

# CONCOURS GENERAL DES LYCEES

## SESSION 2008

Sciences de l'ingénieur

Durée : 5 heures

*Aucun document n'est autorisé.*

*Le matériel autorisé comprend toutes les calculatrices de poche, y compris les calculatrices programmables alphanumériques ou à écran graphique, à condition que leur fonctionnement soit autonome et qu'il ne soit pas fait usage d'imprimante, conformément à la circulaire n°99-181 du 16 novembre 1999.*

### Paquebots de croisière



#### **Contenu du dossier :**

DOSSIER DES QUESTIONS : 8 pages

DOSSIER DES ANNEXES : 8 pages (Annexe 1 à Annexe 8)

DOSSIER DES REPONSES : 3 pages (DR1 à DR3)

#### **Conseils au candidat :**

Vérifier que vous disposez bien de tous les documents définis dans le sommaire.

La phase d'appropriation d'un système pluritechnique passe par la lecture attentive de l'ensemble du sujet. Il est fortement conseillé de consacrer au moins 40 minutes à cette phase de découverte.

# Paquebots de croisière

## 1. LA PRESENTATION DE L'ETUDE

### 1.1 DE LA TRANSATLANTIQUE AUX CROISIÈRES TOURISTIQUES

Entre la fin du XIX<sup>e</sup> et le début du XX<sup>e</sup> siècle, 34 millions d'Européens quittent leurs pays respectifs à destination des Etats-Unis. La majorité de ces immigrants parvient sur le continent américain à bord de paquebots transatlantiques.



Figure 1 : Le Queen Mary 2

À partir des années 50, le trafic maritime s'essouffle au profit du transport aérien. Le nombre de passagers embarqués sur des paquebots chute d'un million en 1956 à 132 000 en 1973.

Au terme du XX<sup>e</sup> siècle, ce sont les Américains qui impriment un nouvel avenir aux paquebots avec la croisière touristique. Cette évolution marque un tournant dans l'histoire des paquebots, qui se sont peu à peu transformés de moyens de transport en véritables villages de vacances itinérants.

Bousculant les idées reçues, qui sont elles mêmes souvent associées à des tarifs exorbitants et à la fréquentation élitiste et vieillissante, la croisière a beaucoup évolué depuis ces dernières années et demeure une activité touristique parmi les plus prisées.

La croisière en paquebot s'est transformée en une véritable industrie du loisir. Piscines, salles de sports, tennis, mini-golf, théâtres, cafés, salons de restaurants, casinos, discothèques, vidéothèques, cybercafés, cinémas... Autant d'activités et de divertissements proposés aux passagers. Les croisières peuvent être classées en deux grandes catégories :

- Les croisières transatlantiques, présentant des points de départ et d'arrivée différents ;
- Les croisières itinérantes, se déroulant le long d'une boucle, fréquemment situées en Méditerranée ou en mer Baltique.

### 1.2 LE MARCHÉ DE LA CROISIÈRE

Le marché mondial de la croisière a fortement progressé, passant de 300 000 voyageurs en 1970 à plus de 3 millions en 2000, pour atteindre 18 millions en 2005. De fréquentation très majoritairement américaine, avec les deux tiers des passagers, la croisière ne représente qu'1 % du marché du tourisme français, même si ce secteur connaît une forte croissance. Pourtant la tradition des bâtisseurs de « cathédrales flottantes » est grande en France.

### 1.3 LES COMPAGNIES ET LES BATEAUX

Actuellement, quelques 280 paquebots sillonnent les océans et 50 nouveaux bâtiments sont en chantier ou à l'état de projet. Le marché de la croisière est contrôlé par quelques armateurs dont l'américain Carnival, l'américano-norvégien Royal Caribbean Cruise Ltd, la société malaisienne Star Cruises et enfin l'armateur MSC - Mediterranean Shipping Company.

L'évolution du marché de la croisière et la forte progression de la demande ont poussé ces armateurs à s'équiper de nouveaux bateaux, incitant les constructeurs à faire évoluer leurs produits, en termes :

- De capacités d'accueil de plus en plus grandes : on dénombrait environ 750 passagers dès 1970, jusqu'à 4375 en 2006 et on prévoit 6400 places à l'horizon 2009 ;
- De capacités en vitesse et en manœuvrabilité : la diversité des croisières proposées et celle des accès aux escales y contraignent ;
- D'économie d'énergie et de respect de l'environnement : la mise en œuvre de technologies performantes et d'équipements propres s'imposent (gestion des déchets, épuration des eaux, production d'eau douce par osmose inverse, etc.) ;

- D'offres diversifiées de services et loisirs aux vacanciers, en particulier lorsque plusieurs jours séparent deux escales ;
- De grande réactivité des constructeurs aux commandes ; le rythme de production de certains chantiers a été porté à 6 paquebots par an.

#### 1.4 LES PAQUEBOTS QUEEN MARY 2 (CUNARD) ET MUSICA (MSC)

La présente étude porte sur les paquebots *Queen Mary 2* (ou *QM2*) de la société Cunard et *Musica* de la société Meditterrean Shipping Company construits aux chantiers de St-Nazaire, respectivement en 2003 et 2006.



Figure 2a : P.O.D.<sup>1</sup> du *Queen Mary 2*



Figure 2b : Lignes d'arbre et safrans du *Musica*

Les caractéristiques générales de ces paquebots sont fournies en annexe 1 et les situations d'études traitent d'exemples concrets de croisières.

*Par souci de simplification des études, les valeurs mobilisées dans ce sujet diffèrent de la réalité. Cependant, les ordres de grandeur retenus respectent l'authenticité des problèmes posés.*

#### 1.5 EXPRESSION DU BESOIN

La concurrence, entre les différents chantiers navals d'un marché mondial exigeant, impose aux constructeurs de s'adapter aux différents programmes de croisières, qu'elles soient itinérantes ou transatlantiques. Pour cela, ils doivent répondre à différentes contraintes.

Pour l'utilisateur :

- C1.** Offrir une grande palette d'activités de loisirs, d'hôtellerie et d'accueil ;
- C2.** Assurer un confort de navigation optimal et une grande manœuvrabilité sans l'aide de remorqueur ;

Pour l'armateur :

- C3.** Satisfaire aux normes de sécurité (route en zig zag, giration, arrêt d'urgence, redondance des ordres et des organes de manœuvre, etc.) ;
- C4.** Être économe en consommation de fioul ;
- C5.** Optimiser l'espace pour augmenter la surface habitable ;
- C6.** Rendre possible des croisières variées, confortables et économiques.

#### 1.6 PRECISIONS SUR LES UNITES

*Dans la suite du sujet, la vitesse des navires en évolution sera exprimée en nœuds, faisant référence à l'unité marine de mesure de la vitesse, soit un mille à l'heure. Le mille marin international, aussi appelé mille nautique équivaut à 1 852 mètres (première conférence hydrographique en 1929). En usage avec le Système International, il est utilisé en navigation maritime ou aérienne et vaut la longueur initiale d'une minute d'arc terrestre, la 60<sup>e</sup> partie d'un degré.*

<sup>1</sup> P.O.D. : Cf. définition Annexe 2.

## 1.7 APPROPRIATION DE L'ETUDE : IDENTIFICATION DES NAVIRES ETUDIES

**Question 1A :** En référence aux annexes 1 « les croisières touristiques » et 2 « les caractéristiques des paquebots », rédiger une note synthétique, en une dizaine de lignes tout au plus, présentant les caractéristiques essentielles, d'une part d'un point de vue technique (mode de propulsion, performances) et d'autre part en terme d'usage, qui distinguent les deux navires étudiés.

**Question 1B :** Lors de l'étape Lisbonne – Southampton du QM2, d'une distance de l'ordre de 920 milles (annexe 1), calculer en nœuds la vitesse moyenne du navire. Le paquebot Musica permettrait-il de réaliser cette étape à l'identique ?

## 2. LA PROPULSION DU PAQUEBOT MUSICA

L'objet de cette partie est de s'assurer que le dimensionnement de la chaîne propulsive du navire est de nature à répondre à l'attente de l'armateur (client) et lui permettra d'optimiser ses programmes de croisières conformément à sa prévision. Le point de fonctionnement retenu, pour cette validation et dans toute la suite des applications numériques, considère le paquebot Musica évoluant entre Barcelone et Marseille à la vitesse de 13 nœuds (annexe 1). Les éléments caractéristiques de la propulsion des navires sont en annexe 3.

La force propulsive met en mouvement le navire et combat la résistance à l'avancement. Cette résistance à l'avancement est principalement due à la résistance de la carène (forme immergée de la coque du navire) qui est la combinaison de plusieurs phénomènes :

- La résistance due aux frottements ;
- La résistance résiduaire (principalement due aux vagues).

Elle est déterminée soit par calcul, soit par essais en bassin de carène.

**Question 2A :** Déterminer la puissance propulsive totale ( $P_P$ ), puis par hélice ( $P_H$ ) pour une résistance à l'avancement  $F$  égale à 580 kN. Reporter ces valeurs sur le document DR1.

### 2.1 FONCTIONNEMENT DES EFFECTEURS : LES HELICES

Le navire se déplace grâce à la rotation d'hélices à 4 pales, de pas fixe (cas du Musica et du QM2) ou variable. Le principe de propulsion est similaire à celui d'une vis pénétrant dans l'eau, à cette différence près que le vissage s'accompagne d'un glissement permanent. Lorsque la vitesse maximale du bateau est atteinte, les hélices tournent à  $163 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$  et la puissance fournie par chaque moteur est de 17,5 MW.

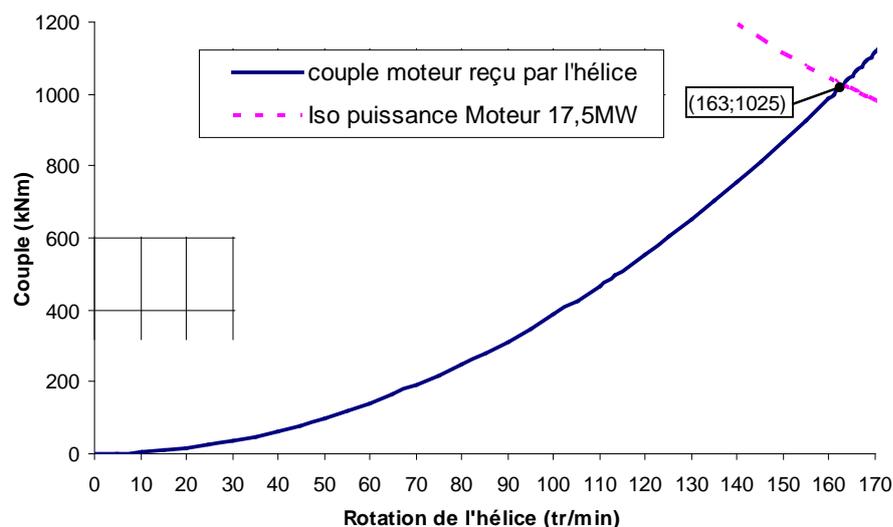


Figure 3 : Caractéristique mécanique d'une ligne d'arbre du Musica

Fonction caractéristique du couple à l'hélice :  $C = k \cdot \omega^2$

$C$  : couple efficace à l'hélice

$\omega$  : fréquence de rotation de l'hélice

$k$  : coefficient caractéristique de l'hélice (lié à sa géométrie)

**Question 2B :** En considérant que la vitesse d'avance du navire est proportionnelle à la fréquence de rotation des hélices, déduire pour une vitesse de 13 noeuds :

- Le couple reçu par une hélice ;
- La puissance  $P_M$  reçue par une hélice ;
- Le rendement hydrodynamique d'une hélice  $\eta_H$ .

Reporter les valeurs de  $P_M$  et  $\eta_H$  sur le document DR1.

