
Entretien	2,3	13,8	150 cc / heure	0,6 l / an	10 mois		300 / an
Absorption	2,33	14	180 cc / heure	0,8 l / an	7 mois	2 cc	2 / cycle
Absorption	2,4	14,4	500 cc / heure	2,2 l / an	3 mois	3 cc	3 / cycle
Absorption	2,45	14,7	1 l / heure	4,2 l / an		4 cc	4 / cycle
Absorption	2,5	15	1,5 l / heure	6,5 l / an		6 cc	6 / cycle

Le bouillonnement et la consommation d'eau sont basés sur une batterie à 6 éléments (= 12 V).
L'intervalle pour le remplissage est basé sur une perte d'eau de 0,5 l par 100 Ah. Le surplus d'eau dans la batterie est d'environ 1 l / 100 Ah.

Les formules :

- 1 g d'eau se décompose en 1,85 l gaz d'oxygène + gaz d'hydrogène;
- 1 Ah de perte à cause de bouillonnement produit 3,7 l de gaz dans une batterie à 6 éléments (= 12 V).

Dans le tableau nous pouvons constater que la tension de la charge d'entretien de 13,5 V (13,5 V est une tension souvent conseillée pour les batteries ouvertes traitées ici) est un compromis raisonnable, parce qu'une tension inférieure ne compense pas tout à fait l'autodécharge et qu'une tension plus élevée conduira à un vieillissement précoce par corrosion.

A mon avis, plutôt que de trouver un équilibre entre l'autodécharge et le bouillonnement, il serait préférable de débrancher la batterie et de ne la recharger que trois ou quatre fois par an, ou bien de réduire la tension de charge d'entretien à un niveau très bas, par exemple 2,2 V par élément (13,2 V respectivement 26,4 V), puis de recharger la batterie régulièrement à une tension plus élevée, voir à ce propos le paragraphe 5.3.2.

4.3. Charge d'égalisation

Quand une batterie n'est pas suffisamment chargée, cela conduit à son vieillissement pour les raisons suivantes :

- sulfatation
- stratification (seulement les batteries ouvertes, voir § 2.3.5)
- déséquilibre de charge des éléments (voir § 2.5.6).

En règle générale, une batteries atteindra l'état de charge complet pendant la phase d'absorption ou bien après une longue période de charge d'entretien.

Si elle est utilisée un certain temps en état partiellement déchargé, elle récupèrera :

- en parcourant complètement le cycle de charge de façon répétitive
- par une charge d'absorption ou d'entretien pendant un temps plus long;
- par une vraie charge d'égalisation, comme décrite ci-dessous.

Les batteries de traction en particulier, peuvent avoir besoin périodiquement d'une charge d'égalisation. Une charge d'égalisation se fait en chargeant d'abord la batterie de façon habituelle puis en continuant la charge avec un courant limité (3 % à 5 % de la capacité Ah de la batterie, c'est à dire 3 à 5 A pour une batterie de 100 Ah). La tension montera jusqu'à 15-17 V pour une batterie de 12 V (30-34 V pour une batterie de 24 V). La charge d'égalisation doit durer quelques heures, jusqu'à ce que la densité se stabilise, même dans l'élément le plus faible. Pendant cette période soyez vigilant à ce que la batterie soit isolée de tout appareillage sensible à une surtension.

Quand une batterie doit-elle être égalisée ?

Cela dépend de son type et de son utilisation. Pour les batteries à haute teneur en antimoine, la meilleure façon de le savoir est de contrôler la densité après une charge normale :

- Si tous les éléments sont égaux, avec une densité de 1,28, une égalisation n'est pas nécessaire;
- Si la densité de tous les éléments se trouve entre 1,24 et 1,28, une égalisation est recommandée mais non urgente ;
- Si la densité de certains éléments est inférieure à 1,24, une égalisation est nécessaire.
- Si tous les éléments ont une densité inférieure à 1,24, la batterie n'a pas assez de charge et donc le temps d'absorption doit être prolongé ou la tension d'absorption doit être augmentée.

Pour les batteries VRLA, la densité ne peut pas être mesurée. Pour les batteries ouvertes avec une basse teneur en antimoine, la valeur indiquée n'est pas fiable. La meilleure façon de s'assurer que ces batteries sont vraiment chargées à 100%, est de suivre le courant de charge pendant la charge d'absorption. Le courant de charge doit diminuer continuellement et se stabiliser par la suite : cela indique que la transformation chimique de la masse active est accomplie et que la batterie est complètement chargée.

4.4. Compensation de température

Tel qu'il a été déjà mentionné dans le § 2.5.9, la température joue un rôle très important lors de la recharge de la batterie. La tension de gazage et, aussi de ce fait, la tension optimale d'absorption et la tension optimale de charge d'entretien sont inversement proportionnelles à la température. Cela signifie qu'avec une tension de charge constante, une batterie chaude sera trop chargée tandis qu'une batterie froide pas assez.

Emballement thermique (anglais : thermal runaway):

La recharge d'une batterie chaude, sans compensation de température, peut conduire à une situation instable: Puisque la tension de gazage baisse avec une température qui s'élève, le courant d'absorption augmente et la batterie s'échauffe encore plus, etc. Cela mène à la destruction de la batterie (le bouillonnement excessif repousse la masse active en dehors des plaques). Il existe un danger réel d'explosion suite à un court-circuit interne et à la présence des grandes quantités d'oxygène et d'hydrogène gazeux.

La tension de charge, indiquée par les fabricants européens de batteries, s'applique à une température de batterie de 20 °C et peut être gardée constante tant que la température de la batterie reste assez constante (15 °C à 25 °C). En dehors de cette plage de température, une compensation de température est vivement conseillée.

Quoique les recommandations des fabricants diffèrent quelque peu, une compensation de température de - 4 mV / °C par élément est une moyenne généralement acceptée. Cela signifie - 24 mV / °C pour une batterie de 12 V et - 48 mV / °C pour une batterie de 24 V.

Si le fabricant prescrit une tension d'absorption de, par exemple, 28,2 V à 20 °C, la tension d'absorption doit être réduite à 27,7 V si la température monte à 30 °C. Cette différence de 0,5 V n'est pas négligeable.

Si, en plus de la température ambiante de 30 °C, la température interne de la batterie monte également de 10 °C, ce qui est très normal pendant la charge, la tension d'absorption doit alors être abaissée à 27,2 V. Sans compensation de température, la tension de charge aurait été de 28,2 V, une surtension suffisante pour détruire rapidement vos batteries gel ou AGM !

Tout cela veut dire qu'**une compensation de température est importante**, surtout pour les grandes et coûteuses batteries VRLA.

4.5. Résumé

Le tableau ci dessous donne une idée de la tension et du temps d'absorption nécessaires après une décharge d'environ 50 %. Dans la pratique, les recommandations des différents fabricants peuvent varier, et les consignes de charge dépendant aussi de l'utilisation de la batterie. **Renseignez-vous toujours chez votre fournisseur de batteries!**

Type	Alliage	Temps d'absorption (20°C)	Tension d'entretien (20°C)
Démarrage 'ouverte'	Antimoine (1,6 %)	4 heures avec 2,50 V / élément (15,0 V) 6 heures avec 2,45 V / élément (14,7 V) 8 heures avec 2,40 V / élément (14,4 V) 10 heures avec 2,33 V / élément (14 V)	2,33 V / élément (14 V) baisser après quelques jours jusqu'à : 2,2 V / élément (13,2 V)
Eléments cylindriques (VRLA)	Plomb pur	4 heures avec 2,50 V / élément (15,0 V) 8 heures avec 2,45 V / élément (14,7 V) 16 heures avec 2,40 V / élément (14,4 V) 1 semaine avec 2,30 V / élément (13,8 V)	2,3 V / élément (13,8 V)
Semi-traction 'ouverte'	Antimoine (1,6 %)	5 heures avec 2,50 V / élément (15,0 V) 7 heures avec 2,45 V / élément (14,7 V) 10 heures avec 2,40 V / élément (14,4 V) 12 heures avec 2,33 V / élément (14 V)	2,33 V / élément (14 V) baisser après quelques jours jusqu'à : 2,2 V / élément (13,2 V)
Traction (plaques tubulaires) 'ouverte'	Antimoine (5 %)	6 heures avec 2,50 V / élément (15,0 V) 8 heures avec 2,45 V / élément (14,7 V) 10 heures avec 2,40 V / élément (14,4 V)	2,3 V / élément (13,8 V) baisser après quelques jours jusqu'à : 2,2V / élément (13,2 V)
Sonnenschein Dryfit A200 gel (VRLA)	Calcium	4 heures avec 2,40 V / élément (14,4 V) le voltage ne peut pas être dépassé !	2,3 V / élément (13,8 V)
Sonnenschein Dryfit A600 gel (VRLA)	Calcium	4 heures avec 2,34 V / élément (14,04 V) le voltage ne peut pas être dépassé !	2,25 V / élément (13,5 V)

NB:

- 1) S'il n'y a pas de courant de quai disponible, les batteries d'un bateau sont souvent chargées le plus rapidement possible, sans ou avec une courte période d'absorption (utilisation en état partiellement déchargé). Cela est acceptable, à condition que la batterie soit régulièrement rechargée à 100 % (voir § 4.3).
- 2) Si une batterie est chargée avec une tension supérieure à la tension de gavage, soit le courant doit être limité au maximum à 5 % de la capacité de la batterie, soit le cycle de charge doit être soigneusement suivi et la tension abaissée si le courant augmente au delà de 10 % de la capacité. La solution de ce problème est la caractéristique de charge adaptative, voir § 5.3.2.
- 3) Une "charge de rafraîchissement" régulière est nécessaire, en cas de charge d'entretien des batteries avec 2,2 V par élément.

4) Remarque concernant la durée de vie et la charge excessive :

Les batteries de démarrage et les batteries pour l'hélice d'étrave sont souvent chargées en même temps (par un chargeur à plusieurs sorties, un répartiteur de charge à diodes, etc.) que la batterie de servitude (voir § 5.2). Par conséquent, ces batteries sont souvent chargées avec une tension élevée (15 V ou même plus), bien qu'elles soient déjà pleines. Si cela est le cas, les batteries étanches ne peuvent pas être utilisées à cette fin, car elles pourraient se mettre à gazer et à sécher. Ceci ne concerne pas la batterie étanche à éléments cylindriques qui peut supporter jusqu'à 15 V de tension de charge.

Les batteries ouvertes et les batteries à éléments cylindriques survivront, mais vieilliront aussi plus rapidement. Le principal facteur de vieillissement est la corrosion de la grille des plaques positives. La vitesse de corrosion double pour chaque augmentation de tension de 50 mV par élément. Cela veut dire par exemple, qu'une batterie à éléments cylindriques Optima, ayant une durée de vie de 10 ans avec la tension de charge d'entretien recommandée de 13,8 V, vieillirait 4 fois plus vite avec 15 V ($((15 - 13,8) / 6) / 0,05 = 4$).

La durée de vie ne serait donc que de 2,5 années si la batterie était chargée **constamment** à 15 V. Dans la pratique ce n'est naturellement pas le cas : cette tension de charge élevée se produira uniquement pendant la période de charge d'absorption de la batterie de servitude. Autrement dit : malgré une surcharge fréquente, la durée de vie reste acceptable. Des résultats similaires sont applicables aux batteries ouvertes.

4.6. Conclusion : comment charger une batterie ?

Comme précisé ci-dessus, il n'y a pas une recette unique et simple valable pour toutes les batteries et toutes les conditions d'utilisation.

Reprenons encore l'exemple du paragraphe 2.4 pour avoir une meilleure idée sur la façon d'utiliser les batteries et sur son application pour la recharge. Admettons que le yacht ait 3 batteries à bord : une batterie de servitude, une batterie de démarrage et une batterie pour l'hélice d'étrave.

Comment ces différentes batteries sont-elles utilisées et comment faut-il les charger ?

4.6.1. La batterie de servitude

Dans le § 2.4, trois conditions d'utilisation ont été décrites :

1) L'utilisation cyclique, en état partiellement chargé, pendant la navigation ou quand le bateau est au mouillage (recharge de la batterie par l'alternateur du moteur de propulsion ou par le groupe diesel). Dans ces conditions la batterie sera chargée le plus rapidement possible. Une compensation de température est alors nécessaire afin de prévenir un vieillissement prématuré suite à une surchauffe et un bouillonnement excessif.

2) Charge d'entretien et décharges de courte durée et de peu d'importance, pendant la navigation au moteur ou quand le bateau est à quai (courant de quai et application du concept CC). Le risque ici est qu'à cause de ces légères décharges, un régulateur de d'alternateur 3 étapes (pendant la navigation) ou un chargeur de batterie (si connecté sur le courant de quai) commute chaque fois sur charge principale, avec ensuite une période d'absorption fixe. Cela peut engendrer une situation dans laquelle la batterie est presque constamment soumise à une charge d'absorption. C'est pourquoi, en cas de légères décharges, la durée de la phase d'absorption doit être fortement réduite. Voir ci-dessous la charge adaptative, § 5.3.2.

3) La batterie est débranchée ou laissée sous une tension de charge d'entretien, par exemple durant la période d'hiver.

Comme mentionné dans le § 4.2.3, la plupart des **batteries ouvertes** se dégradent rapidement (corrosion) quand elles sont chargées avec 2,3 V (13,8 V) par élément.

Me basant sur mon expérience personnelle et sur beaucoup d'entretiens avec des propriétaires de bateau et de chantiers navals, je préfère débrancher complètement aussi bien les batteries ouvertes que les **batteries gel** pendant la période d'hiver. Les batteries ouvertes devront être entretenues avec une charge de rafraîchissement tous les 4 mois environ.

4.6.2. La batterie de démarrage

La batterie de démarrage est utilisée de 2 façons :

- Légère décharge en démarrant le moteur une ou deux fois par jour.
- Absence de décharge (voilier en croisière). La meilleure chose à faire serait alors de ne pas charger la batterie non plus, sauf de temps en temps par une charge rafraîchissement.

Pourtant dans la pratique, la batterie de démarrage sera chargée souvent en même temps que la batterie de servitude, ce qui est acceptable, à condition que le type de batterie adéquat soit utilisé et qu'une baisse de durée de vie soit acceptée (voir note 4, § 4.5).

4.6.3. La batterie pour le propulseur d'étrave

Quand le propulseur d'étrave est utilisé de façon intensive, la décharge peut être importante et la batterie doit être rechargée rapidement. En général, la solution la plus pratique c'est de charger la batterie du propulseur d'étrave en même temps que la batterie de servitude. Souvent, les batteries à éléments cylindriques sont utilisées en raison de leur très haute capacité en courant de pointe. Ces batteries acceptent une tension de charge élevée, voir note 4, § 4.5.

5. CHARGER LES BATTERIES A L'AIDE D'UN ALTERNATEUR OU D'UN CHARGEUR DE BATTERIE

5.1. L'alternateur

Le moteur principal d'un bateau est normalement équipé d'un alternateur* standard avec régulateur et compensation de température intégrés. La température est mesurée dans le régulateur même. Il vient du secteur automobile, où la température de la batterie est à peu près égale à la température du régulateur. De plus, dans les voitures, la batterie est presque toujours complètement chargée. La batterie se décharge légèrement seulement lors du démarrage du moteur. Ensuite, l'alternateur fournit assez de puissance, même avec le moteur tournant au ralenti, pour alimenter tous les consommateurs tout en rechargeant la batterie. La phase d'absorption mentionnée dans chapitre 4 est ici superflue, car la batterie n'est pratiquement jamais déchargée en profondeur et il y a généralement beaucoup de temps disponible pour la recharger. L'alternateur charge avec un courant qui dépend du régime moteur, jusqu'à ce que la tension de charge d'entretien soit atteinte. Ensuite, la batterie est chargée à tension constante. La tension est le plus souvent réglée sur 2,33 V par élément, soit 14 V pour des systèmes 12 V et 28 V pour des systèmes 24 V. Cette méthode fonctionne parfaitement dans les conditions suivantes :

- la batterie est une batterie de démarrage à plaques minces;
- la batterie est presque toujours complètement chargée;
- la différence de température entre l'alternateur et la batterie est limitée;
- la perte de tension le long du câble entre l'alternateur et la batterie est négligeable (c'est à dire inférieure à 0,1 Volt, y compris d'éventuels commutateurs, isolateurs diodes, etc. dans le circuit).

Des problèmes peuvent apparaître dès qu'une des conditions ci-dessus n'est plus remplie,.

*Dans un alternateur, des diodes sont intégrées pour qu'il n'y ait pas une sortie de courant alternatif mais du courant continu.

5.2. Quand l'alternateur doit charger plusieurs batteries

5.2.1. Introduction

Un bateau de plaisance est équipé au moins de deux batteries: une pour démarrer le moteur et une batterie de servitude (ou auxiliaire ou de service). Pour s'assurer que le moteur démarre à coup sûr, tous les accessoires (appareils de navigation, éclairage, pilote automatique, réfrigérateur, etc.) sont branchés sur la batterie de servitude. La batterie de démarrage du moteur principal doit être utilisée uniquement pour le démarreur.

Souvent il y a une troisième batterie à bord, la batterie pour le propulseur d'étrave, et parfois une quatrième : la batterie pour les instruments navigation et les systèmes de communication. Les batteries sont séparées entre elles par des relais, des répartiteurs de charge à diodes ou autres.

5.2.2. Le problème

Quand on utilise un alternateur standard du secteur automobile pour charger plusieurs batteries en même temps, les problèmes suivants surgissent :

- Sur un bateau, les câbles électriques sont en général beaucoup plus longs que dans les véhicules, c'est pourquoi il se crée une chute de tension plus grande entre l'alternateur et la batterie (par exemple: un câble avec une section de 10 mm² et 5 mètres de long, entraîne une chute de tension de 0,5 V avec un courant de 50 A).
- Les répartiteurs de charge à diodes engendrent une chute de tension supplémentaire : 0,4 V à 0,8 V pour des diodes au silicium et 0,1 V à 0,4 V pour des transistors FET utilisés en tant que diodes.
- L'alternateur dans le compartiment du moteur enregistre une température ambiante de 50°C et même supérieure alors que la batterie de servitude dans le bateau est bien plus froide, par exemple. 20°C. Ceci aboutit à une tension de charge trop basse pour la batterie suite à une compensation de température.
- La batterie de servitude est souvent très déchargée et doit être rechargée avec une tension (d'absorption) élevée.
- Toutefois, la batterie de démarrage est presque toujours complètement chargée et n'a nullement besoin d'une charge d'absorption.
- Souvent des différents types de batteries sont utilisées : pour démarrer, pour le propulseur d'étrave et en tant que batterie de servitude. Ces différentes batteries ont toutes leur propre caractéristique de charge.

5.2.3. Plusieurs solutions différentes

Il serait exagéré de dire qu'il existe autant de solutions que de bateaux, mais il y a certainement beaucoup de façons de résoudre les problèmes mentionnés:

5.2.3.1 Une solution simple et pas chère : des coupleurs de batterie commandés par microprocesseur

La batterie de démarrage est directement branchée sur l'alternateur. Entre l'alternateur et la batterie de servitude est installé un coupleur de batteries commandé par microprocesseur (voir par exemple les coupleurs de batteries Cyrix de Victron Energy). Quand une des deux batteries se charge (la batterie de démarrage avec l'alternateur, ou la batterie de servitude avec un chargeur de batterie) et quand la tension monte jusqu'à presque 14 V ou 28 V, le relais se ferme, afin que les deux batteries puissent être chargées en parallèle. Dès que la tension baisse lors d'une décharge, le relais s'ouvre à nouveau et les batteries sont séparées.

