

assez intense pour propulser directement un voilier. Le rendement de l'hydrogénérateur est déjà bien meilleur.

Si l'on s'intéresse maintenant à la densité d'énergie, la comparaison entre les batteries et le gasoil donne toute la mesure du problème. Avec des batteries, on est limité à environ 0,04 kWh/kg pour du plomb et 0,08 kWh/kg pour du lithium – ce qui limite non seulement l'autonomie, mais aussi l'intensité énergétique, d'autant qu'il est difficile d'aller très haut dans le voltage. La densité d'énergie du gasoil (environ 10 kWh/kg) est plus de cent fois supérieure à celle d'une batterie au lithium... De quoi produire un flux bien plus intense et pendant une durée bien plus importante. Et cette énergie est disponible à la demande. Ces écarts d'intensité énergétique (entre la lumière du soleil et la combustion du gasoil) et de densité d'énergie (entre les batteries et le gasoil) sont trop importants pour être compensés par le très bon rendement énergétique du moteur électrique lui-même – celui-ci convertit en effet 90% de l'énergie en force propulsive, au lieu de 30% pour un moteur thermique (le reste part en chaleur). Partant de là, nous pouvons distinguer les différents types de motorisation électrique. Soyons clairs, la solution la plus intéressante est le diesel-électrique série. On peut s'étonner que les fabricants ne s'y intéressent pas davantage. Fischer Panda avait développé un prototype très convaincant, mais le fabricant a renoncé à ce projet. On devine un problème de marketing : si on peut tourner sur batteries, le moteur est censé être « vert » ; alors que si l'on est obligé de brûler du gasoil, ça pollue...

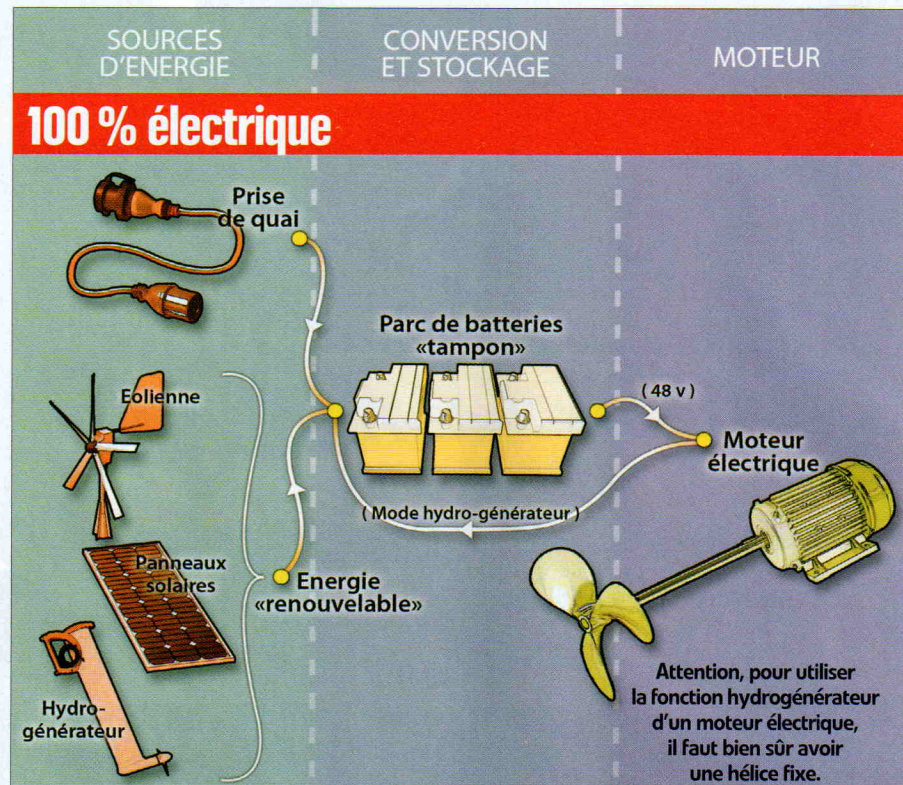
## LES QUATRE TYPES DE PROPULSION ELECTRIQUE