## 2.2 TRANSMISSION DE LA PUISSANCE : LES LIGNES D'ARBRE

Chaque ligne d'arbre transmet, d'une part la force propulsive à la structure du navire et d'autre part le couple moteur à l'hélice. La déformation de l'arbre peut être approchée au travers d'un modèle simplifié en considérant deux ressorts en série :

- l'un de compression de raideur unitaire  $k_c = 920.10^6$  N ;
- l'autre de torsion de raideur unitaire  $k_t = 98.10^6$  N.m<sup>2</sup> / rad.

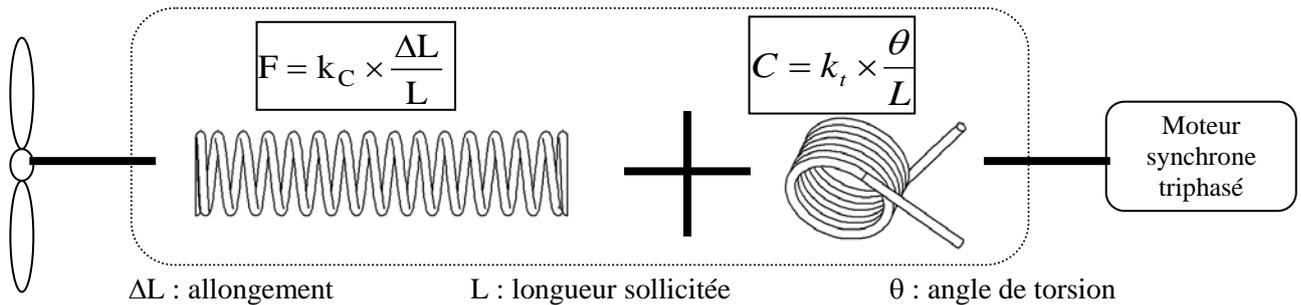


Figure 4 : Modélisation d'une ligne d'arbre du Musica

**Question 2C :** En référence au plan de la ligne d'arbre (annexe 4), préciser les parties de l'arbre sollicitées en compression et/ou en torsion. En déduire les ordres de grandeur du raccourcissement et de l'angle de torsion de la ligne d'arbre.

## 2.3 CONVERSION DE L'ENERGIE : LES MOTEURS

Chaque ligne d'arbre est entraînée en rotation par un moteur électrique synchrone triphasé à 2 stators (cf Annexe 6 "Les moteurs de propulsion"). Le paquebot progressant en situation de croisière à 13 noeuds, les valeurs efficaces des courants et des tensions entre phases relevées sur chaque moteur sont :

- Pour le stator :  $I_{\text{phase}} = 660$  A ;  $U_{\text{phase}} = 1\ 605$  V et  $\cos \varphi = 0,9$  ;
- Pour le rotor :  $U_{\text{rotor}} = 130$  V ;  $I_{\text{rotor}} = 356$  A ;
- température interne moteur = 120°C.

**Question 2D :** Considérant les conditions ci-dessus et les caractéristiques nominales du moteur (plaque signalétique, Annexe 6) :

- Exprimer, puis calculer, les puissances d'entrée reçues par le moteur au niveau de son rotor ( $P_R$ ) et de ses deux stators ( $P_C$ ) ;
- Déterminer alors son rendement de puissance  $\eta_M$  ;
- Compléter les valeurs de  $P_R$ ,  $P_C$  et  $\eta_M$  sur le document réponse DR1 ;
- Calculer les pertes par effet Joule du moteur, puis identifier l'origine et quantifier les autres pertes.

## 2.4 DISTRIBUER L'ENERGIE : LES CONVERTISSEURS

Les moteurs sont alimentés à partir de convertisseurs électroniques de puissance (cf annexe 3 et document-réponse DR2) dont le rendement est évalué à 99%.

**Question 2E :** Compléter la valeur de  $P_{DA}$  sur le document réponse DR1.

## 2.5 ALIMENTER : LES MOTEURS DIESEL ET ALTERNATEURS

Lors de l'étape Barcelone-Marseille, les groupes Diesel-alternateur doivent fournir une puissance estimée à 6,75 MW pour propulser le navire ajoutée aux 8 MW nécessaires à l'hôtellerie et la charge de bord. Pour mettre en évidence l'importance de la contrainte C4, on se place dans deux cas d'étude :

- Cas n°1 : un moteur est utilisé à 100% de sa puissance et le second en complément ;
- Cas n°2 : la puissance est équi-répartie entre les 2 moteurs Diesel.

**Question 2F :** À partir des caractéristiques et performances de la production d'électricité (Annexe 5), calculer la différence de consommation sur une année de navigation ( $\approx 4\,000$  h) entre ces deux cas d'étude et déterminer celui qui répond le mieux à la contrainte C4. (Exprimer les masses de fioul en kg).

## 3. LA PROPULSION DU PAQUEBOT QUEEN MARY 2 : LES P.O.D.<sup>1</sup>

L'objet de cette partie est de s'assurer que le dimensionnement de la chaîne propulsive du navire est de nature à répondre à l'attente de l'armateur (client) et lui autorisera d'optimiser ses programmes de croisières conformément à sa prévision. Le point de fonctionnement retenu, pour cette validation considère le paquebot QM2 évoluant entre Lisbonne et Southampton (annexe 1).

**Question 3A :** Lister les éléments techniques principaux qui diffèrent entre les effecteurs des paquebots QM2 et Musica, et les conséquences que cela implique sur la structure des bateaux en référence à la contrainte C5.

Dans sa phase de retour vers l'Angleterre, le paquebot QM2 parcourt à vitesse sensiblement constante les 920 milles séparant Lisbonne de Southampton en 39 heures.

L'effort propulsif (F) à vitesse maximale ( $V = 30$  nœuds) est de  $3,4 \cdot 10^6$  N. Cet effort est proportionnel au carré de la vitesse du bateau.

**Question 3B :** Déterminer dans cette phase, le taux de charge de la production électrique sachant que :

- la puissance nécessaire à l'hôtellerie et la charge de bord est de 12 MW ;
- la propulsion est répartie uniformément sur les quatre POD ;
- Le rendement de l'ensemble "Convertisseur-Pod-hélice" pour ce point de fonctionnement est estimé à 55%.

**Question 3C :** En référence à l'esprit de la question 2F, proposer une répartition de la production entre chacun des moteurs Diesel et turbines à gaz pour répondre au mieux à la contrainte C4.

**Question 3D :** Caractériser l'effet du doublement de la vitesse, de 15 à 30 nœuds sur la puissance consommée.

**Question 3E :** Justifier alors le choix d'utilisation de turbines à gaz en s'appuyant d'une part sur les caractéristiques (masse et volume) des différents systèmes de production d'énergie et d'autre part sur la réglementation relative à la prévention de la pollution de l'atmosphère par les navires (Annexe 5).

## 4. LA COMMANDE ET LE CONTROLE DE LA VITESSE

L'objet de cette partie est de valider les solutions techniques mises en œuvre par le constructeur pour commander et maîtriser la propulsion du navire Musica, depuis les leviers de commande jusqu'à l'alimentation des moteurs de propulsion.

### 4.1 CONSIGNER LA VITESSE

La commande de vitesse est présentée sur le synoptique en annexe 7.

Le commandant agit sur les deux leviers de vitesse pour imprimer une cadence de 13 nœuds au navire depuis le poste central de la timonerie.

---

<sup>1</sup> P.O.D. : Cf définition Annexe 2

**Question 4A :** Déterminer alors la valeur du signal en sortie des leviers de vitesse, puis la valeur numérique en hexadécimal du mot envoyé par les boîtiers Wago sur le sous réseau.

**Question 4B :** Compléter, sur le tableau du document réponse DR1, la trame Ethernet qui transite sur le réseau, lorsque l'information de consigne provenant du levier poste central, est envoyée au contrôleur de puissance du demi-moteur droit (PEC 3).

#### 4.2 DISTRIBUER L'ENERGIE : LE CONVERTISSEUR

Recevant la consigne issue du levier droit de vitesse, le PEC 3 émet une commande à destination d'un convertisseur. Cette information permet d'ajuster le couple et la fréquence de rotation du demi-moteur concerné (annexe 7).

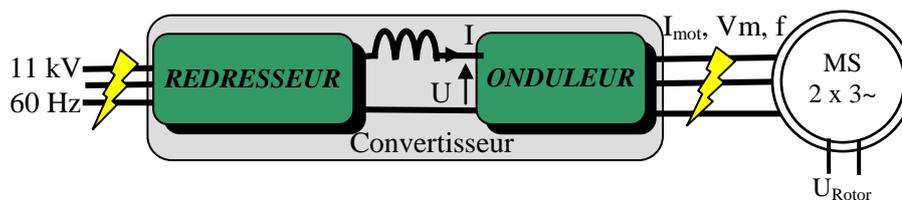


Figure 5 : Alimentation d'un moteur

Un convertisseur se décompose en deux éléments, un redresseur puis un onduleur à thyristors. Le premier redresse le courant alternatif reçu des alternateurs et, associé à une inductance, produit un courant continu  $I$  supposé constant. L'onduleur alimente les enroulements du stator par des courants alternatifs triphasés, de fréquence proportionnelle à la consigne (cf. chronogramme  $V_m$ , Document réponse DR2).

**Question 4C :** Tracer sur le schéma électrique le parcours du courant  $I$  correspondant à l'intervalle repéré  $\textcircled{2}$  du cycle de commande. Puis à partir de l'allure du courant  $I_A$ , compléter les chronogrammes des courants  $I_B$  et  $I_C$  générés par l'onduleur.

**Question 4D :** A partir des formes idéalisées des signaux  $V_A$ ,  $V_B$  et  $V_C$  aux bornes de chacun des enroulements, tracer l'allure de la tension  $U$  à l'entrée de l'onduleur.

**Question 4E :** En référence à l'Annexe 6, déterminer la fréquence  $f_n$  du signal d'alimentation du moteur afin d'obtenir la fréquence de rotation maximale de l'hélice (163 tr/min), puis la fréquence  $f_{13}$  correspondant à une vitesse du Musica de 13 nœuds.

**Question 4F :** La commutation des thyristors provoque des faibles variations du courant dans les enroulements du moteur, et donc une ondulation du couple fourni à la ligne d'arbre. Déterminer la fréquence de celle-ci lorsque le navire se déplace à une vitesse de 13 nœuds. En déduire son effet sur le confort des usagers.

**Question 4G :** Commenter alors l'intérêt d'utiliser une solution technique mobilisant un moteur électrique à deux stators décalés.

## 5. LA GIRATION

Pour réaliser le trajet des différentes étapes ou les manœuvres portuaires, ces deux navires ont besoin d'un système qui leur permet de tenir un cap ou de changer de direction.

L'objet de cette étude est de mettre en évidence, à partir de la comparaison des principes de fonctionnement, les différences de comportement des deux navires lors de la giration.

### 5.1 MODIFIER LA DIRECTION : LES APPAREILS DE GOUVERNE DU MUSICA

Pour modifier le cap d'un bateau, il convient d'exercer une action mécanique sur le safran afin de le faire pivoter autour de sa position neutre. L'action des filets d'eau sur la surface du safran engendre la giration du navire. Le safran se comporte comme une aile, d'une part il doit avoir une vitesse relative par rapport à l'eau, d'autre part il est d'autant plus efficace qu'il est incliné. Lorsque l'angle d'incidence des filets d'eau devient trop important (environ  $35^\circ$ ), le safran « décroche » et perd vite en efficacité.

L'effort hydrodynamique  $F$  exercé par l'eau sur le safran peut se modéliser par une force de direction perpendiculaire à la surface d'écoulement, appliquée au centre de celle-ci et de norme  $F = \rho \times K \times S \times V^2 \times \sin(i)$ .

- Avec :
- $\rho$  : constante dépendante du fluide ;
  - $K$  : constante dépendante de la qualité de l'état de surface de la voilure du safran ;
  - $S$  : surface du safran ;
  - $V$  : vitesse des lignes d'eau en contact avec le safran ;
  - $i$  : angle d'incidence entre le safran et l'axe du navire.