Cette solution est simple et pas chère. L'alternateur ne doit pas être modifié ou remplacé. Le désavantage est un temps de charge un peu plus long pour la batterie de servitude, puisque la tension de charge est plutôt basse (14 Volt). Souvent le moteur sera arrêté bien avant que la batterie soit pleine. Ce n'est pas un inconvénient tant que les batteries sont chargées régulièrement à 100 %, par exemple avec un chargeur de batterie quand le bateau est à quai.

Les coupleurs de batterie Cyrix sont **bidirectionnels** : la tension est mesurée sur les deux bornes positives et le courant de charge ira simplement vers la batterie la moins chargée.

5.2.3.2 Augmenter la tension de charge de l'alternateur

La plupart des alternateurs avec régulateur intégré peuvent être adaptés pour fournir une tension supérieure. En posant une diode en série avec la mesure de tension du régulateur, la tension de sortie est augmentée d'environ 0,6 V.

Mais ceci est un travail de spécialiste et nous n'entrerons pas dans le détail. Toutefois, c'est une amélioration bon marché qui chargera les batteries plus rapidement, parallèlement à la solution décrite dans le § 5.2.3.1. Il existe seulement un risque de surcharge en cas d'utilisation quotidienne très intensive du moteur. Ce problème peut être résolu en déconnectant temporairement l'alternateur (mais n'interrompez **jamais** la connexion entre l'alternateur et la batterie pendant que le moteur tourne, car la crête de tension qui en résulte peut endommager les diodes de redressement dans l'alternateur).

5.2.3.3 Un régulateur à 3 étapes avec compensation de température et de tension

Si vous vous décidez pour un régulateur à 3 étapes (bulk-absorption-entretien, voir chapitre 4), je vous conseillerais de prendre le meilleur et de choisir un modèle avec :

- Capteur de tension. En mesurant la tension de charge directement sur la batterie, la chute de tension, par le câblage et les répartiteurs de charge à diodes éventuels, sera automatiquement compensée.
- Compensation de température. Pour cela il faut un capteur de température qui soit monté directement sur la batterie de servitude.

5.2.3.4 La batterie de démarrage

Les solutions présentées dans les § 5.2.3.2 et 5.2.3.3 améliorent la recharge de la batterie de servitude, mais que faire de la batterie de démarrage ?

Admettons que, lorsque le moteur de propulsion tourne, les batteries soient chargées simultanément, interconnectées par un coupleur de batterie, un répartiteur de charge à diodes. Pratiquement tout le courant de charge afflue alors vers la batterie de servitude : c'est la plus grande batterie à bord ainsi que la batterie la plus déchargée. Cela signifie que la chute de tension, par le câble de l'alternateur vers la batterie de servitude, sera supérieure à celle vers la batterie de démarrage. Il se peut très bien que la tension de sortie de l'alternateur doive être augmentée à 15,4 V pour obtenir une tension d'absorption de par exemple 14,4 V pour la batterie de servitude (ce qui veut dire une chute de tension de 1 Volt).

Avec 15,4 V sur l'alternateur, la tension sur la batterie de démarrage pourrait très bien être de 15 V(!), car seulement un faible pourcentage du courant se dirige vers la batterie de démarrage et la chute de tension sera donc également minimale. Le résultat est que la batterie de démarrage, déjà complètement chargée, sera fortement surchargée.

Que faire ?

a) Améliorer la situation en diminuant les pertes de tension et c'est tout. La batterie de démarrage devra peut-être être remplacée plus rapidement; tout va dépendre de la fréquence avec laquelle les circonstances mentionnées ci-dessus se produisent et du type de batterie de démarrage.

Une batterie gel n'est pas conseillée dans ces circonstances, car la surtension provoque le dessèchement. Voir le § 4.5 pour une estimation de la durée de vie d'une batterie si elle est chargée avec une tension trop élevée.

- b) Ajouter 1 ou 2 diodes dans le câblage vers la batterie de démarrage, afin de baisser la tension.
- c) Poser un régulateur de série dans le câblage vers la batterie de démarrage, par exemple l' "Eliminator" de Ample Power.
- d) Chargez la batterie de démarrage avec un alternateur séparé.

5.2.3.5 La batterie pour le propulseur d'étrave

La batterie à éléments cylindriques est très adaptée à cette application. Cette batterie peut fournir des courants très élevés et supporte bien la surcharge.

5.3. Chargeurs de batteries électroniques: du courant alternatif au courant continu

5.3.1. Introduction

Dans les chapitres 2, 3 et 4 nous avons décrit de quelle façon les batteries devraient être chargées et comment les batteries vieillissent de façon accélérée si elles ne sont pas chargées correctement.

Le paragraphe 5.2 révélait que le chargement des batteries avec l'alternateur du moteur principal est une question de compromis.

Avec les chargeurs de batterie, c'est un peu moins compliqué, étant donné que la plupart des chargeurs à grande puissance de sortie sont pourvus de capteurs de température et de tension. Beaucoup de chargeurs ont aussi 2 ou 3 sorties séparées pour la charge simultanée de 2 ou 3 batteries et presque tous ont une caractéristique de charge à 3 étapes.

Il est également beaucoup plus facile d'installer un chargeur par ensemble de batteries que de poser plusieurs alternateurs sur le moteur principal.

5.3.2. Charger de façon optimale à l'aide d'un chargeur de batterie

J'espère avoir été assez explicite dans les chapitres précédents : la charge des batteries exige une réflexion minutieuse.

Toutes les connaissances et l'expérience décrite dans ce livre ont été rassemblées dans les nouveaux chargeurs Phoenix de Victron Energy.

Les chargeurs ont une caractéristique de charge adaptative à 4 étapes.

Le système de gestion de batterie 'adaptatif' commandé par microprocesseur peut être réglé pour différentes sortes de batteries. La fonction adaptative adapte automatiquement le cycle de charge à l'utilisation de la batterie.

En adaptant le temps d'absorption, le chargeur gère la quantité de charge adéquate

En cas de décharge minimale de la batterie, le temps d'absorption est maintenu court afin de prévenir une surcharge. Après une décharge importante, le temps d'absorption sera automatiquement prolongé afin de charger totalement la batterie.

Limitation de vieillissement par bouillonnement excessif : augmentation de tension limitée (fonction *BatterySafe*)

Si, pour raccourcir le temps de charge, on choisit un courant élevé et une tension de charge élevée, le chargeur Phoenix limitera alors la vitesse ascensionnelle de la tension après avoir atteint la tension de gazage. Un bouillonnement excessif durant la phase finale du cycle de charge sera ainsi évité.

Réduction d'entretien et de vieillissement quand la batterie n'est pas utilisée: la fonction de stockage (fonction *BatteryStorage*)

Le chargeur Phoenix commute sur 'stockage' quand, sur 24 heures, aucune décharge a eu lieu. La tension est alors à baisser à 2,2 V par élément (13,2 V pour une batterie de 12 V), ce qui limitera la corrosion des plaques positives. Une fois par semaine, la tension est augmentée jusqu'au niveau d'absorption pour recharger la batterie ; cela empêche la stratification de la solution électrolytique et la sulfatation des plaques.

Trois sorties pour charger trois batteries

Les chargeurs Phoenix possèdent 3 sorties dont 2 peuvent fournir le courant de sortie complet. La troisième sortie, prévue pour le chargement de la batterie de démarrage, est limitée à 4 A et possède une tension de sortie légèrement plus basse.

Compensation de température

Un capteur de température qui peut être monté sur le pôle négatif de la batterie fait en sorte que la tension de charge diminue quand la température de batterie monte. Ceci est particulièrement important pour les batteries gel et AGM qui, autrement, dessécheraient éventuellement à cause de la surcharge.

'Voltage Sense': mesurer la tension de charge sur la batterie ou sur le point de distribution CC

Afin de compenser une perte de tension par résistance du câblage, les chargeurs Phoenix sont pourvus de 'Voltage Sense' afin que la batterie reçoive toujours la tension de charge adéquate.

5.3.3. Charger plusieurs batteries

Les problèmes qui surgissent dans ce cas, sont comparables à ceux décrits pour l'alternateur, voir paragraphe 5.2.2.

La solution la moins chère est un chargeur avec plusieurs sorties.

La meilleure solution est un chargeur de batterie individuel pour chaque batterie.

5.3.3.1. Charger plusieurs batteries avec un seul chargeur

Beaucoup de chargeurs de batterie possèdent 2 ou 3 sorties, séparées entre elles par des diodes. La tension est réglée sur la face primaire des diodes ; cette tension est réglée à un degré plus élevé pour compenser la chute de tension moyenne par les diodes. En conséquence, la chute de tension, y compris le câblage, peut monter à plus de 1,5 Volt quand le courant de charge est élevé. Quand le courant est faible, la chute de tension sera moins de 0,5 V. Cela signifie qu'une tension de charge réglée par exemple à 14,4 V avec un courant faible, baisse à 13,4 V quand le courant de sortie du chargeur atteint son maximum. Ce n'est pas vraiment un inconvénient, tant que les batteries sont chargées régulièrement sans que beaucoup de courant soit capté simultanément par les différents utilisateurs. La tension de charge visée de 14,4 V ne peut en effet être atteinte que lorsque le courant diminue pendant la période d'absorption jusqu'à une valeur assez basse.

Compensation de température

La compensation de température a seulement un effet limité car les différentes batteries auront des températures différentes.

'Voltage sense'

La compensation de la chute de tension, en mesurant la tension de charge directement sur le point de distribution CC ou sur les bornes de l'une des batteries connectées, conduit à une recharge précise de la batterie concernée et en une surcharge possible des autres batteries.

5.3.3.2. Un chargeur de batterie individuel pour chaque batterie.

C'est la meilleure solution, mais aussi la plus chère.

5.3.3.3. Coupleurs de batteries commandés par microprocesseur

C'est un bon compromis qui donne une charge précise de la coûteuse batterie de servitude, (avec la compensation de température et de tension), et qui consiste à brancher les autres batteries sur la batterie de servitude avec des coupleurs de batteries commandés par microprocesseur. Un avantage supplémentaire est que l'alternateur du moteur principal chargera également et automatiquement toutes les batteries, voir paragraphe 5.2.3.1.

6. APPAREILLAGE ÉLECTRIQUE ET CONSOMMATION D'ÉNERGIE

6.1. Introduction

Maintenant que nous savons plus ou moins ce que sont les batteries et la recharge des batteries, il est temps de nous nous poser la question sur les appareils qui sont branchés sur ces batteries.

On peut distinguer entre 3 catégories d'appareils consommateurs :

- **Consommateurs continus** ; avec comme exemple le courant en veille de la VHF ou de la BLU, le réfrigérateur et le congélateur.
- **Consommateurs de longue durée** qui consomment du courant une ou plusieurs heures par jour. (feux de navigation, pilote automatique, éclairage de cabine, dessalinisateur)
- **Consommateurs de courte durée** qui consomment de l'électricité de quelques secondes à environ une heure par jour. (pompes, winchs électriques, propulseur d'étrave, micro-ondes, machine à laver, lave-vaisselle, table de cuisson électrique)

Selon mon expérience, tout le monde, y compris moi-même, a tendance à sous-estimer la consommation d'énergie quotidienne des consommateurs continus et de longue durée et de surestimer la consommation d'énergie des consommateurs de courte durée.

6.2. Puissance et énergie

C'est important de faire la différence entre **puissance** et **énergie** (électrique).

Puissance veut dire énergie par seconde et se mesure en Watt (W) ou Kilowatt (1 kW = 1000 W).

Énergie veut dire puissance multipliée par le temps. Une batterie ne stocke pas de puissance, mais de l'énergie.

Peu de puissance, mais sur une longue durée, peut conduire à beaucoup d'énergie consommée et peut décharger imperceptiblement la batterie. L'énergie est mesurée entre autre en Watt-heures (Wh) ou en Kilowatt-heures (1 kWh = 1000 Wh).

L'énergie stockée dans une batterie est le produit de la capacité (Ampère-heures) et de la tension (V) :
 $Wh = Ah \times V$ et $kWh = Ah \times V \times 1000$.

Donc une puissance de 2 kW pendant 1 heure veut dire une consommation d'énergie de :

$$2 \text{ kW} \times 1 \text{ heure} = 2 \text{ kWh.}$$

Par conséquent, la décharge d'une batterie 12V serait de : $2 \text{ kWh} / 12 \text{ V} = 2000 \text{ Wh} / 12 \text{ V} = 167 \text{ Ah}$

Une puissance de 2 kW pendant 1 minute (c'est à dire $1 / 60^{\text{e}}$ d'heure) déchargera une batterie de 12V de $(2000 / 60) / 12 = 2,7 \text{ Ah}$.

Une puissance de 2 kW pendant 1 seconde (c'est à dire $1 / 3600^{\text{e}}$ d'heure) déchargera une batterie de 12V de seulement $(2000 / 3600) / 12 = 0,046 \text{ Ah}$.

Par contre, une puissance de 2 kW pendant 10 heures déchargera une batterie de 12V de $2000 \times 10 / 12 = 1667 \text{ Ah} !$

En préparation des chapitres suivants, quelques exemples de consommation d'énergie et de puissance. seront traités dans les prochains paragraphes

6.3. Réfrigération

6.3.1. Introduction

Le réfrigérateur à bord est souvent un vrai cauchemar.

Sur un bateau de taille moyenne, le réfrigérateur consomme parfois plus d'énergie que tous les autres appareils ensemble. Sur des bateaux plus grands, ce sont le réfrigérateur et le congélateur qui épuisent le plus la batterie.

Et sur les yachts plus importants, c'est la climatisation qui oblige le groupe diesel à tourner jour et nuit. Pour mieux comprendre cet état de fait (et en trouver les solutions !), quelques notions théoriques nécessitent des éclaircissements. C'est le sujet du paragraphe suivant.

6.3.2. Théorie de la pompe à chaleur

Presque tous les systèmes de réfrigération aujourd'hui sont du type pompe à chaleur à compresseur. Ils fonctionnent ainsi:

Un compresseur, entraîné par un moteur à courant alternatif ou courant continu, comprime un gaz. A cause de la montée de la pression, le gaz s'échauffe. Le gaz est ensuite refroidi jusqu'à température ambiante dans un échangeur de chaleur: le condenseur. Sur un bateau de taille moyenne, le condenseur est soit un petit radiateur (souvent) avec un ventilateur, situé dans la petite armoire en dessous de l'évier, soit un radiateur beaucoup plus grand, ventilé de façon naturelle, à l'arrière du réfrigérateur (réfrigérateur type normal ménager), soit un condenseur refroidi à eau. Dans le condenseur, le gaz se condense en liquide libérant beaucoup de chaleur durant ce processus. Le liquide va ensuite vers l'évaporateur, la plaque froide dans le réfrigérateur ou le congélateur. Là, la pression s'abaisse et le liquide s'évapore. L'évaporation absorbe la chaleur ; cette chaleur est extraite du réfrigérateur ou du congélateur. Par la suite, le gaz se dirige de nouveau vers le compresseur, etc.

La quantité d'énergie nécessaire pour extraire une certaine quantité de chaleur de l'environnement, à l'aide d'une pompe à chaleur, peut être calculée avec la formule suivante :

$$\text{CoP (coefficient d'efficacité)} = n_r \times n_c = n_r \times T_b / (T_h - T_b)$$

CoP est le Coefficient d'efficacité ,

T_b, la température de l'évaporateur, exprimée en degrés Kelvin (=degrés Celsius + 273) ;

T_h la température du condenseur, également exprimée en degrés Kelvin ;

n_r le rendement utile ;

n_c le rendement théorique.

Le rendement utile est toujours inférieur à 1 , il est déterminé par toutes les pertes qui surgissent dans la pratique dans le système de refroidissement.

Prenons l'exemple d'un réfrigérateur :

- température de la plaque froide dans le réfrigérateur : -5°C. Autrement dit : T_b = - 5 + 273 = 268°K

- température du condenseur : 45°C. Autrement dit : T_h = 45 + 273 = 318°K

- rendement utile : 25 %

Le CoP (coefficient d'efficacité) est alors :

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

C'est-à-dire que pour chaque kWh de chaleur qui doit être évacuée du réfrigérateur, il faut 1 / 1,34 = 0,75 kWh d'énergie électrique.

6.3.3. Le réfrigérateur et le congélateur en pratique

Le block compresseur typique d'un réfrigérateur consomme environ 50 W, ou 4,2 A d'une batterie de 12 V. Le block compresseur est contrôlé par un thermostat. Si le block compresseur tourne en continu (cycle de fonctionnement à 100 %), 4,2 A x 24 h = 101 Ah par jour sont extraits de la batterie. Un cauchemar !

Un cycle de fonctionnement de 50 % donne comme résultat 50 Ah de consommation quotidienne et un cycle de fonctionnement de 25 % se traduit par une consommation quotidienne de seulement 25 Ah.

Comment réduire la consommation?

1) **Améliorer le coefficient d'efficacité CoP**, en diminuant la différence de température entre l'évaporateur et le condenseur, ou en augmentant le rendement du compresseur.
Si par exemple la température du condenseur est ramenée à 20 °C au moyen du refroidissement par eau, le CoP s'améliore d'un facteur deux:

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

Résultat : seulement $1 / 2,68 = 0,37$ kWh d'énergie électrique sera nécessaire pour évacuer 1 kWh de chaleur. Autrement dit : il faut 50 % de moins d'électricité !
L'efficacité du réfrigérateur ou du congélateur sera également améliorée en augmentant la superficie de l'évaporateur.

Trouver un block compresseur plus efficace est une autre affaire, car tous les petits blocks compresseurs sur le marché ont des spécifications similaires.

2) Améliorer l'isolation

Regardons tout d'abord combien d'énergie est nécessaire pour refroidir de la nourriture ou des boissons, dans le réfrigérateur.

Pour cela il est important de savoir que la chaleur spécifique de l'eau est de 1,16 Wh par litre et par °C. La chaleur spécifique des autres boissons et de la nourriture est à peu près similaire. Ce qui signifie que pour faire refroidir (ou réchauffer) d'un 1 °C 1 litre d'eau, une autre boisson, ou 1 kg de nourriture, il faut en extraire (ou ajouter) 1,16 Wh de chaleur.

Donc, si dans le réfrigérateur vous voulez refroidir jusqu'à 10 °C, 5 litres d'eau minérale qui a été chauffée au soleil à 35 °C, il faudra évacuer $5 \times (35 - 10) \times 1,16 = 0,145$ kWh de chaleur du réfrigérateur.

Avec un CoP de 1,34, l'énergie électrique nécessaire est de $0,145 / 1,34 = 0,108$ kWh, ce qui veut dire $0,108 / 12 = 9$ Ah d'une batterie de 12 V. 9 Ah n'est pas excessif, bien que nous soyons partis d'un CoP très faible.