### 1/ Le 100% électrique

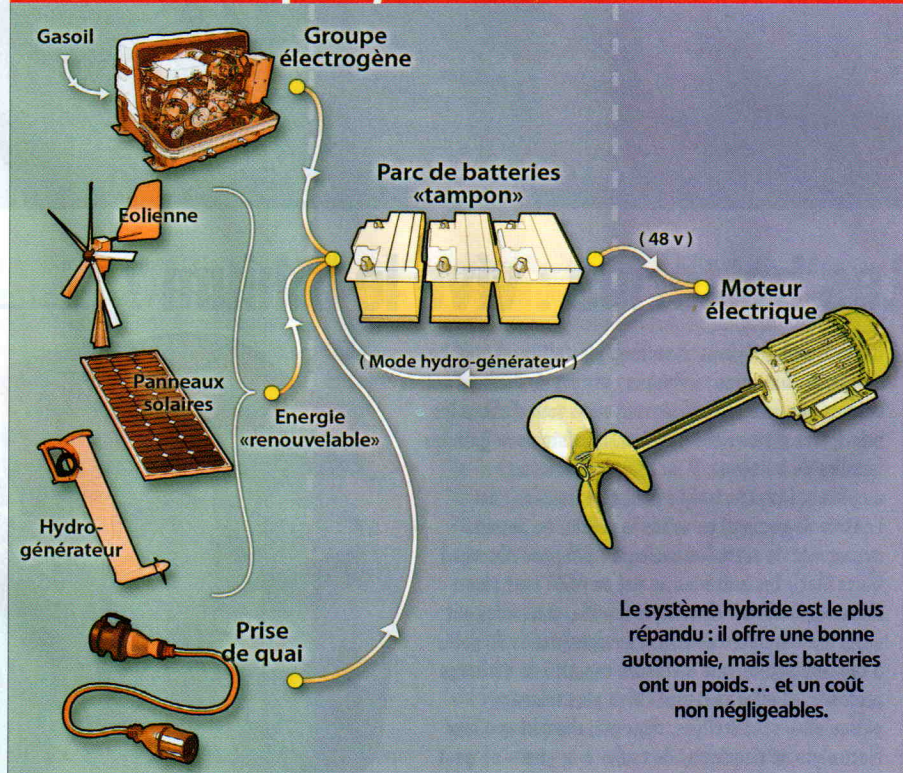
Ce premier concept vise le 100% électrique, voire le 100% renouvelable. Le moteur est alimenté par des batteries elles-mêmes alimentées par des panneaux solaires, par une éolienne, par un hydrogénérateur... ou par une prise de quai...

### 2/ Le diesel-électrique hybride

C'est une variante du système précédent (ne pas confondre avec le diesel-électrique série). Seule différence, on fait appel en amont à un groupe électrogène diesel qui alimente les batteries. Autrement dit, entre le groupe électrogène et le moteur électrique, il y a là encore les batteries tampons qui peuvent être alimentées aussi bien par le groupe que par d'autres sources (prise de quai, éolienne, panneaux solaires, hydrogénérateur, etc.). On règle ainsi le problème de la densité énergétique, au moins pour ce qui est de l'autonomie – car le problème de l'intensité énergétique demeure. La limite de l'hybride (et celle du 100% électrique), ce sont en effet les batteries tampons, puisqu'à moins d'utiliser un



## Diesel-électrique hybride



câble absolument monstrueux et/ou d'empiler des dizaines de batteries pour atteindre un voltage suffisant, on ne peut guère dépasser les 20 kW à la sortie (ce qui toutefois est bien suffisant pour un petit voilier). Par ailleurs les batteries en elles-mêmes soulèvent un tas de problèmes (de coût et autres, voir encadré page précédente), et elles ne sont pas forcément d'une verdure exemplaire. En revanche, grâce à l'excellent rendement énergétique du moteur électrique, ce système hybride est très efficace en terme d'autonomie (le Hunter e36 que nous avons essayé peut ainsi faire 800 milles avec un plein !). Et le groupe permet d'avoir du 220 V à bord...

### 3/ Le diesel-électrique parallèle

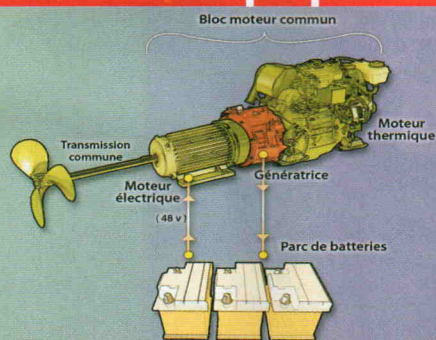
Une solution réellement intéressante par sa souplesse. Il s'agit d'un accouplage de deux moteurs, un thermique et un électrique, dans un même bloc-moteur, et avec une transmission commune. Le moteur thermique est associé à une génératrice (comme un alternateur, en mieux) qui recharge les batteries qui elles-mêmes alimentent le moteur électrique – là encore, il y a donc des batteries tampons. Ce type de moteur est généralement conçu pour fonctionner en mode 100% électrique ou 100% thermique, mais le modèle Steyr est capable de faire tourner ses deux moteurs en même temps.