**Question 5A :** Sur la figure 1 du document réponse DR3, représenter graphiquement les actions mécaniques (de l'eau sur l'hélice) qui propulsent le bateau et lui permettent de changer de direction. Préciser également le sens de giration du paquebot.

**Question 5B :** En référence à l'annexe 8, représenter le schéma cinématique du safran à flap<sup>1</sup>.

**Question 5C :** Tracer l'allure de la courbe représentant l'angle d'incidence du flap en fonction de l'angle d'incidence du safran, sans chercher à en déterminer l'équation. Conclure quant à l'intérêt d'utiliser un tel dispositif en référence à un safran traditionnel de surface équivalente.

## 5.2 MODIFIER LA DIRECTION : LES APPAREILS DE GOUVERNE DU QM2

Les effets dynamiques lors de la giration entraînent la gîte<sup>2</sup> (inclinaison) des navires. Cette partie consiste à identifier les différences de comportement des systèmes de gouverne. Pour simplifier notre étude, nous approcherons la forme de la coque du navire **QM2** par un parallélogramme rectangle (voir figures 3 du document DR3) dont les dimensions sont données dans les caractéristiques des navires.

Deux phases distinctes vont être envisagées, l'une lorsque le bateau est à l'arrêt mais avec gîte, l'autre lors de la giration pendant le déplacement.

- Phase 1 : Le paquebot est à l'arrêt. Il gîte de  $5^\circ$  sur bâbord<sup>3</sup>, voir figure 4 du document réponse DR3. Lors de l'inclinaison du navire, le centre de la poussée d'Archimède (volume immergé) se déplace, il ne reste pas sur l'axe de symétrie du navire. Un calcul de géométrie élémentaire montre que le point  $M$  a alors pour coordonnées  $M_5$  ( $x = 18,8$  ;  $y = 4,9$ ).

**Question 5D :** On observe le bateau, alors en phase 1, et on rappelle que sa position d'équilibre initiale situait  $G$  et  $M$  sur une même verticale (figure 3). Placer sur la figure 4 les actions mécaniques en  $G$  et en  $M_5$  et expliquer pourquoi le bateau ne continue pas à se renverser.

**Question 5E :** Calculer au point  $G$  le moment résultant de ces actions et analyser son effet sur le navire.

**Question 5F :** Expliquer la condition géométrique entre les points  $G$  et  $M$  qui permet la stabilité du navire. En déduire la position limite de cette stabilité.

- Phase 2 : Le paquebot est en mouvement. Il gîte sur bâbord lors d'une giration, provoquée par la poussée des deux POD azimutaux orientés à  $30^\circ$ , comme montré sur la figure 4.

**Question 5G :** Sur la figure 4, replacer les actions mécaniques qui font mouvoir le navire. Le moment résultant de ces actions participe-t-il à l'atténuation ou à l'amplification de l'angle de gîte du navire ?

<sup>1</sup> Flap : mot Anglais désignant l'aile orientable.

<sup>2</sup> Gîte : inclinaison transversale d'un navire

<sup>3</sup> Bâbord : côté gauche d'un navire lorsqu'on est placé dans son axe et qu'on regarde vers l'avant.

Les PODS permettent d'avoir une orientation de l'effort propulsif sur 360°. Cette rotation est assurée par quatre moteurs électriques (voir figure 6). Un premier étage de réduction  $K_{\text{étage1}} = 10$  entre la roue et les quatre sorties des moteurs électriques et un deuxième étage sur les moteurs  $K_{\text{étage2}} = 100$  permettent de transmettre la puissance des moteurs électriques au POD.

La rotation du POD impose un système permettant le passage des signaux électriques (alimentation moteur de propulsion et contrôle commande) quelle que soit sa position angulaire.

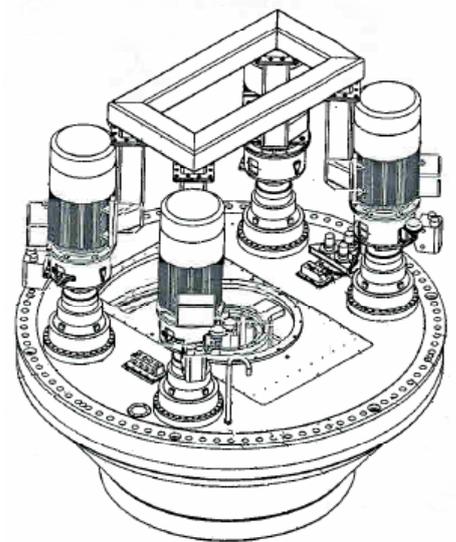


Figure 6 : Rotation d'un POD

**Question 5H :** Sachant que le couple maximum pour entraîner le POD en rotation est de 2 100 kNm, que la vitesse nominale de chaque moteur est de 900 tr/min, déterminer la puissance à fournir aux moteurs électriques de rotation du POD. Les moteurs utilisés ont une puissance unitaire sur l'arbre de 75 kW, justifier cet écart à l'aide des différentes contraintes présentées dans l'introduction du sujet.

**Question 5I :** Indiquer l'ordre de grandeur (en ampères) des différents signaux électriques à véhiculer.

**Question 5J :** Proposer une solution technologique permettant de transmettre toutes les informations issues des capteurs par un nombre minimum de conducteurs.

**Question 5K :** Mettre en place un schéma de principe ou une esquisse permettant au POD de répondre à la contrainte du transfert des signaux électriques sur plusieurs tours.

## 6. SYNTHÈSE

Le Paquebot Millennium, construit en 2000 pour le compte de Celebrity Cruise, a subi en avril 2007 des modifications importantes sur ses moyens de production d'énergie électrique. Un groupe Diesel-alternateur de 11,5 MW est venu s'ajouter aux 2 turbines à gaz d'origine.

Les caractéristiques et performances de ce paquebot (cf tableau ci dessous) sont comparables à celles du MSC Musica.

### Caractéristiques principales du Millénnium

- Longueur : 294 mètres
- Largeur : 32 mètres
- Tonnage : 91 000 tonnes
- Capacité : 1950 passagers / 1019 cabines
- Vitesse : 24 nœuds
- Puissance propulsive : 39 MW (deux pods de 19,5 MW)
- Production électrique : 60 MW à deux TAG (à cogénération)

**Question 6A :** Justifier cette modification sachant que le coût du fioul domestique (MGO) est environ deux fois supérieur au fioul lourd (HDO) et que lors d'un transit à faible vitesse ou pour l'hôtellerie dans un port, la production électrique nécessaire est de l'ordre de 10MW.

## **Dossier des annexes**

Annexe 1 : Les croisières touristiques.

Annexe 2 : Les caractéristiques des paquebots.

Annexe 3 : La propulsion d'un navire.

Annexe 4 : Plan de la ligne d'arbre.

Annexe 5 : Les moyens de production électrique.

Annexe 6 : Les moteurs de propulsion du Musica.

Annexe 7 : Commande de la vitesse.

Annexe 8 : Safran à flap.

## Annexe 1 : Les croisières touristiques

EXEMPLES DE CROISIÈRES TRANSATLANTIQUES		EXEMPLES DE CROISIÈRES ITINÉRANTES																																																																											
New-York / Southampton	Rio / Gênes	Méditerranée QM2	Méditerranée Musica																																																																										
																																																																													
Compagnie: <a href="#">Cunard</a>	Compagnie: <a href="#">MSC</a>	Compagnie: <a href="#">Cunard</a>	Compagnie: <a href="#">MSC</a>																																																																										
Paquebot: <a href="#">Queen Mary 2</a>	Paquebot: <a href="#">Musica</a>	Paquebot: <a href="#">Queen Mary 2</a>	Paquebot: <a href="#">Musica</a>																																																																										
Programme: 7 jours / 6 nuits	Programme: 18 jours / 17 nuits	Programme: 13 jours / 12 nuits	Programme: 8 jours / 7 nuits																																																																										
J1 : Southampton – Départ : 18.00 J2 : En mer J3 : En mer J4 : En mer J5 : En mer J6 : En mer J7 : New York – Arrivée : 7.30	<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%;">J1 : Rio de Janeiro</td> <td style="width: 50%;">Départ : 19.00</td> </tr> <tr> <td>J2 : Buzios</td> <td>07.00 - 17.00</td> </tr> <tr> <td>J3 : En mer</td> <td></td> </tr> <tr> <td>J4 : Salvador de Bahia</td> <td>08.00 -</td> </tr> <tr> <td>J5 : Salvador de Bahia</td> <td>- 12.00</td> </tr> <tr> <td>J6 : Recife</td> <td>08.00 - 13.00</td> </tr> <tr> <td>J7, J8, J9 : En mer</td> <td></td> </tr> <tr> <td>J10 : Mindelo</td> <td>13.00 - 19.00</td> </tr> <tr> <td>J11, J12 : En mer</td> <td></td> </tr> <tr> <td>J13 : Arrecife</td> <td>08.00 - 17.00</td> </tr> <tr> <td>J14 : Agadir</td> <td>08.00 - 13.00</td> </tr> <tr> <td>J15 : En mer</td> <td></td> </tr> <tr> <td>J16 : Valence</td> <td>12.00 - 19.00</td> </tr> <tr> <td>J17 : Barcelone</td> <td>07.00 - 12.00</td> </tr> <tr> <td>J18 : Gênes</td> <td>Arrivée : 10.00</td> </tr> </table>	J1 : Rio de Janeiro	Départ : 19.00	J2 : Buzios	07.00 - 17.00	J3 : En mer		J4 : Salvador de Bahia	08.00 -	J5 : Salvador de Bahia	- 12.00	J6 : Recife	08.00 - 13.00	J7, J8, J9 : En mer		J10 : Mindelo	13.00 - 19.00	J11, J12 : En mer		J13 : Arrecife	08.00 - 17.00	J14 : Agadir	08.00 - 13.00	J15 : En mer		J16 : Valence	12.00 - 19.00	J17 : Barcelone	07.00 - 12.00	J18 : Gênes	Arrivée : 10.00	<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%;">J1 : Southampton</td> <td style="width: 50%;">Départ:17:00</td> </tr> <tr> <td>J2 : En mer</td> <td></td> </tr> <tr> <td>J3 : Vigo</td> <td>08:00 - 16:00</td> </tr> <tr> <td>J4 : En mer</td> <td></td> </tr> <tr> <td>J5 : Barcelone</td> <td>09:00 - 18:00</td> </tr> <tr> <td>J6 : Marseille</td> <td>07:00 - 17:00</td> </tr> <tr> <td>J7 : Civitavecchia</td> <td>07:00 - 19:00</td> </tr> <tr> <td>J8 : Naples</td> <td>07:00 - 18:30</td> </tr> <tr> <td>J9 : En mer</td> <td></td> </tr> <tr> <td>J10 : Gibraltar</td> <td>09:00 - 17:00</td> </tr> <tr> <td>J11 : Lisbonne</td> <td>07:00 - 16:00</td> </tr> <tr> <td>J12 : En mer</td> <td></td> </tr> <tr> <td>J13 : Southampton</td> <td>Arrivée: 07:00</td> </tr> </table>	J1 : Southampton	Départ:17:00	J2 : En mer		J3 : Vigo	08:00 - 16:00	J4 : En mer		J5 : Barcelone	09:00 - 18:00	J6 : Marseille	07:00 - 17:00	J7 : Civitavecchia	07:00 - 19:00	J8 : Naples	07:00 - 18:30	J9 : En mer		J10 : Gibraltar	09:00 - 17:00	J11 : Lisbonne	07:00 - 16:00	J12 : En mer		J13 : Southampton	Arrivée: 07:00	<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%;">J1 : Marseille</td> <td style="width: 50%;">Départ : 19:00</td> </tr> <tr> <td>J2 : Gênes</td> <td>09:00 - 17:00</td> </tr> <tr> <td>J3 : Naples</td> <td>12:00 - 19:00</td> </tr> <tr> <td>J4 : Palerme</td> <td>07:00 - 18:00</td> </tr> <tr> <td>J5 : Tunis</td> <td>08:00 - 13:00</td> </tr> <tr> <td>J6 : Palma de Mallor...</td> <td>14:00 -</td> </tr> <tr> <td>J7 : Palma de Mallor...</td> <td>- 01:00</td> </tr> <tr> <td>Barcelone</td> <td>09:00 - 19:00</td> </tr> <tr> <td>J8 : Marseille</td> <td>Arrivée:08:00</td> </tr> </table>	J1 : Marseille	Départ : 19:00	J2 : Gênes	09:00 - 17:00	J3 : Naples	12:00 - 19:00	J4 : Palerme	07:00 - 18:00	J5 : Tunis	08:00 - 13:00	J6 : Palma de Mallor...	14:00 -	J7 : Palma de Mallor...	- 01:00	Barcelone	09:00 - 19:00	J8 : Marseille	Arrivée:08:00
J1 : Rio de Janeiro	Départ : 19.00																																																																												
J2 : Buzios	07.00 - 17.00																																																																												
J3 : En mer																																																																													
J4 : Salvador de Bahia	08.00 -																																																																												
J5 : Salvador de Bahia	- 12.00																																																																												
J6 : Recife	08.00 - 13.00																																																																												
J7, J8, J9 : En mer																																																																													
J10 : Mindelo	13.00 - 19.00																																																																												
J11, J12 : En mer																																																																													
J13 : Arrecife	08.00 - 17.00																																																																												
J14 : Agadir	08.00 - 13.00																																																																												
J15 : En mer																																																																													
J16 : Valence	12.00 - 19.00																																																																												
J17 : Barcelone	07.00 - 12.00																																																																												
J18 : Gênes	Arrivée : 10.00																																																																												
J1 : Southampton	Départ:17:00																																																																												
J2 : En mer																																																																													
J3 : Vigo	08:00 - 16:00																																																																												
J4 : En mer																																																																													
J5 : Barcelone	09:00 - 18:00																																																																												
J6 : Marseille	07:00 - 17:00																																																																												
J7 : Civitavecchia	07:00 - 19:00																																																																												
J8 : Naples	07:00 - 18:30																																																																												
J9 : En mer																																																																													
J10 : Gibraltar	09:00 - 17:00																																																																												
J11 : Lisbonne	07:00 - 16:00																																																																												
J12 : En mer																																																																													
J13 : Southampton	Arrivée: 07:00																																																																												
J1 : Marseille	Départ : 19:00																																																																												
J2 : Gênes	09:00 - 17:00																																																																												
J3 : Naples	12:00 - 19:00																																																																												
J4 : Palerme	07:00 - 18:00																																																																												
J5 : Tunis	08:00 - 13:00																																																																												
J6 : Palma de Mallor...	14:00 -																																																																												
J7 : Palma de Mallor...	- 01:00																																																																												
Barcelone	09:00 - 19:00																																																																												
J8 : Marseille	Arrivée:08:00																																																																												