La consommation quotidienne d'un réfrigérateur à bord d'un bateau est en général beaucoup plus élevée, et varie entre 50 et 100 Ah. Ce n'est donc pas le refroidissement des boissons et/ou de la nourriture qui consomme beaucoup d'énergie. Le problème est un manque d'isolation. Le block compresseur tourne avant tout pour évacuer la chaleur qui "fuit" vers l'intérieur par les parois et la porte du réfrigérateur.

Conclusion :

Une consommation électrique élevée du réfrigérateur et du congélateur à bord est due à une mauvaise isolation et/ou un mauvais CoP et non pas au refroidissement des boissons et de la nourriture.

Une excellente isolation est donc d'une importance cruciale pour limiter la consommation de courant !

Un réfrigérateur standard, vendu dans tout magasin électro-ménager, est de nos jours très bien isolé : La consommation énergétique annuelle d'un réfrigérateur moderne est d'environ 100 kWh, c'est à dire $100 / 365 = 0,27$ kWh par jour ou $0,27 \times 1000 / 24 = 11$ W (!) en moyenne. Avec un compresseur de 12 V, la consommation en Ah serait de $0,27 \times 1000 / 12 = 23$ Ah par jour.

La consommation énergétique d'un congélateur moderne est environ deux fois élevée et demanderait 46 Ah par jour pour une batterie 12 V.

Les réfrigérateurs pour les bateaux sont souvent fabriqués sur mesure, avec une isolation en mousse. Cette isolation est souvent extrêmement mauvaise et la consommation de courant est donc très élevée. Pour cette raison et si l'espace vous le permet, placez un congélateur et un réfrigérateur standard 230 V, alimentés par un convertisseur.

6.3.4. Climatisation

La climatisation exige des quantités énormes d'énergie. Surtout les petits systèmes de climatisation avec une capacité réfrigérante de 1 à 5 kW (3.400 à 17.000 Btu) ont souvent un très mauvais rendement. S'il y a toujours un groupe qui tourne, cela n'est pas un problème, sauf peut être en ce qui concerne la consommation de carburant. Mais dès que la climatisation doit fonctionner sur batterie, le rendement devient très important.

Tout comme le réfrigérateur et le congélateur, le climatiseur est une pompe à chaleur avec un compresseur, un condenseur et un évaporateur.

Qu'est-ce que la formule CoP nous apprend sur la climatisation ?

Calculons le coefficient d'efficacité, CoP avec les données suivantes :

- température du condenseur 27 °C (eau de refroidissement de 25 °C)
- température de l'évaporateur: 15 °C (température ambiante de 25 °C)
- rendement utile: 25 %

Le CoP est alors = $0,25 \times 288 / (300 - 288) = 6$

Dans la pratique, le CoP d'un petit système de climatisation est de 2 à 3 !

La raison est en général une température de condenseur beaucoup plus élevée et une température d'évaporateur beaucoup plus basse que ce que nous avons présumé.

Si nous partons d'un CoP de 2,5, une puissance frigorifique de 2 kW nécessitera $2 / 2,5 = 0,8$ kW de puissance électrique. Si cette climatisation tourne pendant 10 heures sur une batterie 24V, la décharge sera de $0,8 \times 1000 \times 10 / 24 = 333$ Ah !

Il pourrait donc s'avérer important de bien regarder la consommation de courant à l'achat de la climatisation !

6.4. Winchs électriques, guindeau électrique et propulseur d'étrave

Même sur des bateaux de taille moyenne, les winch, le guindeau et le propulseur d'étrave consomment énormément de courant, mais pendant une pendant un temps très limité.

- Un winch électrique sur un bateau de 15 m est le plus souvent entraîné par un moteur de 1 CV (1 CV = 0,736 kW). A charge nominale cela signifie $736 / 12 = 61$ A dans le cas d'un système 12 V. Quand le winch est utilisé pendant 1 minute, la consommation est de $61 / 60 = 1$ Ah (voir § 6.2). La consommation électrique ne pose donc aucun problème, malgré le courant élevé

- Un propulseur d'étrave consomme encore plus de courant. Un propulseur d'étrave 10 CV par exemple tire 300 A d'une batterie 24 V. Une utilisation d'une minute entraîne une décharge de $300 / 60 = 5$ Ah seulement.

6.5. Laver le linge et faire la vaisselle sur batterie ?

Un cycle de lavage à 60 °C avec une machine à laver consomme 0,9 kWh d'énergie électrique, c'est à dire $900 / 24 = 38$ Ah d'une batterie 24 V. A 40 °C, la consommation diminue jusqu'à 0,6 kWh, soit $600 / 24 = 25$ Ah. L'énergie nécessaire pour un lave-vaisselle est à peu près équivalente.

La plupart de l'énergie sert à chauffer l'eau (c'est de là que vient la grande différence de consommation entre un cycle à 60 °C et un cycle à 40 °C). L'application de lavage à l'eau chaude 'hot fill' (pourvoir la machine à laver et le lave-vaisselle avec de l'eau préchauffée, au lieu d'eau froide) réduirait encore la consommation d'énergie de quelques centaines de Wh !

La consommation d'énergie d'un sèche-linge, par contre, est considérable. Un sèche-linge demande 3 kWh. Sécher pendant une heure demande donc 3 kWh, ce qui veut dire $3000 / 24 = 125$ Ah d'une batterie 24 V. Cela est du au principe de fonctionnement : absorption d'eau par air chaud (et chauffage électrique de l'air).

Un cycle de lavage/séchage complet d'un petit lave-linge/sèche-linge demande environ 2.7 kWh.

6.6. Table de cuisson électrique sur batterie ?

Je pensais que la consommation de courant serait beaucoup trop élevée. Mais la théorie et la pratique démontrent le contraire. Et depuis j'ai installé une table de cuisson à induction sur mon trimaran. Elle est alimentée par un Phoenix Multi 24/3000/70 et une batterie de 200 Ah / 24 V.

La table de cuisson à induction est idéale, parce que ce n'est pas le plan de cuisson qui est chauffé, mais directement le fond de la casserole. C'est donc très efficace, pas de risque de brûlures et pas de gaz à bord !

Voici maintenant le contexte théorique, qui est très simple :

Comme déjà mentionné dans paragraphe 6.3.3, la chaleur spécifique de l'eau est de 1,16 Wh par litre et par °C. Théoriquement, faire bouillir 1 litre d'eau à 20 °C demanderait donc $1,16 \times (100 - 20) = 93$ Wh. Dans la pratique, cela demande plus de 100 Wh, tout dépend de la capacité thermique de la casserole et des autres pertes. Ces pertes peuvent être compensées en utilisant l'eau préchauffée du chauffe-eau.

Bref, 100 Wh par litre est une bonne règle pratique.

Un exemple pratique :

Le repas d'aujourd'hui se compose de spaghettis accompagnés d'une sauce maison avec un pudding comme dessert. Le repas cuisiné est pour 4 personnes.

Pour les spaghettis, il faut faire bouillir 4 litres d'eau, puis y ajouter les spaghettis, refaire bouillir le tout et laisser cuire pendant 8 minutes. Consommation d'énergie : 400 Wh pour faire bouillir l'eau, 100 Wh pour refaire bouillir le tout et 400 W pendant 8 minutes pour faire cuire les spaghettis, un total de $400 + 100 + 400 \times 8 / 60 = 550$ Wh.

Pour la sauce, il faut faire cuire les oignons (150 Wh), y ajouter la viande hachée et faire cuire à nouveau le tout (150 Wh), y ajouter ensuite les tomates fraîches, les épices etc. puis porter la sauce à ébullition (1 litre, donc 100 Wh), ensuite laisser mijoter la sauce pendant 20 minutes (200 W pendant 20 minutes), un total de $150 + 150 + 100 + 200 \times 20 / 60 = 470$ Wh.

Pour le dessert il est nécessaire de chauffer 2 litres de lait venant directement du réfrigérateur (300 Wh), et le laisser mijoter 3 minutes (30 Wh), un total de $300 + 30 = 330$ Wh.

Énergie totale nécessaire : $550 + 470 + 330 = 1350$ Wh, ou $1350 / 24 = 56$ Ah d'une batterie de 24 V.

J'ai aussi testé ce qui précède dans la pratique et le résultat c'est que pour la plupart des repas à 3 plats et pour 4 personnes il faut en effet de 1200 à 1400 Wh, c'est à dire 50 à 60 Ah d'une batterie de 24 V.

6.7. Le compresseur de plongée

J'aime la plongée. Ce que je trouve ennuyeux c'est qu'après la plongée il faille lever l'ancre, rentrer au port et porter mes bouteilles au club de plongée pour les faire remplir. Pourquoi ne pas installer un compresseur de plongée à bord ?

Un petit compresseur de plongée est entraîné par un moteur électrique d'environ 3 kW et le courant d'appel est environ 10 fois la puissance nominale : bref trop pour le raccordement au courant de quai et trop également pour être alimenté par un convertisseur ou un petit groupe électrogène.

La solution est un moteur à courant triphasé avec un variateur de fréquence. Il est alors nécessaire d'installer un variateur de fréquence avec une entrée monophasée (pour le raccordement sur le convertisseur ou le courant de quai) et une sortie triphasée. Le variateur de fréquence fait en sorte que le moteur se met à tourner petit à petit afin que le courant d'appel soit négligeable.

Pour remplir une bouteille de plongée de 10 l, il faut compter environ 30 minutes, ce qui veut dire que $(3 \text{ kW} / 24 \text{ V}) \times 0,5 = 62$ Ah sont extraits d'une batterie 24 V.

6.8. Comment réduire le courant de d'appel des moteurs électriques

La solution est déjà donnée dans le paragraphe 6.7 : utiliser des moteurs à courant triphasé et éliminer le courant d'appel à l'aide d'un variateur de fréquence.

6.9. Conclusion

Le réfrigérateur mal isolé consommera plus d'énergie que les consommateurs à courte durée tels que la machine à laver, le lave-vaisselle ou même la plaque de cuisson à induction.

7. LE GROUPE ELECTROGENE

7.1. Moteur diesel avec générateur Courant Alternatif (CA) de 50 Hz ou 60 Hz

C'est la solution la plus adaptée pour générer du courant à bord, quand la consommation dépasse les possibilités de l'alternateur sur le moteur de propulsion.

- 7.1.1. Un moteur qui travaille est plus efficace et dure plus longtemps qu'un moteur qui tourne à vide**
Pour générer 50 Hz ou 60 Hz, le groupe doit tourner à régime constant. 3000 tours par minute ou 1500 tours par minute pour 50 Hz, tout dépend du nombre de pôles du générateur.
(3000 tr/min / 60 = 50 tours par seconde = 50 Hz).

Mais attention ! Faire tourner le groupe toute la journée, souvent pratiquement à vide, n'est pas conseillé. La température interne du moteur reste trop basse, ce qui provoque la condensation (conséquence : de l'eau dans de l'huile) et, bien pire, la vitrification des cylindres.

7.1.2. Un système hybride

La solution est un système hybride où le groupe tourne seulement quand beaucoup de puissance électrique est nécessaire, (quand il tourne, il est également utilisé pour charger les batteries), alors qu'un convertisseur Courant Continu/Courant Alternatif est utilisé le reste du temps pour générer le CA. Le système peut être amélioré par application d'un ou plusieurs convertisseurs bidirectionnels Phoenix Multi ou MultiPlus, éventuellement connectés en parallèle pour obtenir la puissance désirée (voir par exemple paragraphe 10.6).

Les avantages du système hybride :

- Courant alternatif ininterrompu à bord.
- Utilisation plus efficace du groupe, moins d'espace et de poids et moins de bruit puisqu'un groupe plus petit peut alors être choisi : le MultiPlus fonctionne en parallèle avec le générateur ; si la demande dépasse la capacité du groupe, le MultiPlus prend un complément d'énergie dans les batteries et l'ajoute en sortie. (voir par exemple § 10.6.5. et de nombreux exemples et explications sur le site web www.victronenergy.com)

7.1.3. Et n'oubliez pas le courant de quai (limité)

Une machine à laver, un lave-vaisselle, une table de cuisson électrique, la climatisation, on peut tout faire avec un groupe puissant. Mais le courant de quai est souvent limité à 16 A ou même encore moins (16 A x 230 V = 3,68 kW). Egalement dans ce cas, le MultiPlus viendra à votre aide. Il fonctionnera en parallèle avec la prise de quai. Si la demande dépasse la capacité, le MultiPlus prendra un complément d'énergie dans les batteries et l'ajoutera en sortie.

7.1.4. 3000 tr/min ou 1500 tr/min ?

Si vous faites souvent usage de votre groupe, un ensemble (plus cher et plus lourd) à 1500 tours est conseillé. Les groupes 3000 tours sont conçus pour un nombre d'heures de fonctionnement limité. Et par ailleurs : ne chargez jamais un petit générateur à 3000 tours à plus de 80 % de la puissance nominale! Il ne le supporterait pas.

7.2. Générateurs courant continu (CC)

Les générateurs Courant Continu deviennent de plus en plus populaires. Avec des puissances allant jusqu'à 10 kW, on peut réaliser un courant de charge d'environ 300 A dans une batterie 24 V. Les générateurs CC sont plus petits et plus légers et ont un rendement plus élevé que les générateurs CA. Par ailleurs, le régime moteur peut être adapté à la charge, ce qui améliore le rendement et la durée de vie.

Le générateur CC est utilisé pour charger les batteries. Pour en faire du courant alternatif il faudra des convertisseurs CC/CA. Le choix de la puissance du générateur CC dépendra du courant de charge de batterie et du choix du nombre d'heures de fonctionnement par jour.

Mais faites attention ! La batterie doit avoir suffisamment de capacité. Pour un courant de charge de 300 A et un régime C / 5 il faudra une batterie de 1500 Ah (voir § 2.5.6.).

8. L'ELECTRICITE AUTONOME : UNE AUTRE FACON D'ATTAQUER LE PROBLEME

8.1. Introduction

L'objectif de ce livre est l'étude de l'électricité autonome. Nous nous limitons à des systèmes dans lesquels un parc de batteries joue un rôle central, c'est à dire des systèmes de petite et moyenne puissance (génération d'électricité de quelques centaines de Watt jusqu'à 10 kW). Autrement dit, des systèmes qui, sur une période de 24 heures, nécessitent une production d'énergie électrique allant de $24 \times 0,2 = 4,8$ kWh à $24 \times 10 = 240$ kWh.

C'est l'énergie électrique nécessaire à une personne ou à quelques familles pour pouvoir vivre confortablement, dans une ou quelques maisons, dans un camping-car ou à bord d'un bateau. Plusieurs développements techniques récents nous amènent à revoir d'un œil critique l'efficacité des solutions en vigueur.

Une caractéristique très importante des applications traitées ici, est que la puissance électrique peut fluctuer fortement : parfois la demande sera presque nulle et à d'autres moments, une puissance énorme sera demandée.

Lorsqu'un groupe diesel est utilisé pour fournir l'électricité nécessaire, la puissance du groupe devra être égale ou supérieure à la demande maximale qui pourra se produire. Par conséquent, la plus part du temps le groupe tournera pratiquement à vide. Le résultat est une consommation de carburant élevée, pour ne pas parler du bruit, de l'entretien et de la pollution.

Un problème qui concerne plus spécifiquement les bateaux (et les camping-cars), c'est la prise de quai. En général la prise de quai ne fournit pas suffisamment de courant pour l'utilisation d'une machine à laver, une cuisinière électrique ou une climatisation. Et si vous traversez l'Océan Atlantique, vous aurez à faire à d'autres tensions et une fréquence de 60 Hz au lieu de 50 Hz.

Des nouvelles technologies offrent des solutions simples et bon marché à ces problèmes.

8.2. Des nouvelles technologies rendent le concept de CC plus attractif

8.2.1. Le concept CC

Dans le concept CC, la batterie est le centre du système. Sont branchés sur la batterie : d'un côté les sources d'énergie et de l'autre côté les consommateurs. La batterie fournit de l'énergie quand la demande est supérieure à l'offre et absorbe de l'énergie quand l'offre est supérieure à la demande. Dans le concept CC, la batterie joue le rôle de tampon pour l'énergie électrique, en compensant le déséquilibre éventuel entre les fournisseurs d'énergie et les consommateurs d'énergie. Autrement dit : la batterie sert d'écrêteur (anglais : peak shaver).

En fait, tous les bateaux de taille moyenne utilisent le concept CC :

Le courant est produit par un ou plusieurs alternateurs sur le moteur de propulsion. Parfois aussi par d'autres sources, telles que l'énergie solaire ou éolienne, ou bien par un générateur entraîné par sillage. Toutes ces sources de courant sont utilisées pour recharger la batterie de servitude. Tous les consommateurs, tels que les instruments de navigation, l'éclairage, le convertisseur, etc. obtiennent leur courant à partir de la batterie.

La solution standard sur les bateaux plus importants est le groupe diesel, qui tourne en continu, ou qui est mis en marche à chaque fois qu'un appareil ménager à 230 V est utilisé.

Dans les paragraphes suivants sont présentées 3 nouvelles évolutions qui rendent beaucoup plus attractif le concept CC.

8.2.2. Groupe CC

Les groupes CC deviennent de plus en plus populaires. Les groupes CC sont plus petits et plus légers et ont un rendement plus élevé que les groupes CA. Par ailleurs, le régime moteur peut être adapté à la charge, ce qui améliore le rendement et la durée de vie.

8.2.3. Puissance convertisseur pratiquement illimitée

Les convertisseurs sinus sont entre-temps devenus très efficaces et sont disponibles avec des puissances de plus en plus grandes.

Ce qui est nouveau, c'est la possibilité d'augmenter la puissance en connectant les convertisseurs en parallèle.

Victron Energy a développé des convertisseurs et des chargeurs/convertisseurs qui peuvent être connectés en parallèle aussi bien dans une configuration monophasée que triphasée.

Le Multi 12/2500/120 et le Multi 24/3000/70 par exemple, ont une puissance continue de 2 kW sur 12V et de 2,5 kW sur 24 V.

Par phase, on peut brancher au maximum 6 appareils en parallèle. Si nous prenons comme exemple un système 24 V, nous pouvons atteindre la puissance de sortie suivante:

Système monophasé 6 x Multi i 24/3000	Puissance continue 6 x 2,5 = 15 kW	P30 18kW	Puissance maximale 30 kW
--	---------------------------------------	-------------	-----------------------------

Système triphasé 18 x Multi 24/3000	Puissance continue 18 x 2,5 = 45 kW	P30 54 kW	Puissance maximale 90 kW
--	--	--------------	-----------------------------

(P30 : puissance 30 minutes)

Autrement dit: pour toutes les applications traitées dans ce livre, la puissance demandée peut être fournie par un ou plusieurs convertisseurs parallèles.

Là où l'installation d'un groupe électrogène CA 230 V était indispensable auparavant, les convertisseurs parallèles sont aujourd'hui une alternative.

8.3. Le concept CA, amélioré avec *PowerControl*

8.3.1. Le concept CA

Dans le concept Courant Alternatif, un ou plusieurs groupes diesel sont au cœur du système. Le(s) groupe(s) doit(vent) avoir une puissance suffisante pour satisfaire la demande d'électricité maximale qui pourrait se produire.

De même pour la prise de quai.

