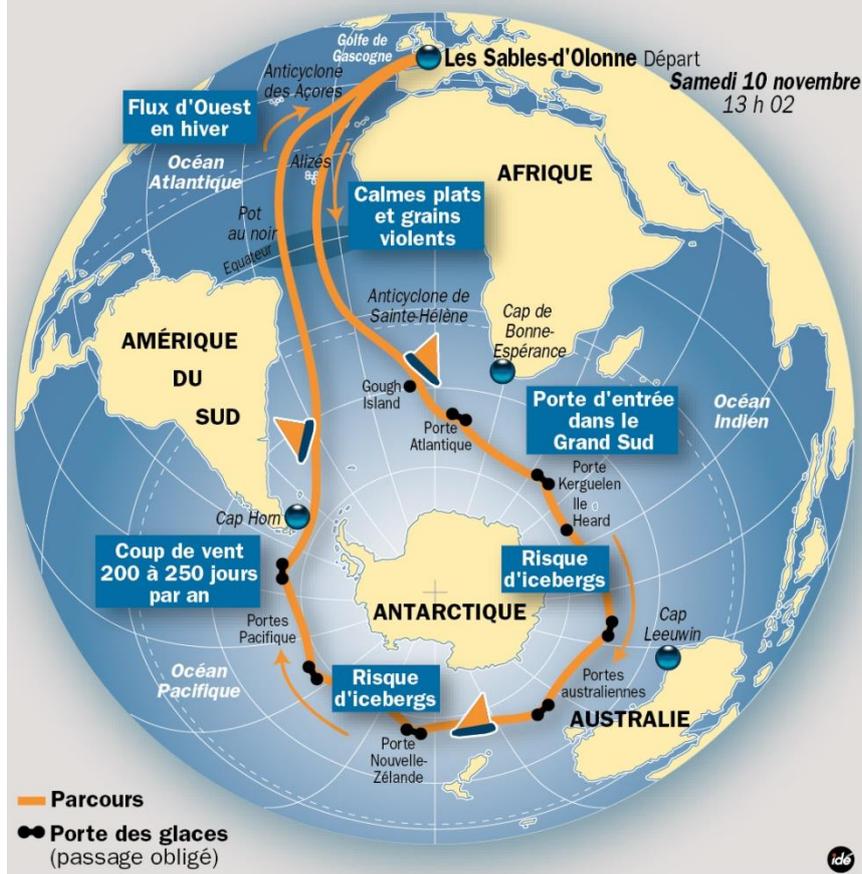


Systemes et Procédés

COMMENT ASSURER L'AUTONOMIE EN ENERGIE ELECTRIQUE D'UN VOILIER ?

Le 10 novembre 2012 a eu lieu le départ du 7^{ème} Vendée Globe, course autour du monde en solitaire sans escale. Pour cette course extrême, 20 skippers se sont élancés des Sables-d'Olonne en Vendée pour 3 à 4 mois de mer.

Le parcours du Vendée Globe



Le tracé du parcours par les 3 grands caps : Bonne Espérance, Leeuwin et Horn

Source : <http://www.rtl.fr/actualites/sport/article/le-vendee-globe-2012-2013-en-chiffres-7754401469>

Les bateaux utilisés sont tous des voiliers monocoques de 60 pieds (18,28 mètres).

Le bateau de Tanguy De Lamotte, un des concurrents :

<http://www.vendeeglobe.org/fr/fiche-skipper/51/tanguy-de-lamotte.html>



Source :

<http://www.vendeeglobe.org/fr/fiche-skipper/51/tanguy-de-lamotte.html>

Architecte : Marc Lombard
Chantier : MAG France
Date de lancement : 1998
Longueur : 18,28 m
Largeur : 5,30 m
Tirant d'eau : 4,50 m
Déplacement (poids) : 9 tonnes
Nombre de dérives : 2
Hauteur mât : 29 m
Voile quille : Acier mécano soudé
Surface de voiles au près : 260 m²
Surface de voiles au portant : 580 m²

Pendant toute la durée de la course, les marins ne peuvent recevoir aucune assistance ni faire escale, sous peine d'abandon ou de disqualification. De telles contraintes entraînent les concurrents à partir en autonomie totale tant du point de vue alimentaire et technique que du point de vue énergétique. Les voiliers se déplacent exclusivement grâce à la force du vent, mais toute une série de matériels embarqués consomment néanmoins de l'énergie électrique. Ces matériels sont par exemple le pilote automatique qui permet au skipper de s'affranchir de longues heures passées à la barre et lui permet de gérer au mieux sa course (manœuvre des voiles, alimentation, repos, tactique...) ou le poste de radio permettant le lien avec la terre et l'équipe météo qui guide le voilier ou encore le système de désalinisation de l'eau de mer.