## Annexe 2 : Les caractéristiques des paquebots

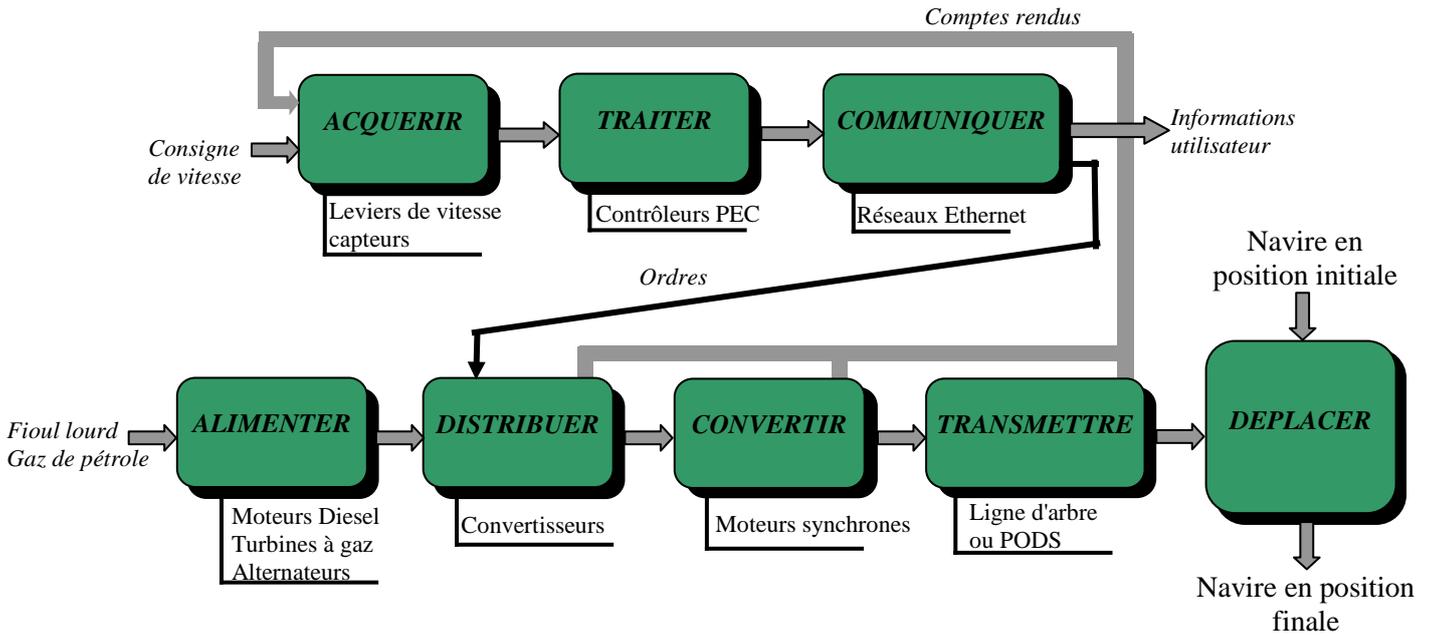
	<b>Musica</b>	<b>Queen Mary 2 (QM2)</b>
Armateur	MSC (Mediterranean Shipping Company)	Cunard Line
Pavillon	Panama	Britannique
Constructeur	Alstom Marine / Chantiers de l'Atlantique / [Aker Yards]	
Livraison	Juin 2006	Décembre 2003
Longueur	294 mètres	345 mètres / 1132 pieds (4 terrains de football)
Largeur	32,2 mètres	41 mètres / 135 pieds
Tirant d'eau en charge	7,70 mètres	10 mètres / 32 pieds 10 pouces
Tonnage (jauge)	89 600 tonnes	150 000 tonnes
Stabilisateurs	2	2
Vitesse maximum	23 nœuds <sup>(1)</sup>	30 nœuds <sup>(1)</sup>
Puissance propulsive	35 MW (MW : 1 Megawatt = 10 <sup>6</sup> W)	86 MW
Type de propulsion	Electrique à 2 lignes d'arbre 	4 POD <sup>(2)</sup> (2 azimutaux + 2 fixes) 
Type de gouverne	2 safrans à flap (aileron)	2 POD azimutaux
Production électrique	56 MW 5 moteurs Diesel-électrique (11,2 MW)	116 MW 2 turbines à gaz (TAG) (25MW) 4 moteurs Diesel-électrique (16,4 MW)
Passagers / Cabines	2550 à 3013 / 1275	2 620 à 3090 / 1310
Personnel	987	1 253
Nombre de ponts	13	15
Surface locaux publics	22 000 m <sup>2</sup>	26 800 m <sup>2</sup>
Ratio m <sup>2</sup> /passager	7,3 à 8,6	8,7 à 10,2
Services à bord	4 restaurants, 9 bars-salon, théâtre (1240 places), 4 piscines et bains à remous, 2 saunas, 2 hammams, piste de jogging, mini-golf, court de tennis, discothèque, club enfants, yoga, solarium, etc.	20 restaurants, bars-salon, théâtre (1094 places), 5 piscines, 8 jacuzzis, thalassothérapie, piste de jogging, planétarium, casino, cinéma de plein air, etc.

<sup>1</sup> Nœud : unité marine de mesure de la vitesse, soit un mille à l'heure. Le mille marin international, aussi appelé mille nautique équivaut à 1 852 mètres (première conférence hydrographique en 1929). En usage avec le Système International, il est utilisé en navigation maritime ou aérienne et vaut la longueur initiale d'une minute d'arc terrestre, la 60e partie d'un degré.

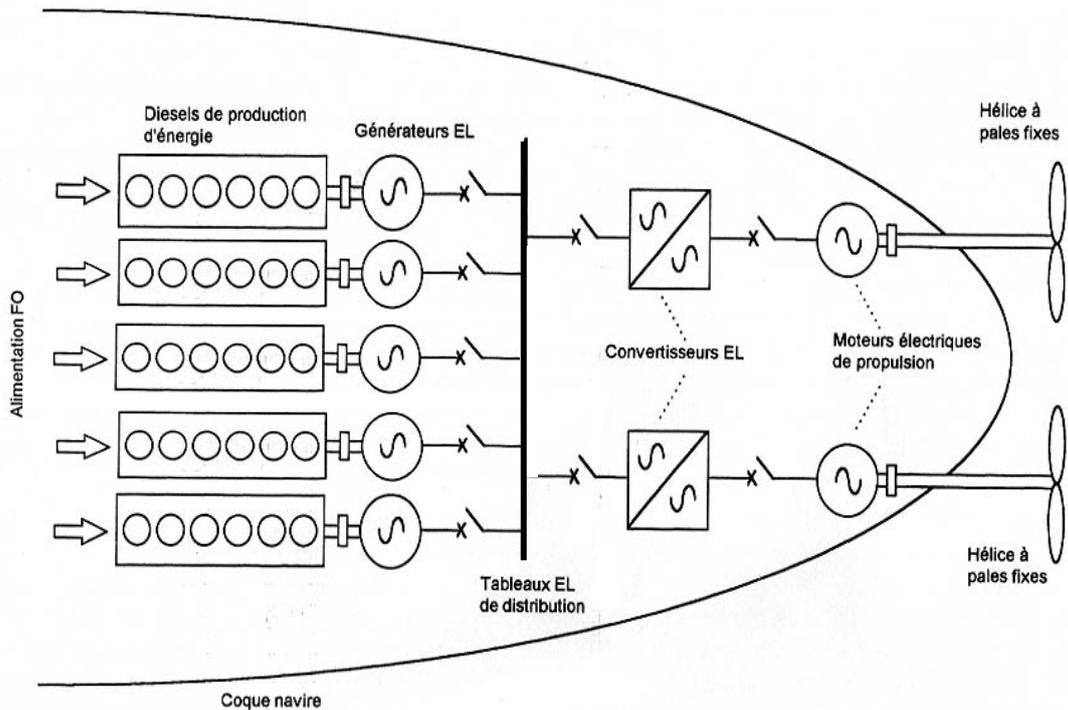
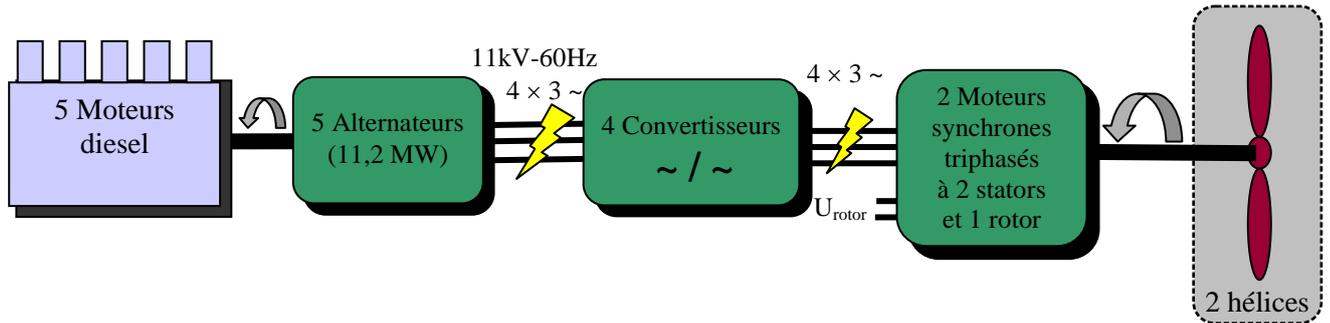
<sup>2</sup> POD (Propulsion Orientation Direction) : nacelle orientable installée sous la coque d'un navire. Equipée du moteur de propulsion et d'une ou deux hélices, elle assure à elle seule l'avance et la gouverne du navire.