8.3.2. Le concept CA avec période de silence

Sur un bateau de taille moyenne (10 à 15 mètres) les désavantages du concept CA sont évidents. Le groupe fonctionnera à vide pendant des longues périodes, ou devra être mis en route puis arrêté fréquemment. Le résultat : beaucoup de bruit, de pollution, de consommation de carburant, d'usure et d'entretien.

Une façon d'améliorer cette situation est l'introduction d'une période de silence, pendant laquelle le groupe ne tourne pas. Pendant la période de silence la batterie de servitude et un convertisseur remplacent le groupe. Périodiquement, de préférence aux moments où la demande d'électricité est élevée, le groupe est mis en marche et utilisé simultanément pour recharger la batterie de servitude.

Récemment des nouvelles technologies ont été développées pour perfectionner encore plus le concept CA. C'est le sujet du paragraphe suivant.

8.3.3. *PowerControl*

L'intention du concept CA avec une période de silence est de laisser tourner le groupe un minimum de temps. Quand le groupe tourne, la batterie de servitude doit également être chargée. Ce qui signifie qu'une bonne partie de la puissance produite par le groupe sera absorbé par les chargeurs de batterie. Bref : il faudra installer un groupe plus puissant.

Avec *PowerControl*, cela n'est pas nécessaire.

Avec la fonction *PowerControl* du Phoenix Multi, le courant de charge est automatiquement réduit quand le groupe risque d'être trop chargé suite à la demande croissante des autres consommateurs. Le Multi tient donc compte des autres consommateurs et n'utilise que le courant 'restant' pour charger la batterie.

Par exemple :

Un bateau est équipé d'un groupe diesel et d'un Phoenix Multi 24/3000/70.

Une petite machine à laver est branchée sur le groupe ; elle demande 2 kW pour chauffer l'eau et seulement 150 W pour le moteur du tambour. Consommation moyenne : 500 W.

La batterie à charger est de 24 V 400 Ah et le courant de charge maximal du Multi est de 70 A. Le Multi absorbe alors une puissance d'environ $70 \text{ A} \times 30 \text{ V} = 2,1 \text{ kW}$.

La charge CA maximale à prévoir est de 2 kW pour la machine à laver plus 2,1 kW pour charger la batterie.

Puissance nominale nécessaire du groupe : $2 + 2,1 = 4,1 \text{ kW}$. Pour éviter que le groupe tourne à pleine charge (beaucoup de petits groupes ne supportent pas cela pendant longtemps) il faut choisir, dans la pratique, un modèle d'au moins 5 kW.

Une variante serait de ne pas charger les batteries pendant que le lave-linge tourne. Désavantage : cela prolongerait le temps de service du groupe et conduirait à une charge moyenne de seulement 500 W pendant la période du lavage. Groupe nécessaire : minimum 2,1 kW, dans la pratique 3 kW.

La fonction *PowerControl* de Multi permet de charger les batteries à l'aide d'un groupe 3 kW alors que la machine à laver tourne en même temps. Avec le tableau de commande Phoenix Multi Control il est possible de régler le courant groupe maximal. Le courant peut par exemple être réglé sur 10 A, ce qui limiterait la puissance de sortie du groupe à $10 \text{ A} \times 230 \text{ V} = 2,3 \text{ kW}$, soit 77 % de la puissance nominale de 3 kW. Après le démarrage du groupe, le Multi commuterait automatiquement de la fonction convertisseur CC/CA sur la fonction chargeur de batterie, avec un débit de 70 A.

Quand la machine à laver est mise en marche, le Multi continuera à débiter 70 A tant que l'élément de chauffage de la machine à laver est à l'arrêt (80 % du temps). La charge du groupe est alors de $150 \text{ W} + 2,1 \text{ kW} = 2,25 \text{ kW}$, juste en dessous de la limite paramétrée de 2,3 kW.

Dès que la production d'eau chaude se met en marche (20 % du temps) la consommation de la machine à laver augmente jusqu'à 2 kW, et seulement $2,3 \text{ kW} - 2 \text{ kW} = 300 \text{ W}$ reste disponible pour recharger de la batterie. Avec *PowerControl* le Multi réduira **automatiquement** le courant de charge à environ $300 \text{ W} / 30 \text{ V} = 10 \text{ A}$. Le groupe ne sera donc pas surchargé.

Cet exemple démontre que grâce à la fonction *PowerControl* le groupe est utilisé de manière beaucoup plus efficace. Pendant 80 % du temps de fonctionnement du lave-linge, les batteries pourront être chargées simultanément avec le courant de charge maximum disponible.

L'exemple ci-dessus s'applique aussi à la prise de quai.

La prise de quai est souvent trop faible pour l'utilisation d'appareils ménagers à bord, même si on évite de charger les batteries en même temps. Pensez par exemple à la machine à laver dans l'exemple ci-dessus, pour laquelle il nous faut une prise de quai de minimum $2 \text{ kW} / 230 \text{ V} = 9 \text{ A}$. Pour une table de cuisson électrique de 7,5 kW, nous aurions même besoin d'une prise de quai de plus de 32 A !

PowerAssist a été développé pour apporter une solution à ce problème.

8.4. Nouveau : *Powerassist*, le concept CA avec soutien de batterie

8.4.1. *PowerAssist*

PowerAssist est une fonction distincte du Phoenix MultiPlus, qui donne une dimension supplémentaire au principe du *PowerControl*. Si la demande dépasse la capacité du groupe électrogène ou de la prise de quai, le convertisseur du MultiPlus prend un complément d'énergie dans les batteries et l'ajoute en sortie. Il est ainsi possible de faire face momentanément à des intensités de pointe supérieures à la puissance d'un groupe ou d'un raccordement au quai. Lorsque la puissance demandée diminue, l'excédent est utilisé pour recharger la batterie.

En connectant plusieurs unités en parallèle, cette fonction de "fourniture supplémentaire" peut être adaptée à pratiquement toutes les puissances désirées.

Deux exemples :

Exemple 1: raccordement courant de quai limité à 4 A

Mettons que le micro-ondes, de 1500 VA, est l'appareil connecté ayant la plus haute puissance. Le micro-ondes demandera un maximum de $1500 \text{ VA} / 230 \text{ V} = 6,5 \text{ A}$ de courant de quai. Quand le micro-ondes est mis en marche au moment même où votre cafetière (4 A) commence à diffuser l'arôme délicieux de café fraîchement passé, la consommation de courant s'élève à $4 + 6,5 = 10,5 \text{ A}$.

Résultat : le fusible de quai saute à nouveau !

La solution est un MultiPlus, par exemple un Phoenix MultiPlus 12/2500/120 avec un tableau de contrôle 'Phoenix Multi Control'.

Avec le bouton tournant sur le tableau, vous réglez le courant de quai sur 4 A.

Si vous allumez maintenant le micro-ondes pendant 5 minutes, le MultiPlus "fournira en supplément" $6,5 - 4 = 2,5$ A. L'énergie nécessaire pour cette fonction supplément provient de la batterie. Le courant de décharge de la batterie s'élèvera à environ $2,5 \text{ A} \times 230 \text{ V} / 12 \text{ V} = 50$ A. La décharge totale pour une utilisation du micro-ondes pendant 5 minutes est seulement de $50 \text{ A} \times 5 / 60 = 4$ Ah ! Si en plus la cafetière est allumée, la consommation de courant de la batterie augmentera avec $4 \text{ A} \times 230 \text{ V} / 12 \text{ V} = 80$ A, au total donc $50 + 80 = 130$ A. La décharge totale est de $13 \text{ A} \times 5 / 60 = 11$ Ah après 5 minutes. Après avoir utilisé le micro-ondes et fait le café, le MultiPlus utilisera le courant de quai disponible pour recharger les batteries.

Avec 4 A de courant de quai, le courant de charge sera d'environ $4 \text{ A} \times 230 \text{ V} / 12 \text{ V} = 77$ A (dans la pratique un peu moins, environ 50 A, suite à des pertes dans le système, et parce que la tension batterie deviendra rapidement supérieure à 12 V). Après seulement un quart d'heure, la batterie sera à nouveau chargée.

Exemple 2 : utiliser la table de cuisson électrique avec un raccordement au courant de quai de 16 A et 3x MultiPlus 24/2500/70 connectés en parallèle.

Supposons que vous avez à bord un groupe diesel de 12 kVA ainsi qu'une table induction à 4 foyés, puissance maximale absorbée 7,5 kW, ce qui veut dire $7500 \text{ W} / 230 \text{ V} = 33$ A d'une alimentation monophasée 230 V. Pour le groupe, aucun problème, mais même avec une prise de quai de 16 A, on ne peut pas faire grande chose !

La solution est la fonction **PowerAssist** du Phoenix MultiPlus. Voici l'explication :

Quand toutes les plaques sont allumées au maximum, le système MultiPlus doit fournir un supplément de $33 - 16 = 17$ A.

C'est-à-dire un courant de décharge de la batterie de $17 \text{ A} \times 230 \text{ V} / 24 \text{ V} = 165$ A. Vous ne laisserez pas plus de 5 minutes toutes les zones de cuisson au maximum. Pendant cette période, seulement $165 \text{ A} \times 5 / 60 = 14$ Ah sera extraite de la batterie ! Quand l'eau bout et la poêle est chaude, vous réduisez la puissance des foyers. La pratique montre que la consommation de courant sera alors inférieure à 16 A. La batterie ne se décharge plus ou très peu. Bref : même avec encore moins de courant de quai, la table de cuisson électrique ne déchargera pas beaucoup la batterie.

Les avantages du système MultiPlus seront encore mieux utilisés si le système est également connecté sur le groupe. Le système MultiPlus réduira la déformation de la tension de sortie du groupe (les tables de cuisson induction sont très sensibles et s'arrêtent quand la tension est trop déformée) et vous disposez d'un courant de charge de batterie de $3 \times 70 = 210$ A.

De plus :

- Un groupe plus petit peut vous suffire : en effet, le système MultiPlus peut fournir le supplément nécessaire durant les périodes de demande maximale.
- Vous n'aurez plus besoin du groupe pour préparer une tasse de café ou un oeuf au plat: cela vous le faites en silence avec le système MultiPlus et la consommation de la batterie ne dépassera pas 10 à 20 Ah.
- Vous pouvez utiliser un signal du système MultiPlus pour démarrer automatiquement le groupe en cas d'appel de pointe.

En ajoutant temporairement une puissance supplémentaire en provenance de la batterie, le MultiPlus avec PowerAssist résout le problème d'insuffisance du courant de quai ou du groupe.

8.4.2. Autres avantages du Phoenix Multi

Tension alternative sans interruption

- La tension alternative est toujours disponible : les Multis 'rattrapent' toute coupure de tension.

Disponibilité immédiate

- Si avec des Multis (connectés en parallèle), il y a suffisamment de puissance installée, tous les appareils à bord peuvent s'utiliser sans mettre tout d'abord en marche un groupe. Le groupe peut être démarré ultérieurement de façon automatique à l'aide d'un signal du moniteur de batterie ou par le relais de démarrage intégré dans le Multi.

8.4.3. Courant de quai

Nous avons vu que le problème de courant de quai peut se résoudre à l'aide du MultiPlus et de la fonction *PowerAssist*. Dans la pratique il est quand même conseillé, de disposer d'au moins de 2 A de courant de quai par Multi. Si, par exemple, 3 Multis sont connectés en parallèle, la puissance connectée devrait être alors de $2 \times 3 = 6$ A minimum.

Si non **il est conseillé d'utiliser le concept CC pour le courant de quai**. Autrement dit : utiliser un chargeur de batteries pour convertir le courant de quai en CC et transformer le CC en CA à l'aide des convertisseurs ou des Multis qui se trouvent déjà à bord. La batterie de servitude fournira l'énergie supplémentaire quand il y aura un grand besoin de puissance et sera rechargée au moyen du chargeur de batterie pendant les périodes à faible besoin de puissance. Avec une prise de quai de 4 A, le courant de charge d'un chargeur de batterie 24 V sera limité à $230 \text{ V} \times 4 \text{ A} / 30 \text{ V} = 30$ A maximum. Dans le cas d'une batterie 12 V la limite est de 60 A.

8.5. Une autre façon d'attaquer le problème

8.5.1. Besoin d'énergie quotidien

En appliquant le concept CC ou le concept CA soutenu par batterie, la puissance du groupe ou de la prise de quai n'est en effet plus déterminée par la consommation maximale qui pourrait se produire, mais par la consommation moyenne.

Le courant de quai est généralement disponible 24 heures sur 24. Le calcul se fait donc ainsi :

puissance moyenne (Watt) = besoin d'énergie quotidien (kWh) x 1000 / 24 heures, et

prise de quai nécessaire = puissance moyenne / 230 V

Par exemple

- besoin d'énergie par jour : 48 kWh (voir chapitre 11)
- puissance moyenne : $48 \text{ kWh} \times 1000 / 24 \text{ heures} = 2000 \text{ W}$
- prise de quai nécessaire d'au moins $2000 / 230 \text{ V} = 8 \text{ A}$

Dans la pratique il en faut un peu de réserve et si possible il faut aussi charger les batteries, ce qui fait qu'une connexion de 10 A ou de 16 A serait nécessaire.

Les alternateurs attelés sur le moteur de propulsion ou le groupe diesel ne tournent généralement pas 24 heures sur 24

Le temps de service nécessaire par jour pour générer le besoin d'énergie quotidien est calculé avec la formule suivante :

temps de service (heures) = besoin d'énergie quotidien (kWh) / puissance de la ou des source(s) électrique(s) (kW)

Ou, si le temps de service doit être limité à un nombre d'heures précis, la formule est :

puissance de la ou des source(s) électrique(s) = besoin d'énergie quotidien / temps de service

Quelques exemples :

8.5.1.1 Énergie nécessaire par jour : 4 kWh (voir chapitre 9)

Source : l'alternateur attelé sur le moteur qui fournit 100 A à une batterie 12 V, c'est à dire $100 \text{ A} \times 12 \text{ V} = 1,2 \text{ kW}$

Temps de service nécessaire par jour: $4 \text{ kWh} / 1,2 \text{ kW} = 3,3 \text{ h}$

(Dans la pratique, le temps de service sera un peu plus long à cause des pertes dans le système et d'une capacité d'absorption de courant probablement faible de la part de la batterie à la fin du cycle de charge, mais pour une première estimation, le calcul est assez correct)

8.5.1.2 Besoin d'énergie quotidien : 14 kWh (voir chapitre 10)

Source : groupe diesel, et temps de service limité à 4 heures par jour

Puissance minimum du groupe: $14 \text{ kWh} / 4 \text{ h} = 3,5 \text{ kW}$

8.5.2. Capacité batterie

Si la génération d'énergie électrique est limitée à quelques heures par jour (l'alternateur attelé sur le moteur de propulsion ou un groupe qui ne tourne pas en continu), la capacité de la batterie est déterminée par la quantité d'énergie que la batterie doit fournir durant les périodes de silence, c'est-à-dire quand le moteur ou le groupe sont arrêtés.

Avec un moteur ou un groupe qui ne tourne que quelques heures par jour, la batterie ne pourra pas être chargée à plus de 80 %. Pour éviter un vieillissement prématuré la batterie ne doit pas être déchargée au-delà de 70 % de la capacité nominale. Ce qui donne une capacité de batterie utile maximum de $80 \% - 30 \% = 50 \%$.

Une marge de sécurité d'environ 10 % est à conseiller, ce qui limite la décharge à 60 % et la capacité utile à 40 %. De plus, nous devons tenir compte d'une perte de capacité de 20 % quand la batterie vieillit. La capacité utile devient alors de $40 \% \times (100 - 20) = 32 \%$.

Finalement, si la batterie est déchargée plus rapidement ou plus lentement que le régime de décharge nominal (le régime de décharge nominal est en général 20 heures, voir § 2.5.3), un coefficient de correction doit être appliqué. Dans la plupart des cas, le temps de décharge de la batterie de servitude est de 8 à 12 heures, et 32 % de décharge en 8 heures est équivalent à $32 \times 24 / 8 = 96 \%$ de décharge en 20 heures. Ce régime de décharge est donc comparable au régime nominal de 20 heures, et une correction supplémentaire n'est pas nécessaire.

(le soulagement du lecteur est tout à fait compréhensible: la capacité utile aurait baissée jusqu'aux environs de zéro, s'il y avait encore plus de corrections à appliquer !)

Conclusion :

Le calcul exact de la capacité de la batterie nécessaire n'est pas si simple. Travailler avec une règle empirique serait plus commode.

La règle basée sur la pratique est que dans le cas des 2 cycles de charge/décharge par jour, la capacité de la batterie doit être au moins de deux fois la consommation d'électricité par jour.

Quand la consommation journalière est par exemple 128 Ah (voir § 9.3), la capacité de la batterie doit être au moins $128 \times 2 = 256$ Ah.

Voyons comment cette règle empirique se compare à la théorie :

La théorie nous a montré que la capacité de batterie utile est de 32 % de la capacité nominale. Partant d'une période maximale de 12 heures entre les cycles de charge et une consommation de $128 / 2 = 64$ Ah pendant cette période : 32 % de capacité utile signifierait dans cet exemple que nous avons besoin d'une batterie de $64 \text{ Ah} / 0,32 = 200$ Ah.

La différence positive entre la pratique et la théorie de $265 - 200 = 65$ Ah. Cette différence peut être attribuée au fait qu'en pratique, la décharge n'est pas constante, mais qu'elle varie selon les consommateurs connectés. La durée des périodes de charge et de décharge peut aussi varier. Autrement dit : la théorie mène grosso modo au même résultat que la règle empirique.

Nous avons maintenant deux règles pratiques simples pour calculer la capacité nécessaire de la batterie de service.

1) La capacité de la batterie de servitude doit être au moins de trois fois la décharge pendant la période de silence. ($100 \% / 32 \% = 3,1$)

2) Quand la batterie de servitude est chargée deux fois par jour, la capacité doit être au moins de deux fois la consommation par jour.

Deux exemples :

1) Quantité maximale d'énergie extraite de la batterie pendant la période de silence : 4 kWh.

Capacité minimum de la batterie (système 12 V): $4 \text{ kWh} \times 3 / 12 \text{ V} = 1000$ Ah.

Capacité minimum de la batterie (système 24 V): $4 \text{ kWh} \times 3 / 24 \text{ V} = 500$ Ah.

2) Quantité d'énergie extraite de la batterie par jour : 4 kWh, ce qui veut dire $4000 / 12 = 333$ Ah pour un système 12 V.

Nombre de cycles de charge par jour: deux.

Capacité minimum de la batterie (système 12 V): $333 \times 2 = 666$ Ah.

8.5.3. Courant de quai

Si le groupe est suffisamment puissant pour honorer la consommation maximale à bord, la connexion au courant de quai devrait, évidemment, être aussi en mesure de fournir la consommation maximale à bord.

Mettons que le micro-ondes de 1500 VA est l'appareil qui consomme le plus d'électricité. Le micro-ondes demandera $1500 / 230 = 6,5$ A d'une prise de quai de 230 V. Si en même temps le ballon d'eau chaude électrique se met en marche (4 à 5 A) et que votre cafetière (4 A) commence à diffuser l'arôme délicieux du café qui passe, votre consommation de courant augmente à $6,5 + 4 + 5 = 15,5$ A.