Jusqu'à il y a peu, l'énergie électrique était fournie exclusivement par un groupe électrogène entraîné par un moteur thermique. Le groupe électrogène permet de charger des batteries qui vont alimenter les différents équipements tout au long de la journée. L'utilisation d'un groupe électrogène entraîne l'utilisation de combustible fossile contribuant à l'effet de serre. De plus, il nécessite d'emporter sur le bateau une quantité importante de ce carburant (quelques centaines de litres), ce qui a pour effet d'augmenter le poids du bateau et donc de réduire les performances, ce qui est préjudiciable dans une course telle que le Vendée Globe.

Depuis quelques années, des équipements faisant appel aux énergies renouvelables sont apparus sur les voiliers. Ainsi, la quasi-totalité d'entre eux sont maintenant équipés de mini-éoliennes (aérogénérateurs), d'hydro-générateurs et de panneaux solaires photovoltaïques qui viennent en complément du groupe électrogène et qui permettent de diminuer les quantités de carburant embarqué.

Lors de la dernière course, certains concurrents ont poussé la logique à l'extrême en se passant de groupe électrogène et n'ont produit de l'énergie électrique qu'à partir de sources d'énergies renouvelables. C'est le cas du skipper espagnol Javier Sansó avec son bateau Acciona 100% EcoPowered (<http://www.vendeeglobe.org/fr/fiche-skipper/39/javier-sanso.html#boat>) construit spécialement pour le Vendée Globe. ACCIONA est une société espagnole spécialisée dans les énergies renouvelables qui sponsorise le bateau de Javier Sansó et lui apporte une maîtrise technique pour atteindre le but recherché. De tels partenariats ont bien sûr un but commercial mais permettent la mise au point de techniques innovantes qui pourront se retrouver à terme sur les voiliers de plaisance ou à terre, dans des sites isolés consommateurs d'énergie électrique mais trop éloignés des lieux de production pour être reliés au réseau électrique.

Voir les vidéos présentant les innovations technologiques sur ce voilier

<http://www.youtube.com/watch?v=VMLrwBodvqY>

et

http://www.dailymotion.com/video/xu9a5e_sanso-en-navigation-sur-acciona-100-ecopowered_sport

et

<http://www.youtube.com/watch?v=XmKJFlnNtw>

De nombreux plaisanciers possèdent des voiliers qui leur permettent de faire des sorties en mer à la journée. Dans ce cas, une série de batteries chargées au départ permet de satisfaire les besoins en énergie électrique pour la sortie en mer. Au retour un simple chargeur de batterie branché sur le réseau du port permet de recharger la batterie et de la maintenir en charge jusqu'à la prochaine sortie.

C'est lorsqu'ils souhaitent effectuer des sorties de plusieurs jours ou des traversées au long cours telle que la traversée de l'Atlantique Nord que les marins sont confrontés aux mêmes problèmes d'énergie que les skippers du Vendée Globe. Les différences fondamentales se situent au niveau du budget qui est beaucoup plus modeste et des contraintes de poids et donc de vitesse qui sont moindres également.

Ronan Gravot est un de ces marins passionné de la mer. D'une formation d'ingénieur en biologie, il a décidé de partir autour du monde en solitaire sur son voilier Idefix de 11m.

Pendant les quatre années passées en mer, il n'a pas fait le tour du monde mais a beaucoup navigué en mer, de la Méditerranée aux Caraïbes en passant par l'Atlantique Nord. Il a été confronté à des choix et a des difficultés



techniques qu'il partage sur le site <http://www.ronan-tourdumonde.com>. C'est à travers son expérience et les données qu'il a aimablement accepté que nous utilisons que nous aborderons le thème de l'énergie électrique sur un voilier. Les chiffres utilisés ci-après sont largement inspirés des données de Ronan Gravot mais ont été parfois adaptées au thème étudié. Son voilier est équipé d'une mini-éolienne et d'un panneau photovoltaïque.

Source : <http://www.ronan-tourdumonde.com>

Besoins en énergie du voilier Idéfix

Ronan Gravot a commencé par estimer ses besoins en énergie électrique en s'intéressant aux consommations de ses différents dispositifs et à leur durée d'utilisation.