« Sur la colonne de barre du Hunter e36, une manette des gaz presque normale et un écran de contrôle (sous le traceur). »

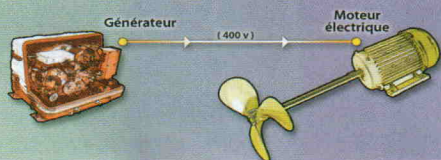


FRANÇOIS-XAVIER DE CRECY

## Diesel-électrique parallèle



## Diesel-électrique série



## Les mots pour le dire

**BATTERIE** : assemblage (d'où le terme de « batterie ») d'accumulateurs électrochimiques. En provoquant des réactions chimiques d'oxydo-réduction qui sont réversibles, on peut en effet convertir de l'énergie électrique en énergie électrochimique, la stocker ainsi dans des matières premières, et la reconvertir ensuite en énergie électrique au moment de la libérer.

**DENSITÉ D'ÉNERGIE** : quantité d'énergie totale cumulée (en Ah, Wh...) qui peut être produite à partir d'une masse donnée de matières premières (ou d'un volume donné). L'unité est donc le Wh/kg. Notion utilisée pour les batteries comme pour les combustibles végétaux, fossiles, nucléaires, etc. Des matières premières à plus forte densité d'énergie permettent de produire des flux d'énergie plus intenses et/ou pendant plus longtemps.

**ELECTROLYTE** : dans un accumulateur électrochimique, substance qui permet le passage du courant électrique entre les deux électrodes. Ce courant électrique prend la forme d'une migration d'ions (espèces chimiques électriquement chargées) à travers l'électrolyte.

**INTENSITÉ ÉNERGETIQUE** : débit instantané d'un flux d'énergie (en W) en fonction de la surface. Ne pas confondre avec l'intensité électrique, qui correspond simplement à un débit d'électrons, sans considération de surface. Par exemple, en moyenne sur 24 heures, l'intensité énergétique du flux électromagnétique du soleil (par beau temps) est de 1 350 W/m<sup>2</sup>. Dans le cas de l'électricité (par exemple à la sortie d'un groupe électrogène, ou d'une batterie), il faut un voltage élevé pour obtenir une haute intensité énergétique.

### 4/ Le diesel-électrique série

Ici, un générateur thermique dédié produit de l'électricité qui alimente directement un moteur électrique à haute tension – directement, c'est-à-dire sans passer par des batteries tampon (bien sûr, le générateur peut aussi produire du courant domestique en 220 V, et recharger les batteries de service). Principal avantage, des performances de premier ordre – les sous-marins, les paquebots ou encore les locomotives sont propulsés de cette façon... En effet, alors que les batteries tampons limitent le voltage d'alimentation du moteur (on ne peut guère aller au-delà de 96 V), l'accouplage direct du générateur et

du moteur permet d'utiliser du 400 V ; on n'a donc plus aucun problème de puissance – cette fois on peut dépasser allégrement les 20 kW sans pour autant utiliser un câble de section énorme. Et on évite aussi tous les problèmes de conversion/stockage de l'énergie, puisque les difficultés liées aux batteries, à leurs performances moyennes, à leur nature consommable, à leur prix et à leur éventuel caractère polluant et/ou dangereux sont ici éliminées par le vide ! En revanche, le moteur ne peut bien sûr tourner que si son générateur est en marche ; impossible de naviguer dans un silence religieux comme on peut le faire (au moins un certain temps)

avec les trois autres types de motorisation. N'empêche qu'un moteur diesel-électrique est plus silencieux qu'un moteur thermique, et qu'il a tous les autres avantages intrinsèques du moteur électrique. Tout d'abord, l'autonomie. Ensuite, le couple : alors qu'un moteur thermique doit monter en régime pour avoir du couple, un moteur électrique a déjà du couple à bas régime – en fait, il a un couple constant. C'est un bénéfice non négligeable pour les manœuvres de port. Il y a enfin la souplesse et la simplicité d'installation, puisque le moteur (très compact) peut être séparé du générateur, et que cette fois il n'y a pas un énorme parc de batteries à caser...