Autrement dit : il suffit qu'en plus votre fille prend le sèche cheveux et vous faites sauter une prise de quai de 16 A !

Pour ne même pas parler d'une machine à laver (9 à 13 A), d'un lave-vaisselle (également 9 à 13 A) ou d'une table de cuisson électrique (16 à 35 A).

C'est pourquoi un bateau d'un peu d'importance est équipé d'un groupe de 6 kW ou plus (qui fournit donc $6000 / 230 = 26$ A ou plus) pour faire marcher tout l'équipement à bord.

Le résultat est que les 16 A du quai ne suffisent pas et que le groupe doit être mis en service, même si le bateau est amarré au port. Ce n'est pas vraiment la meilleure façon pour se faire des amis sur les bateaux voisins. Et par ailleurs, l'utilisation du groupe dans le port est de plus en plus souvent interdite.

La solution est d'attaquer le problème de façon différente et d'appliquer le concept CC ou le concept CA avec *PowerAssist* pour le courant de quai.

Le micro-ondes, par exemple, utilise 6,5 A, mais seulement pendant 5 minutes. Si on calcule la moyenne de ce courant sur 50 minutes, les 6,5 A diminueront jusqu'à un dixième (0,65 A), mais pendant une période dix fois plus longue: 50 minutes au lieu de 5 minutes.

C'est exactement ce que fait le concept CC, ou le concept CA avec *PowerAssist*: utiliser la batterie pour écrêter les pointes de consommation de courant (anglais: *peak shaving*).

L'exemple d'un bateau équipé « toutes options », décrit dans le § 9.5, où le micro-ondes est en effet l'appareil qui utilise le plus d'électricité, montre que la consommation énergétique quotidienne est de 3 kWh quand le bateau est au mouillage, ce qui se traduit par une consommation moyenne de $3000 / 24 = 125$ W, c'est-à-dire un courant de décharge moyen de 11 A de la batterie de servitude 12 V. En utilisant le concept CC, le courant de quai ne serait que de $125 / 230 = 0,6$ A pour une consommation moyenne de 125 W ! Dans la pratique, le courant de quai sera un peu plus élevé, dû aux pertes et à un minimum de réserve pour charger la batterie, mais même 1 A c'est encore presque rien.

L'exemple du chapitre 10 montre qu'avec beaucoup plus d'appareils électriques à bord, la prise de quai nécessaire peut être réduite de 8 kW (prise de quai triphasée 16 A nécessaire) jusqu'à seulement 1,3 kW (prise de quai 230 V 6 A), grâce au concept CC.

Augmenter le confort à bord et réduire le courant de quai.

Comme les exemples nous le montrent, le concept CC conduit vraiment à une réduction époustouflante du besoin de puissance de la prise de quai.

Le besoin de courant en moyenne est généralement inférieur à $\frac{1}{4}$ ou même, selon le profil de consommation de courant à bord, inférieur à $\frac{1}{10}$ du besoin maximum de courant. C'est pourquoi le chargeur de batterie, nécessaire pour se connecter sur le courant de quai, sera assez petit : un petit investissement comparé aux frais totaux de l'infrastructure électrique à bord.

De plus, une prise de courant de quai à basse puissance est beaucoup plus facile à trouver dans un port de plaisance saturé, qu'une prise triphasée ou une prise 32 A !

Deux autres avantages spécifiques au concept CC :

Tension alternative antiparasitée, et stable

Quoi qu'il arrive avec le courant de quai, la batterie et les convertisseurs restent la source de tension alternative à bord.

Convertisseur de fréquence intégré

Les chargeurs de batterie modernes fonctionnent aussi bien sur 50 Hz que sur 60 Hz. Certains chargeurs de batterie fonctionnent aussi avec une tension d'entrée universelle de 90 V à 260 V. **En appliquant le concept CC avec des chargeurs de batterie universels, on peut utiliser du courant de quai partout dans le monde. Un convertisseur de fréquence cher et lourd, devient inutile.**

9. BESOIN D'ÉNERGIE JUSQU'À 4 kWh PAR JOUR (170 Watt en moyenne)

9.1. Introduction

Maintenant il est temps de monter à bord, pour voir comment tout ceci fonctionne sur le terrain. Bien sûr tous les bateaux sont équipés différemment, selon l'objectif, le budget et le propriétaire. Certains bateaux sont tellement équipés qu'ils permettent de traverser l'Océan Atlantique et même de faire le tour du monde. D'autres sont équipés pour naviguer en eaux douces. Et d'autres encore sont utilisés pour passer une belle journée de pêche. Certains bateaux sont entretenus et pilotés par le propriétaire, alors que d'autres font partie d'une flotte de location. Il y a aussi des installations électriques similaires dans des camping-cars par exemple ou des maisons sans raccordement au réseau.

J'ai choisi de prendre ici comme exemple les bateaux de plaisance, car c'est avec eux que j'ai le plus d'expérience. Adapter le contenu de ce chapitre et des chapitres suivants sur d'autres applications est assez facile.

Le premier bateau sur lequel nous allons monter à bord est assez simple en ce qui concerne l'installation électrique ; la consommation électrique étant maintenue la plus basse possible. Ce bateau pourrait être un bateau à moteur de 9 mètres maximum ou un voilier de 12 mètres maximum.

Le bateau possède un système électrique de 12 V ; nous allons traiter tout d'abord tout l'équipement électrique ainsi que la consommation électrique correspondante.

9.2. Equipement de base et consommation d'électricité

9.2.1. Instruments de navigation (anémomètre, loch, sonde de profondeur, etc.): inférieur à 0,2 A

9.2.2. GPS : environ 0,2 A

9.2.3. Mobilophone maritime (VHF, Mariphone)

La consommation de veille est faible (environ 0,1 A). L'émission consomme beaucoup de courant (environ 5 A), mais elle est de courte durée, ce qui fait que la consommation quotidienne en Ah reste pratiquement négligeable.

9.2.4. Feu de tête de mât tricolore ou feu de mouillage : 25 W
(25 W / 12 V = 2,1 A)

9.2.5. Pilote automatique

La pilote automatique peut être l'un des plus grands consommateurs en cas d'utilisation de longue durée. La consommation de courant du moteur atteint rapidement 5 A. Avec un cycle de service de 30 %, la consommation moyenne est de $5 \times 0,30 = 1,5$ A.

Il est important de se souvenir que ceci n'est qu'une approximation. La consommation de courant du pilote automatique dépend de l'utilisation du bateau, de la houle, etc.

9.2.6. Récepteur de radiodiffusion

La (auto)radio reste allumée, surtout pendant de longs voyages. Sa consommation de courant est d'environ 1 A.

9.2.7. Éclairage de cabine

Aujourd'hui, l'éclairage se compose de lampes halogènes (10 W à 20 W par lampe) et de tubes fluorescents (environ 8 W). Les ampoules ne sont pas conseillées car elles consomment jusqu'à 5 fois plus de courant pour un éclairage identique. Partant du fait qu'il y a 10 points de lumière et une utilisation économe, nous évaluons la consommation à 10 Ah par jour.

9.2.8. Réfrigérateur

Le sujet du refroidissement a déjà été traité dans le § 6.3.

Dans cet exemple, supposons que nous avons à bord un réfrigérateur avec un compresseur de 50 W, et un cycle de service de 50 %. D'après mon expérience, c'est le réfrigérateur typique en ce qui concerne la consommation d'énergie en climat tempéré.

9.3. Consommation sur 24 heures de navigation

Notre point de départ est une période de croisière de 24 heures sur un voilier (sur un bateau à moteur, la consommation de courant n'a pas d'importance pendant la navigation, car l'alternateur installé sur le moteur peut très bien gérer la consommation).

Maintenant nous déterminerons la capacité nécessaire de la batterie pour alimenter tous les consommateurs. Dans le tableau suivant, les consommateurs sont divisés en consommateurs continus (C), de longue durée (L) et de courte durée (K).

Consommateurs	Consommation		Durée par jour Heures	% allumé %	Consommation journalière	
	Watt	Amp			kWh	Ah (12 V)
C Instruments de navigation		0,2	24			5
C GPS		0,2	24			5
C VHF en veille		0,1	24			2
K Émettre		5	0,2			1
C Réfrigérateur, condenseur à refroidissement par air	50	4,2	24	50		50
L Feu de tête de mât tricolore ou feu de mouillage	25	2,1	8			17
L Pilote automatique		5	20	30		30
L Récepteur de radiodiffusion		1	3			3
K Éclairage	200		0,6			10
K Divers						5
Consommation totale par jour					1,5	128
Consommation moyenne par jour	64	5,3				
Capacité de batterie minimum, partant de 2 cycles de charge par jour (voir § 8.5.2)						256

Nous pouvons remarquer que le réfrigérateur est de loin le plus grand consommateur. La consommation de courant du réfrigérateur pourrait être réduite de moitié en utilisant un condenseur à refroidissement par eau, plus coûteux, au lieu d'un condenseur à refroidissement par air, et en améliorant l'isolation. La consommation totale par jour serait alors réduite à 103 Ah.

9.4. Au mouillage ou amarré sans raccordement 230 V

Notre point de départ est à nouveau d'un jour complet.

Consommateurs	Consommation		Durée par jour Heures	% allumé %	Consommation journalière	
	Watt	Amp			kWh	Ah (12 V)
C Réfrigérateur, condenseur à refroidissement par air	50	4,2	24	50		50
L Feu de mouillage	25		8		0,2	17
L Récepteur de radiodiffusion		1	3			3
K Éclairage	200		0,6			10
K Divers						5
Consommation totale par jour					1,0	85
Consommation moyenne par jour	42	3,5				
Capacité de batterie minimum, partant de 2 cycles de charge par jour (voir § 8.5.2)						170

9.5. Un peu de luxe à bord

Même les bateaux relativement petits dont nous parlons ici, possèdent souvent une certaine sécurité et un certain confort à bord. Quelques surplus optionnels seront énumérés ci-dessous. Un convertisseur est nécessaire pour certains d'entre eux. Le rendement des convertisseurs étant aujourd'hui supérieur à 90 %, la perte au niveau du convertisseur est négligée durant le calcul de la consommation d'énergie.

9.5.1. Système de navigation électronique

Même sur des bateaux plus petits, il est à l'heure actuelle très utilisé.

9.5.2. Émetteur à ondes courtes et bande latérale unique (BLU)

Très utile durant les voyages océaniques.

9.5.3. Radar

Augmente la sécurité durant la navigation de nuit ou par mauvais temps.

9.5.4. Micro-ondes

Un micro-ondes consomme beaucoup d'énergie en peu de temps (jusqu'à 1,5 kW). Quand le micro-ondes est utilisé 12 minutes par jour, la consommation est de $1500 \times 0,2 / 12 = 25$ Ah.

9.5.5. Chauffage

La consommation de courant par le chauffage au gas-oil se limite à la pompe diesel et aux ventilateurs. La consommation est d'environ 5 A.

9.5.6. Climatisation

Lors de l'achat de la climatisation, faites attention à la consommation de courant, particulièrement quand la climatisation doit fonctionner sur l'énergie de la batterie!

9.5.7. Groupe dessalinisateur

De nos jours, il existe des dessalinisateurs très efficaces fonctionnant sur courant continu 12 V ou 24 V (Livol et Spectra entre autres). La consommation de courant est seulement de 10 à 20 A sur 12 V pour obtenir 30 à 60 litres d'eau potable par heure. Par conséquent, un dessalinisateur (vive la douche de pont à l'eau douce !) est devenu une réelle option pour des petits bateaux utilisés pour de longs voyages en mer.

Dans le tableau suivant, la consommation de courant de tout ce luxe est cartographiée. La consommation électrique est basée pour un équipage de 2 ou 3 personnes.

Consommateurs	Consommation		Durée par jour Heures	Consommation journalière	
	Watt	Amp		kWh	Ah (12 V)
C Système de navigation électronique		2	24		48
C BLU		12	0,1		7
L Radar		3	8		24
K Micro-ondes	1500		0,2	0,3	25
L Chauffage		5	$6 \times 0,5 = 3$		15
L Climatisation, capacité réfrigérante 1 kW	350		$6 \times 0,5 = 3$	0,5	(45)
L Dessalinisateur, 150 litres par jour		10	5		50
Consommation par jour				2,0	169
Consommation moyenne par jour	85	7			

Avec tout le luxe supplémentaire à bord (sauf la climatisation) le besoin total en énergie par 24h s'élève à:

- en route : $1,5 + 2,0 = 3,5$ kWh, soit $128 + 169 = 297$ Ah
- au mouillage: $1,0 + 2,0 = 3,0$ kWh, soit $85 + 169 = 254$ Ah

Cela se traduit par une capacité de batterie minimum et un courant de décharge moyen comme suit :

- naviguant : $297 \times 2 =$ environ 600 Ah et 12,3 A de courant de décharge moyen
- au mouillage : $254 \times 2 =$ environ 500 Ah et 10,5 A de courant de décharge moyen

Nous allons voir maintenant comment générer l'énergie nécessaire pour le "yacht de base" (1,0 à 1,5 kWh) et pour le yacht "toutes options" (3,0 à 3,5 kWh).

9.6. Charger la batterie

9.6.1. Avec l'alternateur

Le moteur de propulsion est le plus souvent équipé d'un alternateur de 14 V / 60 A. Cela veut dire que l'alternateur fournit 60 A à 6000 tr/min. Avec un rapport de diamètre entre la poulie du moteur et la poulie sur la dynamo de 2 : 1, le moteur doit être à 3000 tours pour obtenir un courant de charge de 60 A. Dans la pratique personne ne fait tourner le moteur à plein régime, à cause du bruit. Pour générer du courant, le moteur tourne le plus souvent à 1500 à 2000 tr/min. Le courant de charge est alors de 40 % à 80 % de la valeur nominale de l'alternateur, c'est à dire de 30 à 50 A.

Ce qui veut dire que, pour le "yacht de base", le moteur doit tourner 2 à 3 heures par jour pour charger les batteries, et 7 à 8 heures par jour pour le yacht tout équipé.

Ce n'est pas une situation attrayante, sauf si :

- vous avez l'intention de naviguer tous les jours au moteur pendant plusieurs heures;
- le bateau est surtout utilisé pour des excursions journalières.

Comment éviter de faire tourner le moteur 3 heures ou plus par jour pour produire de l'électricité ?

9.6.2. Augmenter la capacité de la batterie afin de pouvoir naviguer ou être au mouillage pendant plusieurs jours.

C'est une solution simple et bon marché qui n'a sa raison d'être que si vous avez l'occasion de recharger vos batteries à temps.

9.6.3. Un deuxième alternateur ou un alternateur plus puissant

Voir les chapitres 4 et 5 pour les mesures à prendre. En augmentant le courant de charge à 80 A, le nombre d'heures moteur pourrait se limiter à 1 ou 2 heures par jour. Mais souvenez-vous que le courant de charge qu'une batterie accepte sans dommage est limité; voir § 2.5.6.

Deux remarques par rapport au rendement:

1) Les pertes d'un système CC 12 V sont importantes

Il y a le rendement de la batterie (rendement énergétique en charge partielle: environ 89 %, voir § 3.3.), les pertes au niveau des répartiteurs de charge à diodes, le câblage, les convertisseurs, etc. C'est pourquoi dans tous les calculs qui suivent, la tension de recharge de la batterie est fixée à 15 V (batterie 12 V) ou 30 V (batterie 24 V), tandis que la tension de décharge est fixée à 12 V. Cela pour incorporer un rendement de $\eta = 12 \text{ V} / 15 \text{ V} = 80 \%$.

Par exemple :

- décharger une batterie de 150 Ah à 12 V équivaut à une consommation d'énergie de $150 \text{ Ah} \times 12 \text{ V} = 1,8 \text{ kWh}$.
- Recharger 150 Ah à "15 V" implique une apport d'énergie de $150 \text{ Ah} \times 15 \text{ V} = 2,25 \text{ kWh}$.
- La différence, $2,25 - 1,8 = 0,45 \text{ kWh}$, est perdue.

2) Recharger les batteries avec l'alternateur du moteur de propulsion : rendement 4 % !

Le rendement d'un alternateur + courroie est de 50 %. Le moteur tourne avec une charge de 10 à 20 % seulement, avec comme résultat un rendement de carburant d'environ 10 %...Ensemble avec le rendement CC, calculé sous 1), le rendement de la chaîne entière est alors de :

$$\eta = 0,8 \times 0,5 \times 0,1 = 0,04 (= 4 \%)$$

Autrement dit : **seulement 4 % de l'énergie libérée lors de la combustion du gasoil est finalement disponible en tant qu'énergie électrique pour les utilisateurs à bord.**

9.6.4. Énergie solaire

En été, en mer du Nord, les panneaux solaires montés horizontalement fournissent environ 300 Wh par jour et par m^2 (1 $\text{m}^2 = 2$ panneaux de 50 W). Cela revient à une capacité de charge de 25 Ah par jour et par mètre carré de panneau solaire pour une batterie 12 V. En Méditerranée la capacité de charge monte jusqu'à 35 Ah et aux Caraïbes jusqu'à 50 Ah par jour. Les panneaux solaires peuvent donc fournir un apport important, surtout sur un catamaran ou un bateau à moteur où il reste souvent assez d'espace disponible sur le pont ou le toit.

9.6.5. Énergie éolienne

Un éolienne d'un diamètre de 1 mètre génère environ 25 W (près de 2 A dans une batterie de 12 V) avec une vitesse du vent de 10 nœuds. Un apport de 40 à 80 Ah par jour fait donc certainement partie des possibilités.

Même sur des bateaux plus importants, les panneaux solaires et/ou une éolienne sont très adaptés pour charger les batteries et pour les maintenir chargées à 100 % pendant les périodes où le bateau n'est pas utilisé. Des bons régulateurs de charge sont toutefois très importants pour prévenir une surcharge des batteries.

9.6.6. Génératrice entraîné par sillage (sur arbre d'hélice ou à traction)

Pendant la navigation une production de courant supplémentaire peut avoir lieu grâce à un alternateur sur l'arbre d'hélice (désavantages: résistance à la navigation, bruit et usure), ou bien à un petit générateur remorqué. Ce dernier fournira environ 12 W, c'est à dire 1 A par nœud (vitesse dans l'eau), et peut donc charger 40 à 100 Ah par jour dans une batterie de 12 V. Cependant, la résistance de traction supplémentaire, d'environ 30 kg, ralentira le voilier d'environ 0,5 nœuds.

9.7. Courant de quai

La meilleure façon de se brancher sur le courant de quai est de le faire avec un chargeur de batterie, afin d'appliquer le concept CC (voir § 8.2.1 et 8.4.3). La règle pratique est que la capacité du chargeur de batterie doit être d'environ quatre fois la consommation d'énergie à bord.

Un exemple :

Etant à quai, la consommation moyenne d'un bateau tout équipé, tel qu'il a été présenté dans le paragraphe 9.5, est de 132 Ah ou 1,6 kWh. (pas de consommation de courant du feu de tête de mât, des instruments de navigation, de la BLU, du radar et du groupe dessalinisateur)

Avec une capacité égale à quatre fois consommation moyenne, le chargeur de batterie doit donc fournir au moins $(1,6 \text{ kWh} \times 4 / 24 \text{ h}) / 12 = 22 \text{ A}$ pour un système 12 V.