Voici les différents postes de consommation d'énergie électrique et leurs durées estimées de fonctionnement :

Equipement	Durée d'utilisation journalière estimée en heures	Puissance en W	Energie en Wh
Feux de navigation	12		
Frigo	4		
Instruments de navigation	24		
Radio	1/4		
Radar	5		
Pilote automatique	24		
Ordinateur	5		
Lumière	5		
Dessalinisateur	1.5		
		Total	

- A l'aide des différents dossiers, estimer les besoins en énergie de Ronan Gravot pour une journée de navigation. On déterminera tout d'abord la puissance de chacun des postes de consommation d'énergie puis l'énergie consommée en Wh.

A. Dimensionnement de la batterie

Suite à ce bilan énergétique, Ronan Gravot a dû dimensionner les batteries de 12 V qu'il a embarquées pour répondre aux besoins en énergie de son voilier. Nous allons déterminer le nombre et le type de batteries à disposer sur le voilier.

1) Première approche

Nous allons d'abord supposer qu'il dispose d'une seule batterie 12V de capacité 100Ah (ampères×heures).

- Quelle est l'énergie disponible dans cette batterie ?
 - Est-elle suffisante pour répondre aux besoins journaliers de navigation ?
 - Quelle devrait être la capacité totale de la batterie pour satisfaire les besoins en énergie du voilier en supposant que la batterie serait totalement déchargée en fin de journée.
 - Si Ronan Gravot utilisait deux batteries de 12 V et de capacité 100Ah chacune, comment devrait-il les brancher pour augmenter l'énergie disponible sur son voilier tout en gardant une tension acceptable pour ses équipements électriques ?
- 2) Une fois déterminée la capacité totale des batteries à embarquer, Ronan Gravot s'est donné une marge de sécurité et a décidé deux choses :
- Les batteries pouvaient ne pas être rechargées pendant deux jours de suite
 - Les batteries ne pouvaient pas admettre un taux de décharge supérieure à 50%
- Pour quelles raisons les batteries pourraient ne pas être rechargées pendant deux jours ?
 - Pourquoi est-il préférable qu'une batterie n'atteigne jamais un taux de décharge de 100% ?
 - En tenant compte des contraintes imposées par Ronan Gravot, en déduire la capacité totale nécessaire embarquée sur le voilier.
 - Sachant que quatre batteries identiques ont finalement été installées sur le voilier, quelles sont celles qui ont été achetées par Ronan Gravot ? Quelle est alors la capacité totale embarquée ?
 - Pourquoi la capacité d'une batterie est-elle donnée pour une température de référence de 20°C ?
 - Pour quelle raison les batteries doivent-elles être stockées dans un endroit aéré ?

B. Sources d'énergie

1) Etude du panneau photovoltaïque

a) Etude documentaire

Ronan Gravot a installé un panneau RDM Solar 12V sur son voilier Idéfix.

- Quelle est la puissance maximale fournie par le panneau ?
- Quelle est l'énergie maximale que pourrait produire un tel panneau avec 8 h d'ensoleillement par jour ?
- Quelle est l'énergie moyenne que peut fournir un tel panneau au printemps en Bretagne.
- Expliquer les différences entre les deux grandeurs précédentes.
- Donner les valeurs de la tension et de l'intensité du courant fournies par le panneau dans les conditions maximales de fonctionnement (100W) pour les deux types de panneaux.
- Outre le critère financier, quel paramètre peut influencer sur le choix d'un panneau monocristallin ou polycristallin ?

Le Vendée Globe est une course autour du monde en solitaire sans escale. Le bateau Acciona 100% EcoPowered construit spécialement pour le Vendée Globe ne produit de l'énergie électrique qu'à partir de sources d'énergies renouvelables. Il dispose d'un système générateur fonctionnant à partir des énergies produites par la mer, le soleil et le vent, sans combustible fossile.

- Quel type de panneaux photovoltaïques est-il préférable d'installer pour ce type de voilier destiné à être autonome en énergie pendant plus de 80 jours ? Justifier votre réponse.



Source : http://www.accionasailing.com/?page_id=7390&lang=fr

b) Etude expérimentale

Dans le cadre de cette étude, nous utiliserons un module photovoltaïque de petit format adapté aux dimensions de nos tables de laboratoire mais dont les caractéristiques électriques ne correspondent pas du tout à celles du panneau RDM Solar.

i. Un convertisseur d'énergie

- Proposer le schéma du montage permettant de mesurer la tension aux bornes du module ainsi que l'intensité du courant qu'il débite s'il est connecté à une résistance de $1k\Omega$.
- Réaliser le montage.



Appeler le professeur pour vérification

- Avec un oscilloscope, visualiser l'allure de la tension délivrée par le module. Quelle est la forme du signal observé ?
- Mesurer les valeurs de la tension et de l'intensité du courant fournies par le module lorsqu'il est complètement dans le noir puis dans la pièce éclairée.
- Commenter en expliquant le type de conversion réalisé par le module.