# Annexe 3 : La propulsion des navires

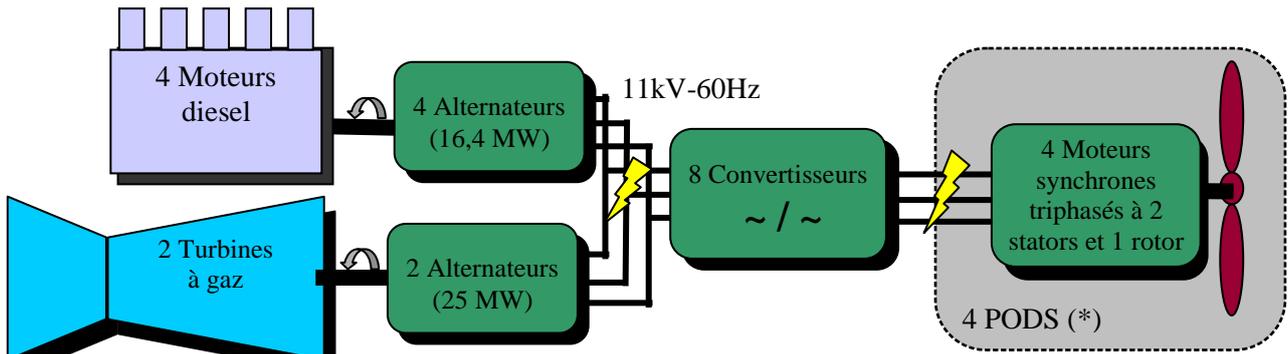
## 1. LES CHAINES FONCTIONNELLES



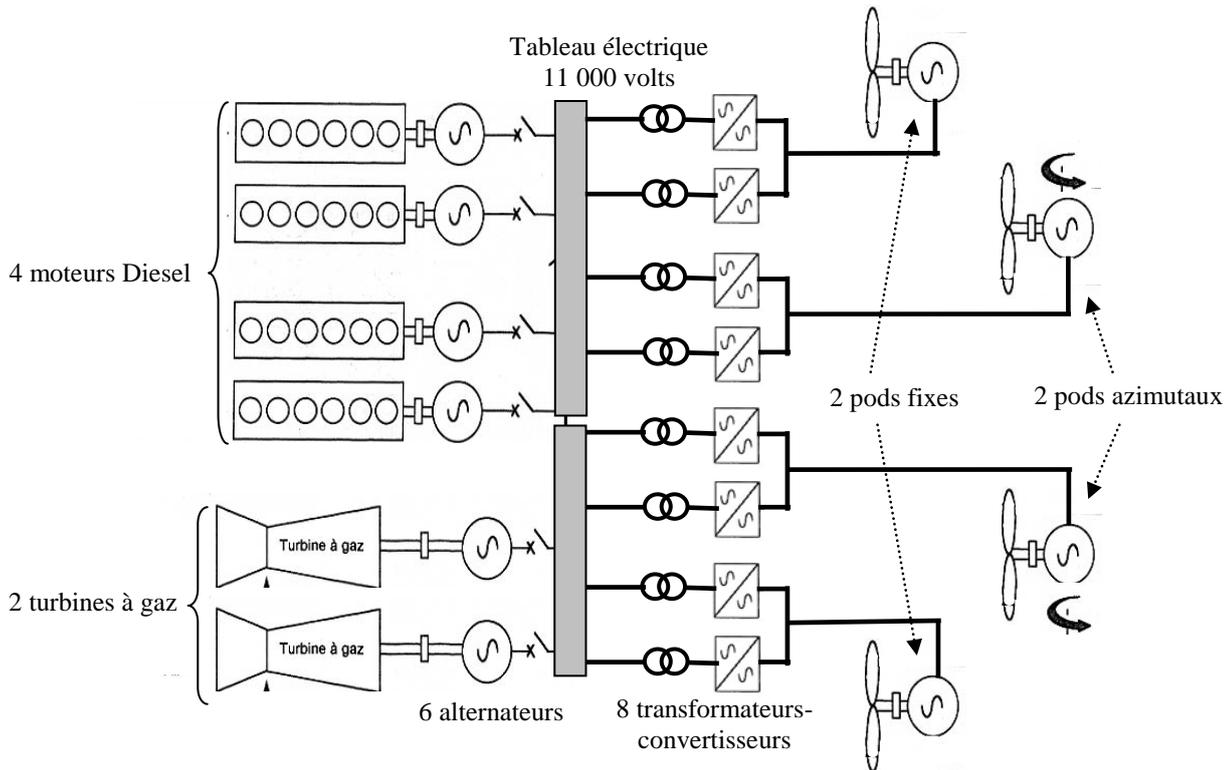
## 2. LA PROPULSION DU PAQUEBOT MUSICA



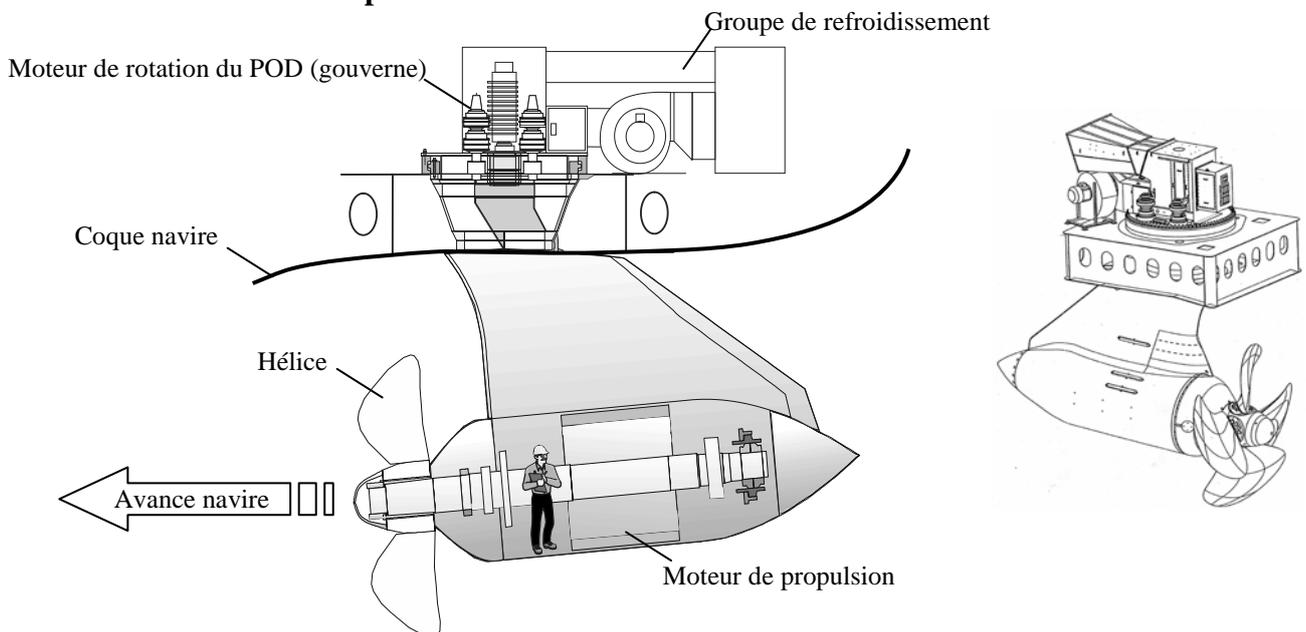
### 3. LA PROPULSION DU PAQUEBOT QM2



(\*)POD : Propulsion Orientation Direction



#### Implantation d'un POD





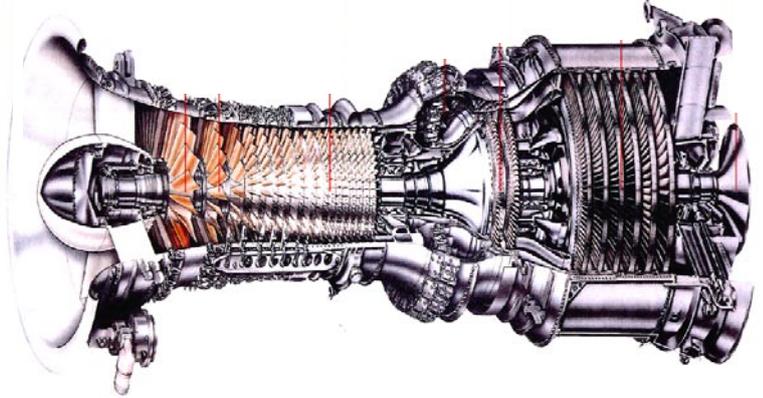
## Annexe 5 : Les moyens de production électrique

L'énergie électrique d'un navire est produite à partir d'alternateurs couplés à des moteurs Diesel ou des turbines à gaz.

### 1. LES MOTEURS DIESEL



### 2. LES TURBINES A GAZ



C'est un réacteur d'avion dans lequel on a transformé la poussée horizontale qui propulse l'aéronef en un mouvement rotatif qui entraîne un alternateur.

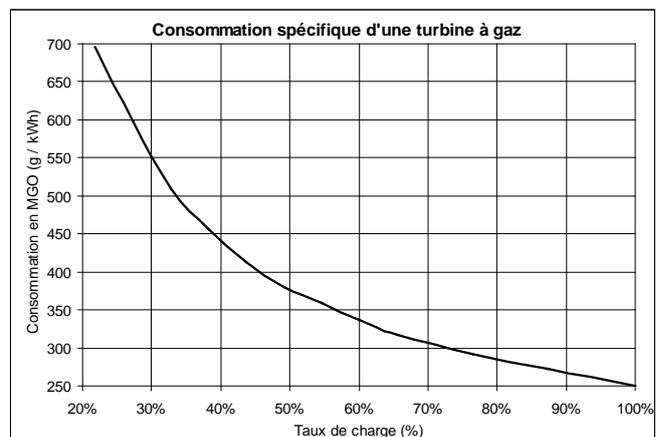
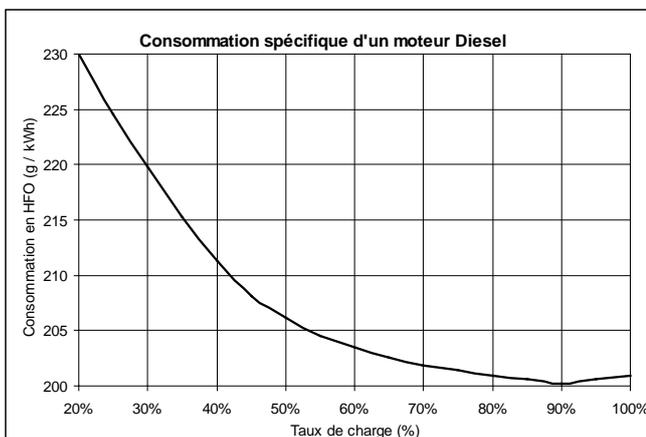
### 3. CARACTERISTIQUES