La consommation CC moyenne est de $22 / 4 = 5,5 \text{ A}$, il nous reste donc 16,5 A pour charger la batterie. La capacité minimum de la batterie était 500 Ah. Si cette batterie est déchargée à 50 %, il faudra environ $(500 / 2) / 16,5 = 15$ heures pour charger la batterie.

Dans la pratique on installe un redresseur de 25 A ou 50 A. Le redresseur de 50 A prendra un maximum de $50 \text{ A} \times 15 \text{ V} / 230 \text{ V} = 3,3 \text{ A}$ de la prise de quai. Donc même une prise de quai de 4 A est suffisante dans ce cas !

Le raccordement du ballon d'eau chaude directement sur le courant de quai pourrait poser un problème, car cela exigerait environ 5 A de courant de quai supplémentaire. La solution : **appliquer strictement le concept CC et utiliser un convertisseur pour alimenter le ballon d'eau chaude à partir de la batterie.**

9.7. Conclusion

- Une ou plusieurs sources d'énergie alternatives telles que les panneaux solaires, l'éolienne ou la génératrice hydraulique peuvent contribuer considérablement au besoin d'énergie quotidien.
 - La limite pratique pour recharger une batterie 12 V à l'aide de l'alternateur sur le moteur de propulsion, est un besoin journalier de 4 kWh ou 300 Ah. **Cela est bien suffisant pour tout le luxe supplémentaire mentionné dans le § 9.5!**
- Dans le cas d'un système 24 V, la limite pratique est d'environ 8 kWh (avec un alternateur 24 V / 150 A, ce qui représente une charge d'environ 9 kW sur le moteur !).
- Un réfrigérateur inefficace (compresseur de 50 W qui tourne avec un cycle de service de 100 %) consomme 100 Ah par jour de votre précieuse capacité de batterie.
 - L'introduction du concept CC, aussi sur le courant de quai, réduit la puissance connectée nécessaire à 4 A.

10. BESOIN D'ÉNERGIE JUSQU'À 14 kWh PAR JOUR (600 W en moyenne)

10.1. Introduction

Dans le chapitre 9 nous avons vu qu'un besoin d'énergie de 4 kWh par jour peut être satisfait avec des moyens relativement simples.

Et avec un système 24 V il est même possible de générer jusqu'à 8 kWh par jour en quelques heures, à l'aide d'un alternateur 150 A monté sur le moteur de propulsion (et ce moteur sera certainement plus fiable qu'un petit groupe électrogène qui tourne à 3000 tours !).

Au delà il est fortement recommandé d'étudier de plus près d'autres variantes :

- Un groupe diesel 230 V qui fournit directement les consommateurs en courant alternatif : le concept CA (Courant Alternatif).
- Un groupe diesel 230 V avec en plus une bonne batterie de servitude : concept CA, avec période de silence.
- Un groupe CC : extension du concept CC du chapitre précédent vers une puissance plus élevée.

Une consommation journalière de 14 kWh n'est pas rien et pourrait même être la consommation moyenne de votre propre maison. Vous pouvez le vérifier sur votre facture d'électricité !

Un tel besoin d'énergie se retrouve sur les bateaux à moteur et les voiliers catamaran jusqu'à 15 mètres ou sur les voiliers monocoques jusqu'à 18 mètres.

Dans ce chapitre, les calculs sont basés sur un système 24 V.

Pour commencer vous trouverez ci-dessous la liste d'un équipement standard :

10.2. Équipement

10.2.1. Instruments de navigation

Sur les yachts plus importants, un ordinateur de navigation est presque standard. Avec le GPS, la VHF, la BLU, le radar et l'Inmarsat, la consommation moyenne monte aux environs de 2 A.

10.2.2. Feu de tête de mât tricolore ou feu de mouillage : 25 W

10.2.3. Pilote automatique

La consommation de courant dépend du modèle, de la houle, etc., il est en moyenne de 5 A à 10 A.

10.2.4. Réfrigérateur et congélateur

Prenons l'exemple d'une installation avec deux compresseurs de 50 W et des condenseurs avec refroidissement à eau. Et supposons qu'une attention spéciale a été accordée à l'isolation afin de maintenir une faible consommation. Ainsi le cycle de service du compresseur réfrigérateur pourra être limité à 25 % et celui du compresseur congélateur à 50 %.

10.2.5. Éclairage

Des points d'éclairage plus nombreux et une utilisation moins économe que sur les bateaux plus petits. En moyenne : 20 Ah par jour.

10.2.6. Récepteur de radiodiffusion : environ 2 A

10.2.7. Autres consommateurs

Nous partons du fait que les pompes sont plus utilisées (pour la douche par exemple). Prenons donc 10 Ah à 24 V.

10.3. En route

Comme dans le chapitre 9, calculons maintenant la consommation pour une période de 24 heures dans le cas d'un voilier en route.

Consommateurs	Consommation		Durée par jour Heures	% allumé %	Consommation journalière	
	Watt	Amp			kWh	Ah (24 V)
C Instruments de navigation		2	24		1,2	48
L Feux de navigation	25	1	8		0,2	8
L Pilote automatique		5	20	30	0,8	30
C Réfrigérateur & congélateur, refroidissement à eau	50 + 50		24	25 + 50	0,9	38
K Récepteur de radiodiffusion		2	3		0,1	6
K Éclairage	400		1,2		0,5	20
K Divers					0,2	10
Consommation totale par jour					3,8	160
Consommation moyenne par jour					160	6,7
Capacité de batterie minimum, partant de 2 cycles de charge par jour (voir § 8.5.2)						320

A partir du tableau nous pouvons constater que :

- En investissant en rendement et en isolation, la consommation électrique du réfrigérateur et du congélateur est maintenant du même ordre que les autres consommateurs. Souvent, une mauvaise installation a comme conséquence que les compresseurs tournent en continu, ajoutant ainsi 60 Ah à la consommation quotidienne !
- Durant la navigation, la consommation énergétique minimum d'un voilier de 12 à 18 m est proche de 4 kWh par jour. C'est à dire 160 Ah d'une batterie de 24 V ou aux 320 Ah d'une batterie de 12 V.
- Le courant moyen n'est cependant que de 6,7 A pour un système 24 V et n'a donc pas d'importance lors d'une navigation au moteur.

10.4. Au mouillage ou amarré sans raccordement 230 V

Le tableau suivant concerne autant les bateaux à moteur que les voiliers.

Consommateurs	Consommation		Durée par jour Heures	% allumé %	Consommation journalière	
	Watt	Amp			kWh	Ah (24 V)
L Feu de mouillage	25		8		0,2	8
L Réfrigérateur & congélateur, refroidi à l'eau	50 + 50		24	25 + 50	0,9	38
K Récepteur de radiodiffusion		2	3		0,1	6
K Éclairage	400		1,2		0,5	20
K Divers					0,2	10
Consommation totale par jour					2,0	82
Consommation moyenne par jour					82	3,4
Capacité de batterie minimum exigée, partant de 2 cycles de charge par jour (voir § 8.5.2)						164

10.5. Un peu de confort à bord

10.5.1. Bouilloire électrique

Très pratique pour faire chauffer rapidement l'eau pour faire un thé ou une soupe instantanée. La capacité thermique d'un litre d'eau est de 1,16 Wh par °C, voir le § 6.3.3. Donc pour faire bouillir 1 litre d'eau, il faudra à peu près 0,1 kWh, ou 4,2 Ah pour une batterie 24 V.

10.5.2. Plaque de cuisson électrique

Le gaz à bord est dangereux, donc pourquoi pas s'en passer ? Deux plaques de cuisson électriques de 1,5 kW chacune consomment un maximum de 3 kW (c'est-à-dire quelques 150 A d'une batterie 24 V). Quatre foyers consommeraient donc un maximum de 6 à 8 kW. Préparer un dîner pour 4 personnes demande environ 1,2 kWh, ou 50 Ah d'une batterie 24 V (voir le § 6.6).

10.5.3. Petite machine à laver

Celle-ci a déjà été mentionnée dans le § 6.5.

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

La plus grande partie de l'énergie est utilisée pour chauffer l'eau et pour le cycle de séchage.

10.5.4. Petit lave-vaisselle

Consommation environ 1 kWh.

10.5.5. Dessalinisateur, à pompe haute pression et alimentation CA

Ce type de dessalinisateur consomme beaucoup plus d'énergie par litre d'eau douce produite que les modèles à pompe basse pression discutés dans le § 9.5.7.

10.5.6. Climatisation

Dans notre exemple, la climatisation est branchée 12 heures par jour et le compresseur tourne avec un cycle de service de 50 % en moyenne.

Nous allons calculer maintenant la consommation totale par jour avec tout ce confort à bord. Nous partons d'un équipage de 4 personnes, dans un climat subtropical, ce à dire que nous utilisons la climatisation au lieu du chauffage.

Consommateurs	Consommation		Temps / 24 heures	Consommation / période de 24 heures	
	Watt	Amp		kWh	Ah (24 V)
Micro-ondes	1500		0,25	0,4	16
Bouilloire, 6 litres par jour	2000			0,6	25
Cuisinière électrique, 4 personnes	6000			1,2	50
Chauffage		3	6 x 0,5 = 3		(9)
Climatisation, capacité réfrigérante 4 kW	1400		12 x 0,5 = 6	8,4	350
Dessalinisateur, 200 litres par jour				1,4	60
Petite machine à laver, une fois tous les 2 jours	2000			0,5 x 2,7	56
Petit lave-vaisselle, tous les jours	2000			1,0	42
Divers					10
Consommation par jour				25	609

A partir de ce tableau nous pouvons constater que la climatisation, en particulier, consomme énormément d'énergie, bien que nous soyons partis d'une utilisation limitée à 12 heures par jour.

Une batterie de 1500 Ah serait nécessaire pour couvrir une période de silence de 12 heures. Bien que de telles installations existent, la solution habituelle est de faire tourner le groupe quand la climatisation est en marche et de s'accommoder du bruit, de l'entretien et de la consommation de carburant.

Pour réduire la consommation électrique il faudra tout d'abord limiter la climatisation au minimum. La deuxième chose à faire serait d'installer un dessalinisateur à pompe basse pression et alimentation 24 V. Le résultat est le suivant :

Consommateurs	Consommation		Temps / 24 heures	Consommation / période de 24 heures	
	Watt	Amp		kWh	Ah (24 V)
Micro-ondes	1500		0,25	0,4	16
Bouilloire électrique, 6 litres par jour	2000			0,6	25
Table de cuisson électrique, 4 personnes	6000			1,2	50
Chauffage		3	6 x 0,5 = 3		(9)
Climatisation, capacité réfrigérante 4 kW	700	29	12.x 0,5 = 6	4,2	175
Dessalinisateur, 200 litres par jour		10	3,3	0,8	33
Petite machine à laver, une fois tous les 2 jours	2000			0,5 x 2,7	56
Petit lave-vaisselle, tous les jours	2000			1,0	42
Divers					10
Consommation par période de 24 heures				9,6	407

Au total avec la consommation de base, la consommation par jour s'élève maintenant à :

- avec climatisation : $160 + 407 = 567$ Ah par période de 24 heures
avec un courant de batterie de : $567 / 24 = 24$ A en moyenne.
Consommation d'énergie totale par jour: $567 \times 24 = 13,6$ kWh.

- sans climatisation : $160 + 232 = 392$ Ah par période de 24 heures
avec un courant de batterie de : $392 / 24 = 16$ A en moyenne.
consommation d'énergie totale par jour: $392 \times 24 = 9,4$ kWh.

10.6. Génération d'électricité

10.6.1. A l'aide d'alternateurs sur le moteur de propulsion

C'est certainement possible, voir chapitre 9.

10.6.2. Sources d'énergie alternatives

Des panneaux solaires (1 m²), une éolienne (avec un diamètre d'1 mètre) et une génératrice entraînée par sillage (60 W à 5 nœuds) fournissent ensemble presque 2,4 kWh par jour (= 100 Ah pour une batterie 24 V).

Autrement dit : pour la production de courant, l'apport des sources d'énergie alternatives peut réduire considérablement le nombre d'heures de fonctionnement du moteur, **si la consommation est limitée au maximum.**

Mais quand le besoin d'énergie quotidien se met à augmenter, d'autres moyens sont nécessaires pour générer l'électricité. Les variantes sont traitées dans les paragraphes suivants.

10.6.3. Groupe électrogène

C'est la solution standard pour alimenter la machine à laver, la table de cuisson électrique et la climatisation. Pour éviter que le groupe tourne en continu on installe également une batterie de servitude avec convertisseur. De longues périodes de silence peuvent être planifiées, grâce à cette batterie de servitude et au convertisseur. Le groupe pourrait par exemple tourner tous les soirs durant 2 à 4 heures, pendant la préparation du dîner et jusqu'à que le lave-vaisselle ait fait son travail. Pendant ces mêmes 4 heures, la machine à laver et le sèche-linge peuvent tourner, le dessalinisateur et les chargeurs de batterie peuvent être branchés, et le ballon d'eau chaude se mettre en route (ballon électrique ou chauffé par l'eau de refroidissement du groupe). Si nécessaire, le groupe pourrait également être mis en route le matin, lors du petit-déjeuner.

En général, l'utilisation du groupe, est réduite au minimum, pour les raisons suivantes:

- bruit et vibrations
- usure et entretien
- pour éviter que le groupe tourne pratiquement à vide, parce que cela conduit à une usure et un entretien accélérés (glaçage des chemises)
- consommation de carburant

Capacité de la batterie de servitude

A partir de la durée de marche du générateur – 4 heures minimum par jour dans notre exemple – nous pouvons calculer combien d'Ampère-heures la batterie doit fournir pendant la période de silence:

a) En route : environ $24 - 4 = 20$ heures de la consommation de l'équipement de base (voir § 10.3), soit $160 \times 20 / 24 = 133$ Ah.

b) En ce qui concerne le confort à bord, supposons que les deux tiers de l'utilisation du micro-ondes, de la bouilloire électrique et de la climatisation tombent aussi dans la période de silence. Cela veut dire une décharge additionnelle de la batterie de $(16 + 25 + 175) \times 2/3 = 144$ Ah.

Au total $133 + 144 = 277$ Ah. Il faudra donc installer une batterie de 600 Ah minimum (2 cycles de charge par jour, voir le § 8.5.2.) . Avec un peu de réserve (utilisation de la climatisation pendant la nuit), nous arrivons à 800 Ah.

Convertisseurs et chargeurs de batteries

Un Multi 24/3000/70, convertisseur/chargeur combiné suffira en tant que convertisseur (car le groupe peut être mis en marche quand la demande dépasse les 3 kW), mais en tant que chargeur, le Multi fournit seulement $4 \times 70 = 280$ Ah durant les 4 heures que le générateur en marche. Pendant cette période, la batterie doit être rechargée de 277 Ah + pertes, et il faudra fournir la consommation de base, c'est-à-dire $6,7 \times 4 = 27$ Ah. Avec un peu de marge, il nous faut donc 100 A de courant de charge. Pour cette raison, un chargeur de 24 V / 50 A doit être installé en plus du Multi.

Puissance du groupe

Pour la table de cuisson, il nous faudrait 6 kW, plus $100 \text{ A} \times 30 \text{ V} = 3 \text{ kW}$ pour le chargeur. Avec un peu de marge 12 kW serait un bon choix.

Raccordement au courant de quai et convertisseur de fréquence

Dans notre exemple, la prise du courant de quai peut être limitée aux environs de 8 kW, car la batterie peut être rechargée avec un régime réduit. Pour 8 kW, il faut malgré tout un raccordement triphasé (400 Volt).

Si vous traversez l'Océan Atlantique, vous aurez à faire à un courant de quai 60 Hz. Il vous faudra alors un convertisseur de fréquence de 8 kW, pour alimenter l'équipement 50 Hz sur votre bateau.

A mi-chemin du calcul vous pensiez déjà que le système devient trop important, trop cher, trop lourd et trop compliqué pour un voilier de 15 mètres ou un bateau à moteur de 13 mètres. C'est exact ! C'est pourquoi une installation, comme celle décrite ci-dessus, n'est utilisée que sur des bateaux assez importants, par exemple des voiliers à partir de 20 mètres ou des yachts à moteur à partir de 15 mètres.

Quelle est la solution pour des bateaux plus petits?

1) La solution la plus évidente, serait d'utiliser du gaz au lieu de la table de cuisson électrique. Un groupe 6 kW qui tourne de 4 à 8 heures par jour serait alors suffisant, selon l'importance de climatisation.

2) La climatisation peut être limitée aux heures où le groupe tourne.

3) En appliquant le concept CC (voir les § 8.2. et 8.5.3.) le courant de quai peut être réduit de 8 kW à 1,2 kW seulement (en Europe cela voudrait dire une prise de quai monophasée de 230 V 6 A). Dans ce cas, la conversion de fréquence 60 Hz / 50 Hz est une fonction intégrée dans le système. Pour appliquer le concept CC, l'électricité du quai doit être connectée à un chargeur de 40 ou 50 A, qui charge la batterie. A bord tous les consommateurs CA sont alors alimentés par 2 ou 3 convertisseurs parallèles de 2,5 kW chacun (ou de préférence des Multis, voir le paragraphe suivant).

Le paragraphe suivant traite de deux variantes qui permettront de réduire la puissance du groupe et du raccordement quai.

10.6.4. **PowerControl et PowerAssist**

L'utilisation simultanée des Multis et de la fonction *PowerControl* avec un groupe, a les avantages suivants (voir aussi le chapitre 8):

- Alimentation CA sans interruption. Quand le groupe s'arrête, les Multis fournissent le courant alternatif à bord. Après avoir mis en marche le groupe, les utilisateurs seront commutés automatiquement et sans interruption sur le groupe ; les Multis commuteront sur la fonction chargeur de batterie.
- Grâce à la fonction *PowerControl*, le risque de surcharge du groupe est exclu. Le courant de charge de la batterie est automatiquement réduit au cas où, ensemble avec les autres consommateurs, le besoin en énergie des Multis (qui peut s'élever à $2 \times 70 \text{ A} \times 30 \text{ V} = 4,2 \text{ kW}$ pour 2 Multis), provoquerait une surcharge.

PowerAssist: utiliser le MultiPlus pour apporter un complément en énergie au courant de quai et au groupe

Avec *PowerAssist* le MultiPlus peut fonctionner en parallèle avec le courant de quai et le groupe (voir également le chapitre 8).

Regardons d'abord le fonctionnement en parallèle avec un groupe ; par exemple le groupe 6 kW du paragraphe précédent.

Deux Multis en parallèle peuvent apporter un complément de 5 kW, ce qui augmente la puissance de pointe de 6 kW à 11 kW. La table de cuisson électrique peut donc revenir à bord. Lorsque la consommation est faible, les Multis utiliseront l'énergie excédentaire du groupe pour charger les batteries, jusqu'à un maximum de $2 \times 70 = 140 \text{ A}$, tout comme dans l'exemple du § 8.3.3.

De la même manière, les 2 Multis peuvent apporter un complément de 5 kW à la prise de quai. Une prise de quai de 16 A (c'est à dire de $16 \times 230 = 3680 \text{ W}$, ou 3,7 kW) avec 2 Multis en parallèle peut donc fournir une puissance de pointe de $3,7 + 5 = 8,7 \text{ kW}$.