Appeler le professeur pour validation

ii. Caractéristique électrique

D'un point de vue électrique, les grandeurs caractérisant le module sont la tension disponible à ses bornes, l'intensité du courant qu'il débite et la puissance qu'il peut fournir. Nous chercherons dans cette partie à tracer les graphes permettant de caractériser électriquement le module c'est-à-dire à tracer $U = f(I)$ et $P = f(I)$.

La source lumineuse que nous utiliserons sera une ampoule halogène 12V ; 50W.

- Disposer le module perpendiculairement à la source de lumière et à 60 cm de celle-ci.
- Remplacer la résistance de $1k\Omega$ par une boîte à décade
- En faisant varier R pour une dizaine de valeurs de 0 à $100k\Omega$, relever et tracer $U = f(I)$.



Appeler le professeur pour vérification

- Sur la courbe, déterminer la valeur de la tension en circuit ouvert et la valeur de l'intensité du courant en court-circuit.
- Dans le tableur, calculer la puissance fournie par le module en watt pour les différentes valeurs de résistance.
- Tracer sur le même graphe que précédemment la courbe $P = f(I)$. Commenter.



Appeler le professeur pour vérification

- En vous aidant des graphes précédents, représenter l'allure des caractéristiques électriques que l'on obtiendrait en étudiant le panneau RDM Solar.
- Proposer un protocole permettant de mettre en évidence l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques électriques du module.



Appeler le professeur pour vérification

- Réaliser le protocole puis présenter et commenter les résultats obtenus.

2) Etude de l'éolienne

a) Etude documentaire

i. Fonctionnement d'une éolienne

- Avec un schéma, indiquer les conversions d'énergie réalisées par une éolienne
- Quel type de courant fournit une éolienne ?
- Quel type de courant fournit une batterie ?
- Quel dispositif permet alors de charger une batterie avec une éolienne ?
- L'éolienne Air Breeze Land 200W permet-elle de charger une batterie ? Justifier la réponse.

ii. Influence de la vitesse du vent sur l'éolienne

Ronan Gravot présente dans le dossier éolienne, l'évolution de l'intensité produite par différentes éoliennes en fonction du vent. Pour son voilier, il a fait le choix du modèle WS400.

- A partir de ces données, montrer que la puissance d'une éolienne augmente avec la vitesse du vent.
- Justifier son choix d'éolienne en comparant pour les différentes éoliennes, l'évolution de la puissance fournie en fonction du vent. On supposera que la tension efficace aux bornes de l'éolienne est égale à 12 V

iii. Charge de la batterie par l'éolienne

- En tenant compte des prévisions les plus optimistes faites pour une traversée transatlantique, prévoir l'énergie que peut fournir l'éolienne WS400 pendant une journée.
- Cela couvre-t-il les besoins du voilier en énergie ?
- Pourquoi Ronan Gravot a-t-il fait le choix de compléter son équipement avec des panneaux solaires photovoltaïques ?

b) Etude expérimentale

Dans le cadre de cette étude, nous utiliserons une mini éolienne adaptée aux dimensions de nos tables de laboratoire mais dont les caractéristiques électriques sont évidemment totalement différentes de celles de l'éolienne à bord d'Idéfix.

La source de vent sera réalisée par un « classique » ventilateur placé à une quarantaine de centimètres de l'éolienne.

i. Approche qualitative

- Connecter une résistance de 10Ω directement aux bornes de sortie de l'éolienne.
- Créer du vent avec le ventilateur.
- Comparer le comportement de l'éolienne lorsque la charge électrique est connectée ou pas.
- En déduire une raison expliquant pourquoi une éolienne ne doit jamais tourner à vide.
- Remplacer la résistance de 10Ω par une DEL (Diode Electro Luminescente).
- Observer l'éclairement de la diode en fonction de la vitesse du vent.
- En déduire l'influence de la vitesse du vent sur la puissance électrique fournie par l'éolienne.



Source : <http://stnicolas-col.spip.ac-rouen.fr/spip.php?article76>

ii. Approche quantitative

- Proposer un protocole d'expérience permettant de visualiser la forme du signal électrique délivré par l'éolienne en fonctionnement.