	Moteur Diesel	Turbine à gaz
Carburant	Fioul lourd (HFO)	Fioul domestique (MGO)
Masse spécifique	20 t / MW	0,8 t / MW
Volume spécifique	26 m <sup>3</sup> / MW	2,6 m <sup>3</sup> / MW
Fréquence de rotation	514 tr / min	3600 tr / min
Consommation spécifique (à 100%)	≈ 200 g / kWh	250 g / kWh

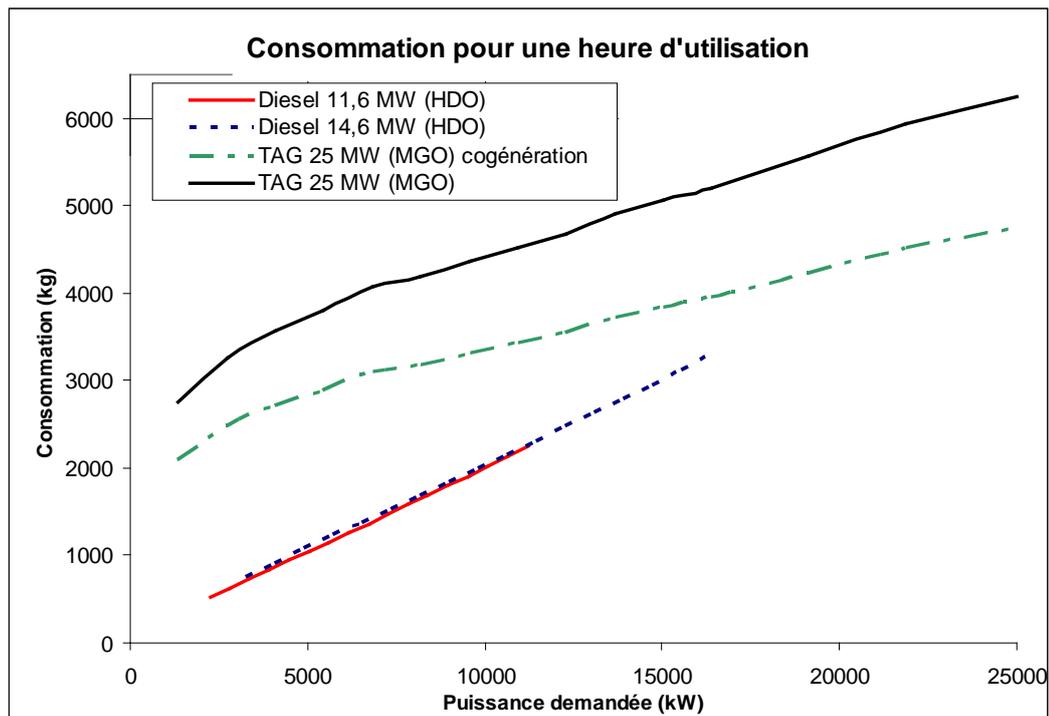
### 4. CONSOMMATIONS SPECIFIQUES

C'est la consommation d'un moteur en fonction de la puissance développée et de la durée pendant laquelle cette puissance est développée. Elle s'exprime en g / kw.h

Ex : un moteur Diesel de 11,2 MW utilisé à 30% consommera  $11,2 \cdot 10^6 \cdot 0,3 \cdot 0,22 \approx 740$  kg de fioul lourd par heure.



## 5. CONSOMMATION HORAIRE EN FONCTION DE LA PUISSANCE DEMANDEE



## 6. EXTRAITS DE LA REGLEMENTATION RELATIVE A LA PREVENTION DE LA POLLUTION DE L'ATMOSPHERE PAR LES NAVIRES (ANNEXE VI MARPOL 73/78, JOURNAL OFFICIEL DU 13 JUN 2006)

### Article 213-6.12 : Substances qui appauvrissent la couche d'ozone

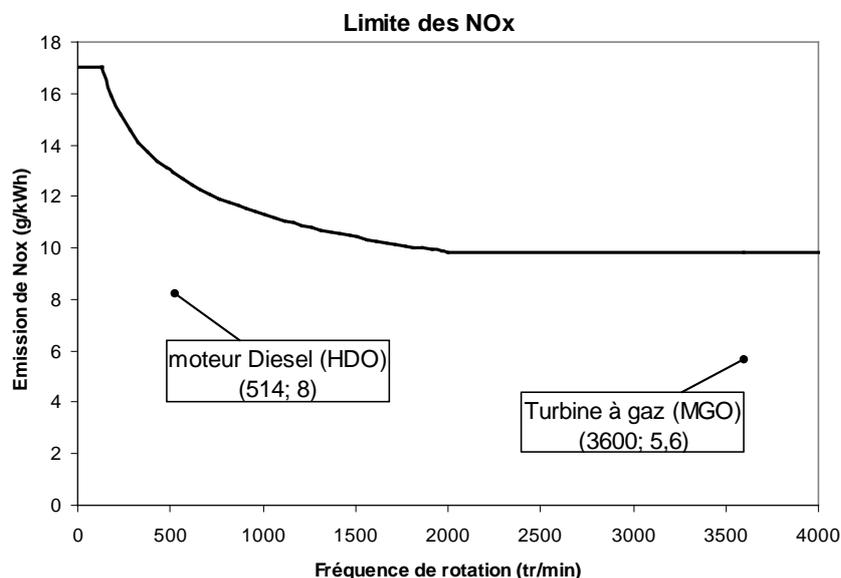
Sous réserve des dispositions de l'article 213-6.03, toute émission délibérée de substances qui appauvrissent la couche d'ozone est interdite.

### Article 213-6.13 : Oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>)

Il est interdit de faire fonctionner un moteur Diesel auquel s'applique le présent article lorsque la quantité d'oxydes d'azote émise par le moteur (calculée comme étant l'émission totale pondérée de NO<sub>2</sub>) dépasse les limites suivantes :

- 17,0 g / kWh lorsque n est inférieur à 130 tr/min ;
- $45,0 \cdot n^{-0,2}$  g / kWh lorsque n est égal ou supérieur à 130 tr/ min mais inférieur à 2000 tr/ min ;
- 9,8 g / kWh lorsque n est égal ou supérieur à 2000 tr/ min ; n représentant le régime nominal du moteur

## 7. SITUATION DES MOTEURS DIESEL ET TURBINES A GAZ UTILISES PAR RAPPORT A LA REGLEMENTATION.



## Annexe 6 : Les moteurs de propulsion du Musica

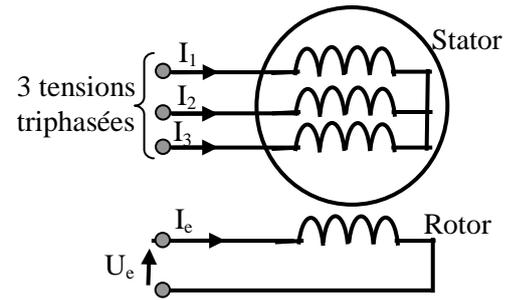
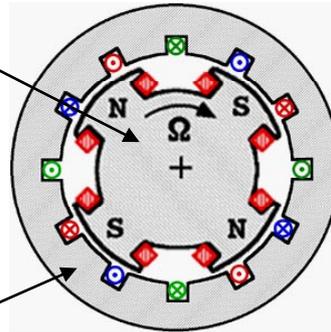
### 1. LE MOTEUR SYNCHRONE (PRINCIPE)

Le rotor constitué d'un enroulement parcouru par un courant d'excitation continu  $I_e$ , crée un champ magnétique  $2p$  polaire. Il possède " $p$ " paires de pôles. (ici  $p=2$ ).

Le stator constitué de trois enroulements triphasés alimentés sous une tension de fréquence  $f$  génère un champ magnétique tournant qui provoque la rotation du rotor à une fréquence de rotation :

$$n = \frac{f}{p}, \text{ avec } n \text{ en tr/s et } f \text{ en Hz.}$$

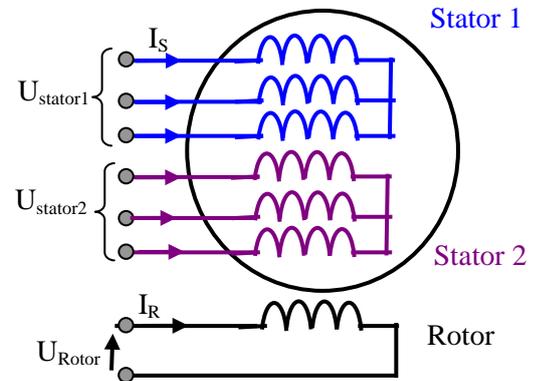
Lorsque le moteur synchrone est piloté par un convertisseur de fréquence, l'ensemble se comporte comme un moteur à courant continu.



### 2. LES CARACTERISTIQUES D'UN MOTEUR DU MUSICA

Chacun des deux moteurs de propulsion du Musica a la particularité de disposer de 2 enroulements statoriques (Stator 1 et Stator 2) isolés entre eux et décalés de  $30^\circ$  électriques. Il se comporte alors comme un ensemble de 2 moteurs "imbriqués".

Le rotor de 14 pôles est entraîné en rotation sous l'effet du champ magnétique généré par ces 2 enroulements.



### 3. LA PLAQUE SIGNALÉTIQUE

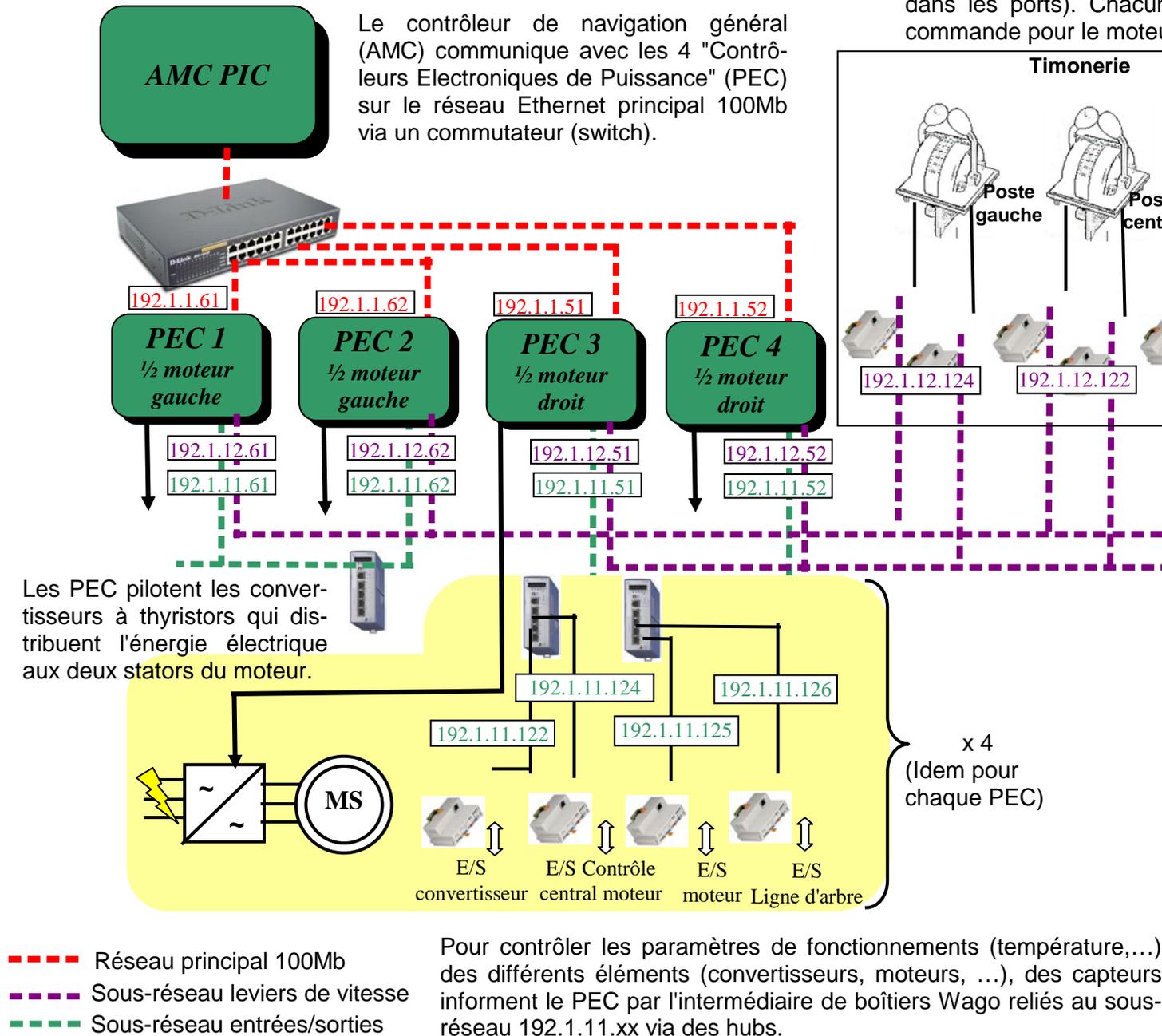
MOTEUR SYNCHRONE		SYNCHRONOUS MOTOR	
Typ.M3HXD300-160/14	N° 943AD0 (1)	2005	
2 x 8750 kW	cos φ 0.90	163 rpm	
IC 8A6W7	IM 7315	IP 56/44	IEC + BV
Stat U 2x2840V	I 2x2025 A	3 ~	30° Cl F R0°C 0,007Ω
Rot .EAS98-19/6	UR 215 V	IR 507 A	Cl F R0°C 0,265Ω
Temp. water < 36 °C	amb. < 50 °C	S1	F19.017Hz M 126000 kg
N° D'AGREMENT BV / BV TEST N° (2)			