La table de cuisson électrique sur le courant limité du quai n'est donc plus un problème!

10.6.5. **Encore moins de courant de quai: le concept CC**

Un besoin d'énergie de 14 kWh par jour correspond à une consommation moyenne de $14000 / 24 = 600 \text{ W}$. Ceci correspond à un courant de 25 A sur 24 V. Il suffirait donc d'un chargeur de batterie 50 A, qui peut être alimenté par une prise de quai 6 A serait pour alimenter le bateau !

Deux, ou même trois Multis parallèles (qui peuvent tourner aussi en parallèle avec le groupe) peuvent alimenter tout l'équipement CA à bord à partir de la batterie.

Avec le concept CC, l'alimentation est insensible aux fluctuations de tension et aux autres défauts qui proviennent de la prise de quai. De plus, le système fonctionne aussi bien sur une connexion 60 Hz que sur une connexion 50 Hz.

10.6.6. **Le groupe électrogène CA sur un bateau de 15 à 18 mètres: conclusion**

En général, la puissance du groupe est déterminée sur la base de la demande maximale pouvant avoir lieu à bord. Et de nos jours la demande maximale dépasse bien souvent la capacité de la prise quai de 16 A. Résultat : même au port il faut mettre aussi en marche le groupe pour laver ou faire la cuisine. Au lieu de faire des concessions en ce qui concerne le confort à bord, nous pouvons appliquer une nouvelle technologie qui diminuera les cout, le volume et le poids du système électrique.

Une batterie de 24 V 800 Ah, 3 Multis avec *PowerAssist* et un chargeur de batterie de 50 A nous permettent de:

- introduire 2 périodes de silence par jour, d'un total de 20 heures
- réduire la puissance du groupe de 12 kW à 6 kW
- réduire le courant de quai de 8 kW (triphase 16 A) à seulement 1,3 kW (monophasé 6 A)
- éliminer la nécessité d'un convertisseur de fréquence pour le raccordement sur une prise quai 60 Hz;
- réaliser à bord une alimentation CA sans interruption;
- éliminer le gaz à bord, et augmenter ainsi considérablement la sécurité.

10.6.7. Le groupe diesel courant continu

Le groupe CC devient plus populaire. Avec des puissances allant jusqu'à 10 kW, nous pouvons réaliser un courant de charge de batterie aux environs de 300 A à 28 V. Le groupe CC est plus petit et plus léger, et a un rendement plus élevé que le groupe CA. Par ailleurs, le régime du moteur peut être adapté à la demande en courant, afin de maintenir un rendement élevé, même en cas de faible demande.

Le groupe CC est utilisé pour charger les batteries. Grâce aux convertisseurs, nous pouvons ensuite faire du courant alternatif. Le choix de la puissance du groupe CC est une question de courant de charge de batterie acceptable et de nombre d'heures de fonctionnement par jour. Pour un besoin de 14 kWh par jour, par exemple, un groupe CC de 6 kW devra tourner environ 3 heures par jour ($3 \times 6 = 18 \text{ kWh}$).

10.6.8. Rendement d'un groupe diesel

Le rendement d'un groupe diesel est supérieur à 30 % à pleine charge. Le rendement diminue quand la demande diminue. Sur un bateau, le groupe tourne souvent pratiquement à vide. Le rendement moyen sera alors de 10 à 20 %. Le rendement peut être amélioré considérablement avec **PowerControl** ou **PowerAssist** car dans ce cas un groupe plus petit et mieux utilisé peut être installé (voir § 9.3.3 et 9.4).

10.6.9. L'électricité sur un bateau à moteur de 9 à 15 mètres.

Même si toute la liste du § 10.5 est installée, les alternateurs sur les moteurs du bateau à moteur n'ont aucun problème avec la consommation moyenne de 24 A (système 24 V) durant la navigation.

Autrement dit : si vous prévoyez de naviguer quelques heures chaque jour ou si vous avez une prise de quai disponible tous les soirs, la consommation quotidienne de 14 kWh ne nécessite pas l'installation d'un groupe diesel.

Si le bateau est au mouillage, la consommation sera d'environ 22 A, car les instruments de navigation ne sont pas utilisés. En cas d'une période à l'ancre prolongée, un groupe sera nécessaire, comme il l'est précisé dans les § 10.6.3 à 10.6.7.

10.7. Conclusion

Les variantes traitées sont présentées en détail, dans le tableau suivant.

Besoin énergétique jusqu'à 14 kWh par jour (600 W en moyenne)			
	Groupe CC 5 kW	Groupe diesel 6 kW CA avec PowerAssist	Groupe diesel 12 kW CA
Groupe CC			
Heures par jour	3 à 8		
Consommation par jour	7 litres		
Poids	150 kg		
Groupe diesel CA			
Heures par jour		3 à 8	4 à 8
Consommation par jour		9 litres	11 litres
Bruit		67 dBA	69 dBA
Poids		250 kg	350 kg
Batterie			
Capacité	24 V / 800 Ah	24 V / 800 Ah	24 V / 800 Ah
Poids	700 kg	700 kg	700 kg
Courant de quai			
Puissance	6 A	6 A (concept CC)	8 kW triphasé
Chargeurs de batteries	50 A 8 kg	50 A 8 kg	50 A 8 kg
Conversion de courant de quai 50 / 60 Hz	Non, pas de convertisseur de fréquence nécessaire	Non, pas de convertisseur de fréquence nécessaire	Oui, convertisseur de fréquence nécessaire
Convertisseurs CC-CA			
Puissance	7.5 kW (3 x convertisseur Phoenix 2,5 kW)	7.5 kW (3 x convertisseur Phoenix 2,5 kW)	convertisseur Phoenix 2,5 kW
Poids	54 kg	54 kg	18 kg
Poids total de l'installation	962 kg	1012 kg	1076 kg
2 semaines de carburant	98 litres	126 litres	154 litres
Poids total, y compris 2 semaines de carburant	990 kg	1118 kg	1205 kg

A partir des éléments du tableau nous pouvons constater ce qui suit :

10.7.1. La solution conventionnelle: un groupe 12 kW

Cette variante est lourde et volumineuse.

La charge moyenne d'un groupe 12 kW serait de :

- avec 4 heures de service par jour : $14 / (4 \times 12) = 29 \%$
- avec 6 heures de service par jour : $14 / (6 \times 12) = 19 \%$

Le besoin en courant de quai sera d'environ 8 kW, sauf si *PowerAssist* ou le concept CC est utilisé. Dans ce cas une prise 6 A (= 1,38 kW) suffira.

10.7.2. La solution moderne: poids et volume réduits, grâce à un groupe 6 kW et la fonction *PowerAssist*, ou un groupe CC de 5 kW

Pour l'utilisation de la fonction *PowerAssist* avec un groupe diesel de 6 kW, 2 Multis seraient nécessaires pour notre exemple du yacht totalement équipé. Pour l'application du concept CC afin de réduire le courant de quai au maximum, 3 Multis seraient nécessaires.

11. BESOIN D'ÉNERGIE JUSQU'À 48 kWh PAR JOUR (2 kW en moyenne)

11.1. Introduction

Dans le chapitre 10, nous avons traité les systèmes autonomes allant jusqu'à 14 kWh par jour. Ce besoin d'énergie est exemplaire pour un ménage de 4 à 6 personnes vivant sur un bateau ou dans une maison, avec tous les appareils ménagers électriques habituels à disposition, tant que la climatisation n'est pas nécessaire ou qu'elle est utilisée de façon limitée.

Nous avons vu aussi qu'un besoin quotidien d'électricité de 4 à 14 kWh est caractéristique des bateaux à moteur, des voiliers catamaran de 9 à 15 mètres ou des voiliers monocoques de 12 à 18 mètres.

Sur un bateau de seulement quelques mètres de plus, la consommation d'électricité augmente souvent de façon disproportionnée. Ces bateaux ont souvent à bord un personnel navigant professionnel donc au lieu de 4 à 6, il y a plutôt 8 à 12 personnes à bord. La plupart du temps la navigation se fait dans des eaux subtropicales ou tropicales, la climatisation étant souvent branchée 12 heures par jour, ou même 24 heures sur 24.

Le problème d'énergie est généralement résolu ainsi :

- Un groupe diesel qui tourne 24 heures sur 24, ou
- Une batterie de grande capacité pour créer une période de silence de 8 à 20 heures, avec en plus bien sûr un ou deux groupes pour recharger la batterie et pour alimenter tous l'équipement de cuisine, les machines à laver, la climatisation, etc.

Une prise quai triphasée sera également nécessaire (ce qui limite considérablement les possibilités dans les port de plaisance surchargés), parce que la batterie n'est généralement pas utilisée pour écrêter les périodes de demande maximale. Un convertisseur de fréquence (cher et lourd) sera nécessaire pour convertir le courant de quai 60 Hz à 50 Hz ou inversement.

Allons regarder de plus près à bord d'un yacht ayant un besoin d'énergie quotidien de 48 kWh, ce qui revient à une consommation moyenne de 2 kW.

11.2. Les consommateurs les plus importants

Les consommateurs de longue et de moyenne durée sont :

- Réfrigérateurs et congélateurs: 300 W en moyenne
- Climatisation: capacité de réfrigération de 12 kW (41.000 BTU) avec une puissance électrique de 3 kW

Les consommateurs de courte durée sont :

- Une table de cuisson à 6 foyers + fours : 12 kW
- Un dessalinisateur avec pompe à haute pression, débit 300 l par heure : 3 kW (puissance d'appel 15 kW)
- La/Les machine(s) à laver et le(s) lave-vaisselle(s) : 6 à 12 kW
- Éventuellement un compresseur de plongée

D'autres consommateurs sont moins importants pour la détermination de la capacité du système. Nous partons d'une consommation moyenne de 2 kW.

11.3. Génération d'électricité

11.3.1. Le groupe tourne 24 heures sur 24

Un groupe d'au moins 15 kW est nécessaire, en partant du fait que d'autres consommateurs importants de courte durée sont arrêtés durant la préparation des repas et que dans la pratique, les zones de cuisson et les fours ne sont jamais branchés en même temps à leur puissance maximum. Dans la pratique, on installe tout de même un groupe de 20 kW. Souvent, ce groupe est aussi pourvu d'une pompe hydraulique attelée pour le propulseur d'étrave. On peut ajouter un deuxième groupe plus petit, par exemple de 6 kW pour les périodes exigeant beaucoup moins de courant. Les batteries et les chargeurs de batterie resteraient très petits dans ce cas: presque toute la puissance est en effet fournie par les groupes diesel.

Bien que cette solution semble simple et bon marché à première vue, elle a quelques sérieux inconvénients:

- Des systèmes de synchronisation seront nécessaires (complexes et chers) pour garantir une alimentation sans interruption lors de la commutation de d'un groupe à l'autre ou du groupe à la prise de quai.
- Une prise quai de 20 kW (triphasee, 3 x 32 A) est nécessaire.
- Un convertisseur de fréquence, cher et lourd, de 20 kW est nécessaire pour se brancher sur le courant de quai de l'autre côté de l'Océan Atlantique.

- Un groupe de 20 kW qui tourne 24 heures sur 24, fonctionnerait avec une charge moyenne de seulement $2 / 20 = 10 \%$! Cela n'est bon ni pour le moteur ni pour la consommation de carburant. En ajoutant un deuxième groupe plus petit, la charge moyenne monte à environ 20 %. C'est mieux, mais toujours pas idéal.
- Et naturellement il y a aussi le bruit, les vibrations, les émanations diesel et la pollution 24 heures sur 24... (et n'oubliez pas qu'il y a de plus en plus de ports de plaisance et de réserves naturelles où l'utilisation d'un groupe est interdite)

11.3.2. Installer une batterie pour créer une période de silence

Ces variantes nous ramènent au paragraphe 10.6.3, mais la batterie devient bien plus grande.

Capacité de la batterie

La capacité de la batterie dépend de la durée de la période de silence (et n'oubliez pas la climatisation, qui pourrait bien être le consommateur le plus important). Supposons que le groupe tourne au moins deux fois par jour, durant la préparation des repas, quand le dessalinisateur, le lave-linge et/ou le lave-vaisselle sont en service. Autrement dit : pendant environ 8 heures par jour.

Nous partons d'une demande moyenne de la batterie pendant la période de silence de 1,5 kW (= 63 A), ce qui résulte en $1,5 \times (24 - 8) = 24 \text{ kWh}$ ou $24 \text{ kWh} / 24 \text{ V} = 1000 \text{ Ah}$ extraits par jour de la batterie.

L'application de la règle empirique du § 8.5.2 nous conduit à une capacité batterie de 2000 Ah.

Des 48 kWh nécessaires par jour, dans cet exemple, 24 kWh sont fournis par la batterie et les 24 kWh restants directement par le groupe.

Le groupe

En 8 heures, le groupe doit charger 1000 Ah. Nous avons besoin d'un courant de charge qui soit légèrement supérieur à $1000 / 8 = 125 \text{ A}$, par exemple 175 A. Pour le groupe cela veut dire une demande de $175 \times 30 = 5,25 \text{ kW}$. Le groupe 20 kW mentionné ci-dessus ferait l'affaire, à condition que les chargeurs de batterie soient hors service quand un courant de pointe est exigé, pour la cuisine par exemple. L'énergie à fournir par le groupe est de $1000 \text{ Ah} \times 30 \text{ V} = 30 \text{ kWh}$ pour la batterie, plus les 24 kWh fournis directement à l'équipement : au total $30 + 24 = 54 \text{ kWh}$, y compris les pertes de charge/décharge.

En ajoutant une batterie de 2000 Ah au système, nous avons:

- Deux périodes de silence à bord d'environ 8 heures chacune ;
- réduit l'utilisation du groupe de 24 à 8 heures par jour ;
- augmenté la charge moyenne du groupe de 2 kW à $54 / 8 = 6,75 \text{ kW}$.

Mais il nous faut toujours une prise quai de 15 kW et un convertisseur de fréquence 50/60 Hz.

11.3.3. Des Multis parallèles et la fonction *PowerControl*, et le concept CC pour le courant de quai:

L'utilisation de Multis et de *PowerControl* parallèle au groupe a les avantages suivants (voir aussi chapitre 8):

- Au lieu d'un groupe triphasé, on peut passer à un modèle monophasé. Le courant de quai devient aussi monophasé (voir ci-dessous).
- Alimentation sans interruption. Quand le groupe s'arrête, les Multis fournissent le courant alternatif à bord. Après avoir mis en marche le groupe, les utilisateurs seront commutés automatiquement et sans interruption sur le groupe. Les Multis commuteront alors sur la fonction chargeur de batterie.
- Grâce à la fonction *PowerControl*, le risque de surcharge du groupe est exclu. Le courant de charge de la batterie est réduit automatiquement dans le cas où le besoin en énergie des Multis (qui peut s'élever à $5 \times 70 \text{ A} \times 30 \text{ V} = 10,5 \text{ kW}$ avec 5 Multis), simultanément aux autres consommateurs, provoquerait une surcharge. Lorsque la consommation est faible, les Multis utiliseront l'énergie excédentaire du groupe pour charger les batteries, jusqu'à un maximum de $5 \times 70 = 350 \text{ A}$, tout comme dans l'exemple du § 8.3.3.
- Avec l'application du concept CC, le courant de quai peut être réduit de 15 kW à 3,5 kW (en Europe cela voudrait dire une prise de quai monophasée de 230 V 16 A au lieu d'une connexion triphasée) et le convertisseur de fréquence 50/60 Hz est une fonction intégrée dans le système. Pour appliquer le concept CC, le courant de quai doit être branché sur un ou plusieurs chargeurs de batterie qui peuvent fournir ensemble 100 A. L'installation à bord est alors alimentée à partir de la batterie par les 5 Multis parallèles. Les 5 Multis parallèles ont 10 kW de puissance continue.

A première vue, 100 A de courant de charge paraît peut-être insuffisant: un besoin d'énergie quotidien de 48 kWh veut dire, pour un système 24 V, un courant moyen de $(48 \text{ kWh} / 24 \text{ h}) / 24 \text{ V} = 83 \text{ A}$. Mais d'un autre côté, Il est très attrayant de pouvoir se contenter d'une prise de quai de seulement 16 A. Dans la pratique, le besoin d'énergie est beaucoup plus faible quand le bateau est à quai, car le dessalinisateur, les instruments de navigation etc. ne sont pas utilisés.

11.3.4. Un pas de plus : le MultiPlus et la fonction *PowerAssist*

Si le besoin en énergie est de 48 kWh par jour, auquel s'ajoutent les pertes de charge/décharge de 6 kWh, le groupe doit fournir $54 / 8 = 6,75$ kW **en moyenne** s'il tourne 8 heures par jour. Sur la base de la puissance moyenne plus un peu de marge, un groupe de 10 kW seulement pourrait donc être installé à la place du 20 kW (voir §. 8.3. et 8.4.).

L'installation de 5x MultiPlus et la fonction *PowerAssist*. augmente la puissance maximale du système de 10 kW à $10 + 5 \times 2,5 = 22,5$ kW.

L'énergie disponible de la batterie de 2000 Ah ($24 \times 2000 \times 0,5 = 24$ kWh) est plus que suffisante pour satisfaire le besoin d'énergie durant les périodes que les Multi's apportent un complément au groupe électrogène.

Lorsque la consommation est faible, les Multis utiliseront l'énergie excédentaire du groupe pour charger les batteries, jusqu'à un maximum de $5 \times 70 = 350$ A, tout comme dans l'exemple du § 8.3.3.

Courant de quai

Quand on utilise le courant de quai, la meilleure solution est le concept CC tel qu'il a été décrit dans le § 11.3.3.

Le groupe diesel: conclusion

En ajoutant au système une batterie de 2000 Ah, 5x MultiPlus avec *PowerAssist*, et un chargeur de 100 A, nous pouvons maintenant:

- introduire 2 périodes de silence par jour,
- réduire la puissance du groupe de 20 kW (triphase) à 10 kW (monophasé)
- réduire la prise quai de 15 kW (triphase 25 A) à seulement 3 kW (16 A monophasé)
- éliminer un convertisseur de fréquence de 15 kW pour le raccordement sur un courant de quai de 60 Hz;
- réaliser à bord une alimentation sans interruption;
- augmenter considérablement la redondance et la sécurité du système.

11.3.5. Le groupe CC

Une variante pour le groupe 230 V de 10 kW est un groupe CC de 10 kW. Voir § 10.6.7.

11.3.6. Un petit groupe CC ou CA auxiliaire afin de réduire le nombre d'heures de fonctionnement du groupe primaire ainsi que la capacité de la batterie

Sur un grand bateau, on peut installer un petit groupe de telle sorte qu'il soit inaudible.

- La capacité de la batterie pourrait alors être abaissée jusqu'à environ 1000 Ah.
- Le groupe 10 kW sera moins utilisé.