Appeler le professeur pour validation

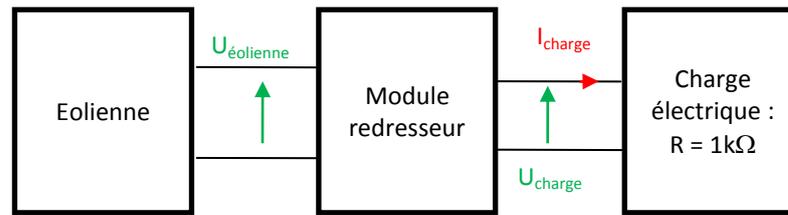
- Observer et relever l'allure du signal électrique délivré par l'éolienne en fonctionnement.
- Préciser toutes les informations qui vous semblent utiles pour caractériser entièrement ce signal (les informations qui permettraient de représenter le même signal sans l'avoir vu).



Appeler le professeur pour vérification

Pour rendre continu le signal électrique délivré par l'éolienne en fonctionnement, on utilise un module « redresseur ». Le signal électrique continu obtenu à la sortie du module permettra de recharger une batterie. Pour simplifier ici, nous remplacerons la batterie par une résistance de $1k\Omega$.

- Préciser la différence de comportement de ces deux dipôles vis-à-vis de l'énergie électrique qu'ils reçoivent.
- Réaliser le montage ci-dessous :



- La charge électrique étant connectée, observer et relever l'allure des tensions U_{charge} et $U_{\text{éolienne}}$. En présence de vent. Le montage redresseur a-t-il correctement joué son rôle ?
- Répéter cette opération pour chacune des vitesses possibles du ventilateur. Commenter l'évolution de l'allure des signaux électriques.
- Compléter le schéma précédant en indiquant l'emplacement des appareils permettant de mesurer la tension U_{charge} et l'intensité du courant I_{charge} .
- Pour chacune des vitesses possibles du ventilateur, relever les valeurs de U_{charge} et I_{charge} ainsi que la fréquence des signaux électriques délivrés par l'éolienne.
- Regrouper ces données dans un tableau pour calculer dans chaque cas la puissance électrique fournie par l'ensemble éolienne plus redresseur à la charge R.
- Comment évolue cette puissance en fonction de la vitesse du vent ?

C. Régulation de la charge de la batterie.

Le panneau solaire et l'éolienne ne peuvent charger la batterie en permanence. Il faut en effet tenir compte de l'état de charge de la batterie. Pour cela, il est nécessaire de mettre en place des régulateurs de charge qui ont des comportements différents suivant la source de production.

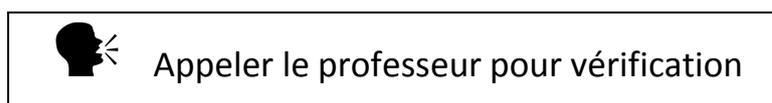
1) Régulation de la charge par le panneau photovoltaïque.

Le système de régulation le plus simple utilisé avec les panneaux solaires est un système de régulation dit Tout Ou Rien.

- En utilisant les termes de la régulation (Mesure, Consigne, Commande) et en identifiant clairement les grandeurs qui leurs sont reliées, expliquer le fonctionnement de ce type de régulation.
 - Est-ce une régulation à un ou deux seuils ?
 - Donner les conditions de charge de la batterie en fonction de la valeur de la tension de la batterie.
 - Un autre type de régulation est mis en place avec un panneau solaire, la régulation type PWM. En quelques mots, donner le principe de cette régulation et l'avantage qu'elle présente sur la régulation Tout Ou Rien.
- #### 2) Régulation de la charge par l'éolienne.
- Expliquer rapidement pourquoi la régulation Tout Ou Rien ne peut pas être mise en œuvre sur une éolienne ?
 - Que se passe-t-il alors lorsque l'éolienne tourne mais que la batterie est chargée ?

D. Alimentation de l'ordinateur portable

- Pour le signal électrique des prises électriques domestiques, EDF donne les caractéristiques suivantes : 230V – 50 Hz. Représenter sur feuille l'allure du signal correspondant.
-



L'ordinateur de Ronan Gravot utilise une alimentation électrique type adaptateur secteur 65W.

- Ronan peut-il connecter son ordinateur sur son système de batteries ? Justifier votre réponse.
- Pour pouvoir alimenter son ordinateur, il place un onduleur Sterling Pro Power S entre la batterie et le PC.
- Quel est le rôle de l'onduleur ?
 - Préciser, parmi les quatre propositions de chronogrammes du document 3 (dossier onduleur), celle correspondant aux signaux électriques en entrée et sortie de l'onduleur.
 - Indiquer clairement le signal qui correspond au signal d'entrée ou à celui de sortie. Justifier votre réponse.
 - Compléter le schéma ci-dessous en indiquant les valeurs manquantes.