Loi de variation de la résistance du cuivre en fonction de la température  $\theta$  ( $^\circ\text{C}$ ) :

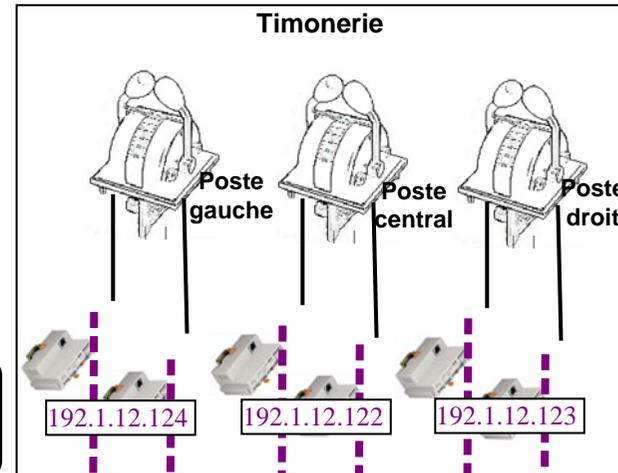
$$R_\theta = R_0 \times (1 + \alpha \times \theta)$$

avec  $\alpha = 4,1 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

## Annexe 7 : Commande de la vitesse (extrait)



Pour commander la vitesse du navire, le commandant agit sur l'un des leviers de vitesse disposés à trois endroits de la timonerie (poste central ou postes déportés bâbord et tribord lors des manœuvres dans les ports). Chacun des trois blocs est équipé d'un levier de commande pour le moteur gauche et d'un levier pour le moteur droit.



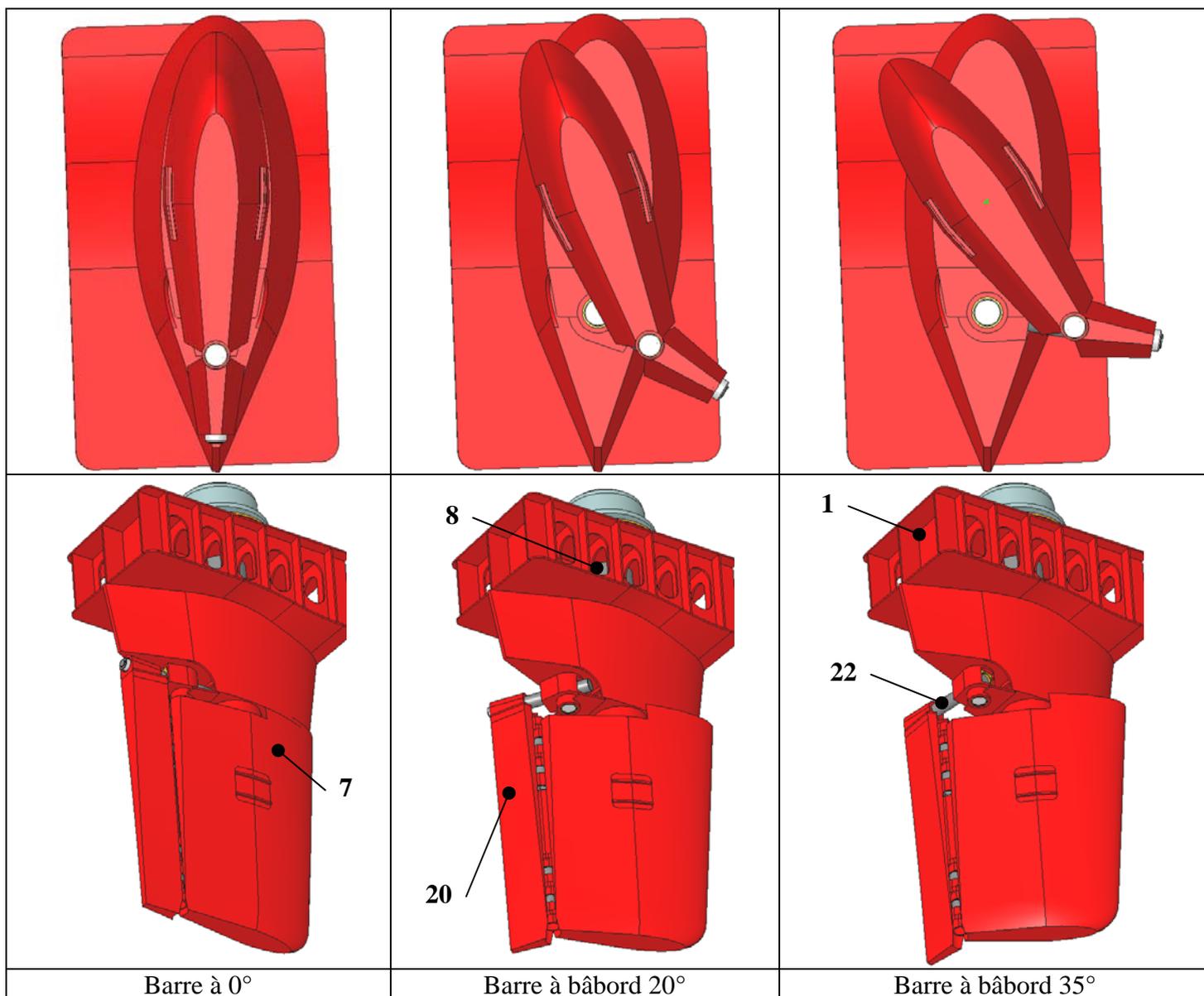
Chaque levier fournit à un bornier intelligent Wago un signal continu [4-20 mA] proportionnel à la vitesse désirée [0-23 nœuds].

Le bornier convertit ce signal en un mot de 15 bits, et l'envoie aux deux PEC du moteur à commander par l'intermédiaire d'un concentrateur (hub) sur le sous-réseau Ethernet 10Mb.

Table de correspondance pour le PEC 3

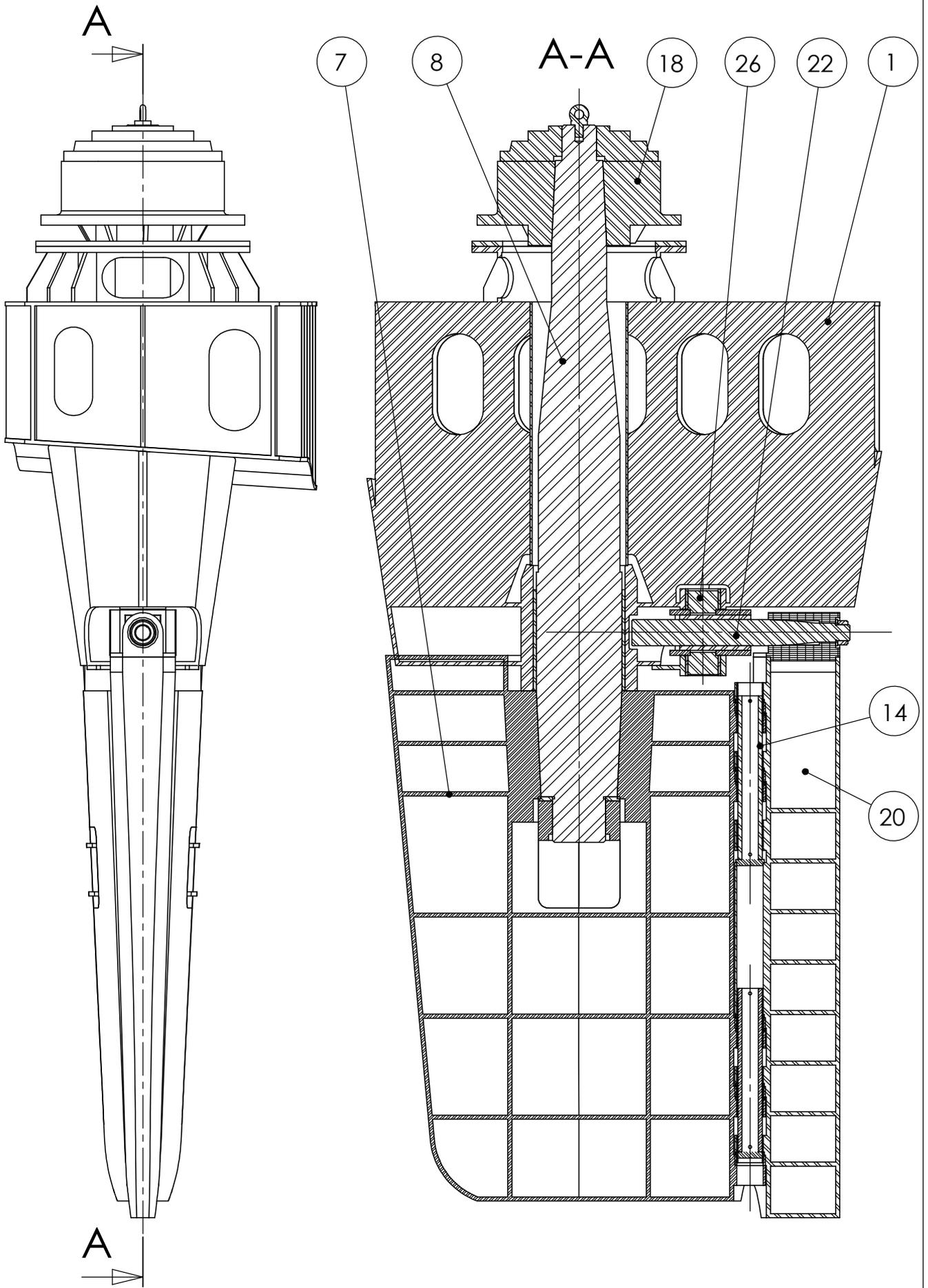
Adresses IP	Adresses MAC (matérielles)
192.1.1.51	03-00-4A-F2-47-10
192.1.12.51	03-00-4A-60-84-F5
192.1.12.122	07-1C-D2-FD-5A-C0
192.1.12.123	07-1C-D2-15-B1-84
192.1.12.124	07-1C-D2-15-05-D0
192.1.11.51	03-00-4A-27-06-22
192.1.11.122	07-1C-D2-62-74-2F
192.1.11.124	07-1C-D2-53-57-C8
192.1.11.125	07-1C-D2-5E-10-A4
192.1.11.126	07-1C-D2-01-6D-F1

## Annexe 8 : SAFRAN à FLAP<sup>1</sup>



REP	NBR	DESIGNATION
1	1	Coque
7	1	Safran
8	1	Mèche
14	2	Axe volet
18	1	Cône mèche
20	1	Flap
22	1	Coulisseau
26	2	Tourillon

<sup>1</sup> Flap : mot Anglais désignant l'aileron orientable.