11.4. Conclusion

Une comparaison des variantes pour une utilisation de 48 kWh par jour:

Besoin d'énergie jusqu'à 48 kWh par jour (2 kW en moyenne)			
	Groupe CC 10 kW avec PowerAssist et un ensemble auxiliaire	Groupe 20 kW CA avec PowerAssist et un ensemble auxiliaire	Groupe 20 kW CA avec période de silence
Ensemble auxiliaire 5 kW			
Heures par jour	12	12	Ne s'applique pas
Consommation par jour	8 litres	8 litres	Ne s'applique pas
Poids	150 kg	150 kg	Ne s'applique pas
Groupe			
Heures par jour	6	6	8
Consommation par jour	15 litres	20 litres	30 litres
Poids	300 kg	450 kg	450 kg
Batterie			
Capacité	24 V 1000 Ah	24 V 1000 Ah	24 V 2000 Ah
Poids	1000 kg	1000 kg	2000 kg
Courant de quai	3,5 kW	3,5 kW	15 kW
Puissance connectée	16 A monophasé	16 A monophasé	32 A triphasé
Transformateur 110 – 230 V	non nécessaire si on utilise des chargeurs de batterie avec une entrée universelle 90-265 V	non nécessaire si on utilise des chargeurs de batterie avec une entrée universelle 90-265 V	pas applicable
Convertisseur de fréquence 15 kW	Ce n'est pas nécessaire	Ce n'est pas nécessaire	Oui, 545 kg
Chargeurs / Convertisseurs			
Chargeurs de batteries	100 A 12 kg	100 A 12 kg	200 A 24 kg
Convertisseurs	12,5 kW (5 x MultiPlus)	10 kW (4 x Multi)	2,5 kW
Poids	90 kg	72 kg	18 kg
Poids total de l'installation	1552 kg	1684 kg	3037 kg

A partir du tableau nous pouvons constater ce qui suit:

11.4.1. Le groupe 20 kW avec période de silence (colonne de droite)

Cette variante est lourde et prend beaucoup de place. La batterie de 2000 Ah est onéreuse, avec le risque complémentaire de frais élevés en cas d'erreur de manipulation de la batterie. La variante d'utiliser le groupe 24 heures sur 24, n'est pas vraiment attrayante non plus.

Un groupe auxiliaire de 6 kW par exemple pourrait être utilisé pendant la majeure partie de la journée, et le groupe de 20 kW quand plus de puissance est nécessaire. En plus du bruit et de la pollution, les frais d'utilisation seront élevés. Même un groupe de 1500 tr/min aura besoin d'une révision toutes les 8000 à 25000 heures (1 à 3 ans) et bien sûr d'un entretien régulier en plus. Pour la connexion de l'autre côté de l'Océan, un convertisseur de fréquence cher et lourd devra être installé.

11.4.2. *PowerControl* et le concept CC pour le courant de quai, avec un ensemble auxiliaire pour réduire la capacité de la batterie (colonne du milieu)

Avec l'application du concept CC, le problème de courant de quai est résolu (voir § 11.3.3.).

En ajoutant un petit groupe auxiliaire (CA ou CC), la capacité de la batterie peut être réduite à 1000 Ah, ce qui fait également diminuer le poids de 1000 kg.

11.4.3. Un groupe plus petit avec *PowerAssist*, le concept CC pour le courant de quai, avec un ensemble auxiliaire pour réduire la capacité de la batterie (colonne de gauche)

La différence la plus importante par rapport au paragraphe 11.4.2 est que le groupe est plus petit (10 kW au lieu de 20 kW), ce qui réduit le poids de 130 kg.

12. BESOIN D'ÉNERGIE JUSQU'À 240 kWh PAR JOUR (10 kW en moyenne)

12.1. Introduction

Dans le chapitre 11 nous avons vu que le volume, le poids et la complexité du système électrique peuvent être réduits considérablement grâce au concept CC et à la fonction *PowerAssist*. Ci-dessous nous traiterons de certains besoins d'énergie encore plus élevés et nous verrons ce que peut y être le rôle du concept CC et de la fonction *PowerAssist*.

12.2. Les consommateurs les plus importants

Une consommation en moyenne de 10 kW concerne les bateaux d'environ 30 mètres.

- Le plus grand consommateur d'électricité est généralement la climatisation, qui est branchée jour et nuit dans les régions tropicales. La capacité réfrigérante nominale peut être par exemple de 100.000 BTU (= 30 kW). Avec un CoP (voir § 6.2.) de 4 cela veut dire qu'il faut $30 / 4 = 7,5$ kW quand la climatisation doit tourner à plein régime. Avec une puissance moyenne de 5 kW, le refroidissement de l'air correspond à la moitié du besoin en énergie à bord !
- Les autres consommateurs importants sont l'équipement de cuisine, les machines à laver, les sèche-linges le dessalinisateur et l'éclairage. Le besoin d'électricité sera plus faible la nuit que le jour, par exemple dans un rapport de 5 à 15 kW.

12.3. Génération d'électricité

12.3.1. Groupe électrogène

On installera un groupe de 50 kW. Un groupe auxiliaire de 8 kW peut être utilisé quand il y a moins de personnes à bord. Cette organisation a les mêmes inconvénients que ceux mentionnés dans le § 11.3.1 :

- Pour garantir une alimentation sans interruption lors de la commutation d'un groupe à l'autre ou du groupe à la prise de quai, des systèmes de synchronisation doivent être ajoutés.
- Il faut une connexion électrique de quai de 50 kW.
- Un convertisseur de fréquence de 50 kW, coûteux et lourd, est nécessaire pour se brancher sur l'électricité de quai de l'autre côté de l'Océan Atlantique.
- Un générateur de 50 kW qui tourne 24 heures sur 24, aurait une charge moyenne de seulement $10 / 50 = 20$ % ! Cela n'est pas idéal pour le générateur ni pour la consommation de carburant. En ajoutant un deuxième générateur plus petit, ce chiffre monte à environ 30 %. C'est mieux, mais toujours pas idéal.
- Naturellement, il y a aussi le bruit, les vibrations, les vapeurs diesel et la pollution 24 heures sur 24... (et n'oubliez pas qu'il y a de plus en plus de ports de plaisance et réserves naturelles où l'utilisation d'un groupe est interdite).

12.3.2. Installer une batterie pour créer une période de silence, avec une utilisation du groupe soutenue par la batterie (*PowerAssist*)

Cette variante n'a seulement sa raison d'être que si un besoin de 50 kW est exceptionnel et de courte durée.

La batterie

S'il est possible de créer des périodes de silence pendant lesquelles la consommation est réduite à 4,5 kW en moyenne, par exemple 8 heures dans la nuit et 6 à 8 heures en journée, la quantité maximale d'énergie à fournir par la batterie serait alors de $4,5 \times 16 = 72$ kWh soit $72 \text{ kWh} / 24 \text{ V} = 3000$ Ah. Si nous appliquons notre règle pratique du § 8.5.2, il nous faut une batterie de 6000 Ah.

Le groupe, les Multis et le courant de quai

Des 240 kWh nécessaires par jour, dans notre exemple, 72 kWh sont fournis par la batterie et les 168 kWh restants directement par le groupe.

L'énergie qu'il faut pour charger la batterie est de $3000 \text{ Ah} \times 30 \text{ V} = 90 \text{ kWh}$.

Pertes de charge/décharge incluses, l'énergie à fournir quotidiennement par le générateur s'élève à $168 + 90 = 258 \text{ kWh}$.

Le générateur, qui tourne au moins 8 heures par jour, doit avoir une puissance nominale d'au moins $258 / 8 = 32 \text{ kW}$. Avec un peu de marge, on installe 40 kW.

En ajoutant 3 Multis par phase, la puissance du système est augmentée de $9 \times 2,5 = 22,5 \text{ kW}$, ce qui donne une puissance totale de $40 + 22,5 = 62,5 \text{ kW}$. L'énergie disponible de la batterie : ($24 \times 6000 \times 0,5 = 72 \text{ kWh}$) est largement suffisante pour fournir un supplément de 10 à 20 kW pendant quelque temps. Lorsque la consommation est faible, les Multis utiliseront l'énergie excédentaire du groupe pour charger les batteries, jusqu'à un maximum de $9 \times 70 = 630 \text{ A}$, ce qui représente une charge de $630 \text{ A} \times 30 \text{ V} = 19 \text{ kW}$ pour le groupe.

Une attrayante caractéristique supplémentaire des Multis, c'est qu'ils **équilibrent automatiquement la charge sur les 3 phases du groupe** : Les Multis prennent le maximum de puissance de(s) phase(s) qui auraient autrement la demande la plus faible.

La solution pour réduire l'électricité de quai (et intégrer une fonction convertisseur de fréquence dans le système) est à nouveau le concept CC. L'énergie quotidienne de 240 kWh se traduit en ($240 \text{ kWh} / 24 \text{ h} / 24 \text{ V} = 416 \text{ A}$ pour un système 24 V, pouvant être fournie par 6 chargeurs de batterie de 100 A. L'électricité de quai nécessaire est donc de 18 kW (32 A triphasé).

Une limitation du courant de quai à 18 kW est également possible en utilisant des Multis avec *PowerAssist*, mais dans cette configuration, la fonction conversion de fréquence est perdue.

En ajoutant au système une batterie de 6000 Ah, 9 Multis avec *PowerAssist* et 6 chargeurs de batterie de 100 A, nous pouvons :

- introduire 2 périodes de silence par jour
- réduire la puissance du groupe de 50 kW (triphasé) à 40 kW (triphasé)
- réduire le courant de quai nécessaire de 50 kW (triphasé 75 A) à 20 kW (triphasé 32 A)
- éliminer le convertisseur de fréquence de 50 kW pour raccordement sur le courant de quai 60 Hz
- réaliser à bord une alimentation électrique sans interruption;
- augmenter considérablement la redondance et la sécurité du système.

12.3.3. Un petit groupe CA auxiliaire afin de réduire le nombre d'heures de fonctionnement du groupe primaire ainsi que la capacité de la batterie

Sur un grand bateau, on peut installer un petit générateur de telle sorte qu'il soit inaudible.

- La capacité de la batterie peut ainsi être réduite à environ 2000 Ah.
- Ce générateur (monophasé) peut fournir ensemble avec 3 des 9 Multis, une puissance de pointe de $8 + 7,5 = 15,5 \text{ kW}$, tandis que sur les 2 autres phases, 3 Multis peuvent fournir 7,5 kW par phase.

12.4. Une comparaison des variantes pour une utilisation de 10 kW en moyenne

Besoin d'énergie jusqu'à 240 kWh par jour (10 kW en moyenne)		
	Groupe 40 kW avec 9 Multis et <i>PowerAssist</i> . Batterie de service 2000 Ah ensemble auxiliaire 8 kW.	Concept CA
Groupes		
Puissance	1 x 40 kW + 1 x 8 kW	1 x 50 kW + 1 x 10 kW
Heures de fonctionnement par jour	1 x 4 heures + 1 x 20 heures	1 x 10 heures
		1 x 14 heures
Consommation par jour	95 litres	120 litres
Poids	800 kg	1200 kg
Batterie		
Capacité	2000 Ah	400 Ah
Poids	2000 kg	400 kg
Courant de quai	18 kW	50 kW
Puissance nominale	3 x 32 A	3 x 100 A
Poids du convertisseur de fréquence de 50 kW	Ce n'est pas nécessaire	1300 kg
Convertisseur CC/CA		
Puissance	37,5 kW (15 Multis)	6 kW
Poids	270 kg	54 kg
Chargeurs de batterie		
Courant	600 A	75 A
Poids	80 kg	10 kg
Poids total	3000 kg	2964 kg
Consommation de carburant pendant 2 semaines (voir note)	1330 litres	1680 litres
Poids total, y compris carburant pour 2 semaines	4017 kg	4375 kg

A partir du tableau nous pouvons constater :

La principale leçon est qu'avec 240 kWh d'énergie électrique par jour, la limite des nouveaux composants et concepts présentés dans ce livre est atteinte.

La batterie nécessaire pour appliquer *PowerAssist* et le concept CC est très lourde et onéreuse.

PowerAssist ou le concept CC sont des options attrayantes uniquement quand une période de silence est nécessaire, ou quand la demande d'énergie est généralement bien inférieure à 240 kWh par jour.

13. CONCLUSION

13.1. La consommation d'électricité à bord

- Sur des petits bateaux, le réfrigérateur et le congélateur sont souvent les consommateurs les plus importants. L'investissement dans une excellente isolation et un bon système de refroidissement du condenseur peut réduire la capacité de batterie nécessaire ainsi que le temps de charge.
- Les petits systèmes de climatisation peuvent être incroyablement inefficaces.
- La consommation d'énergie des consommateurs continus et de longue durée (surtout les instruments de navigation et la réfrigération) est souvent sous-estimée.
- La consommation énergétique des consommateurs de courte durée (micro-ondes, table de cuisson électrique, machine à laver, pompes, winch) est souvent surestimée.

13.2. Produire de l'électricité

- Le premier pas, lorsque la demande d'électricité augmente, est l'installation d'un alternateur supplémentaire ou d'un alternateur plus puissant et l'augmentation de la capacité batterie. La capacité batterie, mesurée en Ah, doit être d'au moins 3 fois le courant charge, mesuré en Ampères (courant de charge maximal C / 3). Une batterie plus petite ne pourra pas absorber le courant de charge disponible.
- Lors de la conception d'un système électrique autonome, il faut d'abord déterminer la quantité d'énergie électrique nécessaire par jour.
- Un des problèmes souvent négligés lors de l'installation d'un groupe électrogène à bord d'un bateau est le courant de quai limité. Souvent, le groupe peut fournir beaucoup plus de puissance que la prise de quai. Le résultat est qu'au port le confort sera limité, ou qu'il faudra se résoudre à faire tourner le groupe même au port.

13.3. Le concept Courant Continu

- Dans le concept CC, la batterie est au cœur du système. D'un côté les sources d'énergie et de l'autre côté les consommateurs sont branchés sur la batterie. La batterie fournit une énergie supplémentaire quand la demande est supérieure à l'offre et elle absorbe de l'énergie quand l'offre est supérieure à la demande. Autrement dit : la batterie écrête les pointes de consommation.
- Le concept CC permet ainsi de dimensionner les sources d'énergie sur la base de la consommation moyenne plutôt qu'à partir de la consommation maximale. Ceci est particulièrement important pour le courant de quai et le dimensionnement du groupe électrogène.
- Le concept CC sert simultanément comme convertisseur de fréquence 50 / 60 Hz.

13.4. *PowerAssist* : le concept CA soutenu par batterie

- Tout comme pour le concept CC, *PowerAssist* utilise une batterie pour écrêter les pointes de consommation. Un ou plusieurs convertisseur/chargeurs qui fonctionnent en parallèle avec le groupe ou le courant de quai, fournissent un complément de puissance quand la demande est supérieure à l'offre et absorbent de l'énergie (pour recharger la batterie) quand l'offre est supérieure à la demande.
- Comme le concept CC, *PowerAssist* permet, malgré les limites de la prise de quai ou d'un petit groupe diesel, de disposer tout de même du confort moderne.
- Comme le concept CC, *PowerAssist* économise de l'espace et du poids. De plus, la charge moyenne du groupe sera beaucoup élevée. Ce qui prolonge la durée de vie et diminue l'entretien et la consommation de carburant.
- *PowerAssist* ne convient pas à la conversion de fréquence. Une flexibilité maximale est obtenue par l'ajout de chargeurs de batterie au système et par l'application du concept CC quand le bateau est branché sur le courant de quai.

13.5. La batterie

- La capacité utile de la batterie de servitude est au maximum de 50 % de la capacité nominale. Décharger la batterie au-delà de 70 % de la capacité nominale n'est pas conseillé, et d'autre part elle ne sera souvent rechargée qu'à 80 %.
- Sur les unités assez grandes, équipés d'un groupe et d'une batterie importante, un petit groupe auxiliaire (CC) inaudible peut être utilisé pour réduire le volume et le poids de la batterie.

Index

alternateur, 32, 53

heures moteur, 53
rendement, 53

batterie

AGM, 12
autodécharge, 20
batterie de démarrage, 30, 33
batterie pour le propulseur d'étrave, 31, 34
bouillonnement, 11, 19, 27
capacité, 59, 64
capacité et temps de décharge, 15
charge à courant limité, 25
charge d'égalisation, 27
charge d'entretien, 26
charge d'absorption, 25
charge d'égalisation, 18
charge insuffisante, 18
charger, 25
compensation de température, 28
corrosion, 11, 26
décharge rapide, 23
densité, 21
diffusion, 10
dimensions, 15
eau / gazage par Ah, 27
effet du régime de décharge sur la capacité, 23
électrolyte, 21
éléments cylindriques, 12, 26
emballage thermique, 28
étanche, 11
gazage, 26
gel, 12
ouverte, 11
perte de masse, 11
plaque plane, 12
plaques tubulaires, 12
plomb-antimoine, 11
plomb-calcium, 11
poids, 15
procédé de diffusion, 25
rendement de courant, 22
rendement énergétique, 22
stratification, 12, 18
sulfatation, 11
sulfater, 17
surcharge, 19, 30
température, 16, 19
temps de décharge, 15
tension de charge, 29
tension de gazage, 21
traction, 12
utilisation cyclique, 17
VRLA, 11, 26

capacité batterie

capacité, 47, 68
capacité utile, 47

chaleur spécifique, 38

chargeur de batterie, 34

fonction *BatteryStorage*, 34

chargeur de batterie

fonction *BatterySafe*, 34

climatisation, 38, 52

coefficient de mérite, 37

coefficient of Performance, 37

compresseur de plongée, 40

concept CA, 43, 63, 71

concept CC, 42, 48, 60

congélateur, 37

consommation électrique

bouilloire électrique, 57

climatisation, 38, 52
compresseur de plongée, 40
congélateur, 37

dessalinisateur, 52

guindeau électrique, 39
lave-vaisselle, 57
machine à laver, 39, 57
micro-ondes :, 52
propulseur d'étrave, 39
réfrigérateur, 37
table de cuisson électrique, 39, 57
winch électrique, 39

convertisseur

connexion en parallèle, 43
possibilité de couplage en parallèle, 9

convertisseur de fréquence, 59

coupleur de batterie commandé par microprocesseur, 33

courant d'appel, 40

courant de quai, 46, 48, 54

concept CC, 48
convertisseur de fréquence, 49
réduire la puissance de pointe, 48

cuisiner, 40

dessalinisateur, 52

énergie, 36

eau, 15
gas-oil, 15
jusqu'à 14 kWh par jour, 55
jusqu'à 240 kWh par jour, 68
jusqu'à 4 kWh par jour, 50
jusqu'à 48 kWh par jour, 63

Énergie éolienne, 53

Énergie solaire, 53

fonction *BatterySafe*, 34

fonction *BatteryStorage*, 34

génératrice hydraulique, 54

groupe CC, 42, 61

groupe diesel, 59

rendement, 61

groupe électrogène, 58

lave-vaisselle, 39, 57

machine à laver, 39, 57

micro-ondes, 52

moniteur de batterie, 21

Multi, 9, 43, 59

PowerControl, 43

période de silence, 43

pèse-acide, 21

Peukert, 23

plaque de cuisson électrique, 57

pompe à chaleur, 37

***PowerAssist*, 9, 44, 60, 65, 71**

***PowerControl*, 9, 43, 60, 64**

puissance, 36

réfrigérateur, 37

réfrigération, 37

régulateur à trois étapes, 33

régulateur de fréquence, 40

rendement

alternateur, 53

groupe diesel, 61

table de cuisson électrique, 39

variateur de fréquence, 40