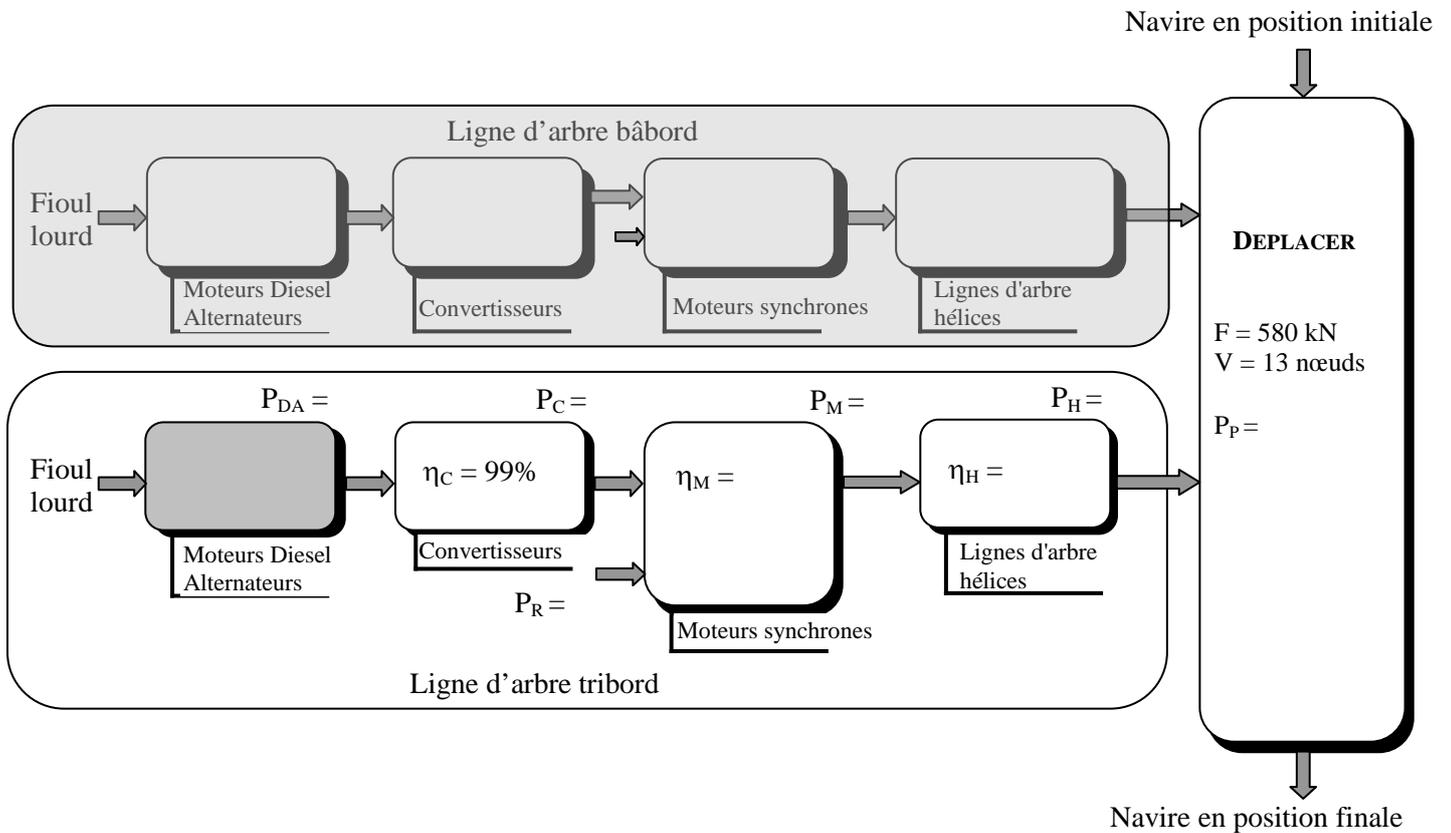
Annexe 8

Echelle : 1 : 50

SAFRAN à FLAP

# Document réponse DR1

## 1 BILAN ENERGETIQUE DE LA PROPULSION LORSQUE LE NAVIRE MUSICA CROISE A UNE VITESSE DE 13 NŒUDS

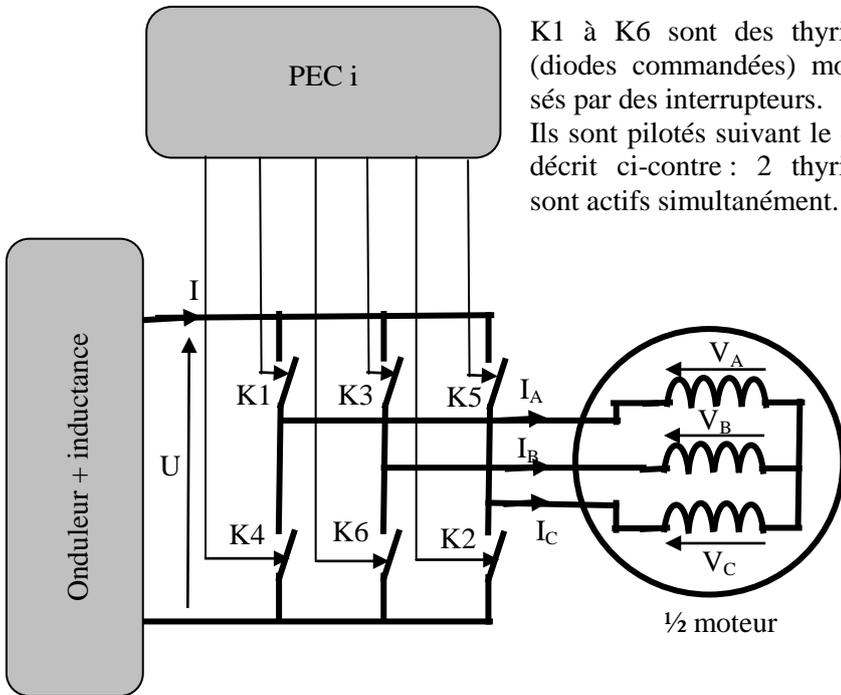


## 2 ENVOI DE LA CONSIGNE VITESSE A PARTIR DU LEVIER DE COMMANDE, VIA LE SOUS-RESEAU ETHERNET

Préambule	Adresse destination @MAC	Adresse source @MAC	Type / longueur	Données + PAD	FCS
8 octets	6 octets	6 octets	2 octets	46-1500 octets	4 octets
AAAAXXXAB	-----	-----	0806	XXX ___ XXX	XXXX

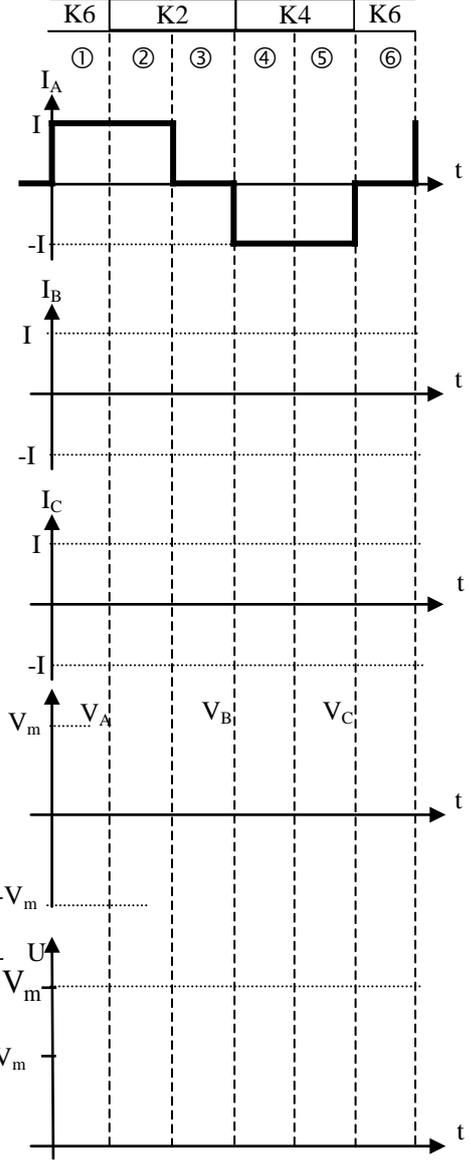
# Document réponse DR2

## LE CONVERTISSEUR



K1 à K6 sont des thyristors (diodes commandées) modélisés par des interrupteurs. Ils sont pilotés suivant le cycle décrit ci-contre : 2 thyristors sont actifs simultanément.

Cycle de commande des thyristors					
K1	K3		K5		
K6	K2	K4	K6		



La tension  $U$ , issue du convertisseur est supposée égale à :

- $V_A - V_C$  lorsque les thyristors K1 et K2 sont conducteurs ;
- $V_B - V_C$  lorsque les thyristors K3 et K2 sont conducteurs ;
- etc ...

# Document réponse DR3

## Question 5A

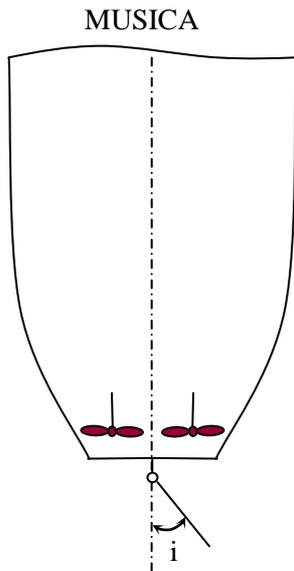


Figure 1 : Les appareils de gouverne du Musica

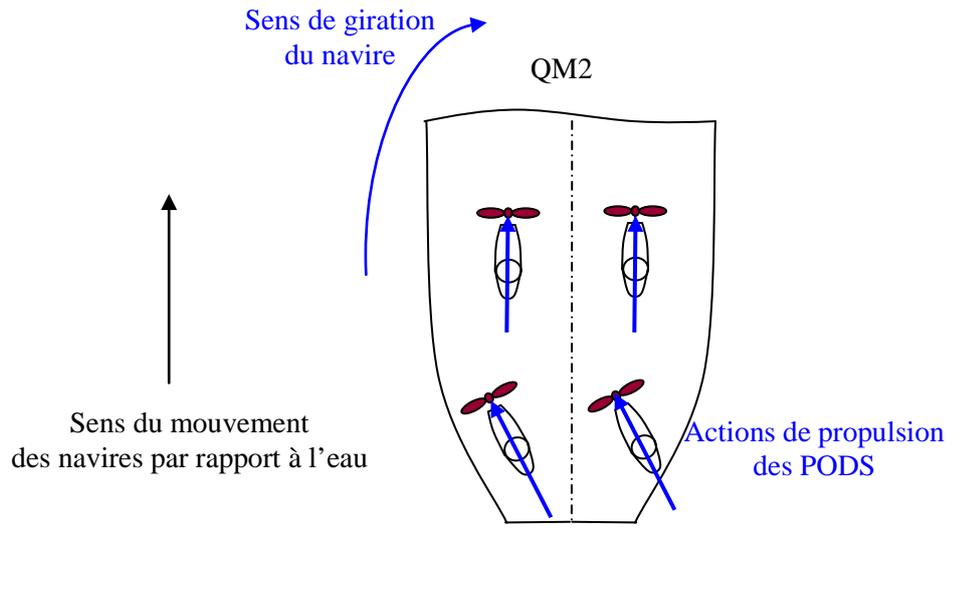


Figure 2 : Les appareils de gouverne du QM2 (sens et direction des actions communiqués à titre d'exemple)

## Questions 5D, 5G

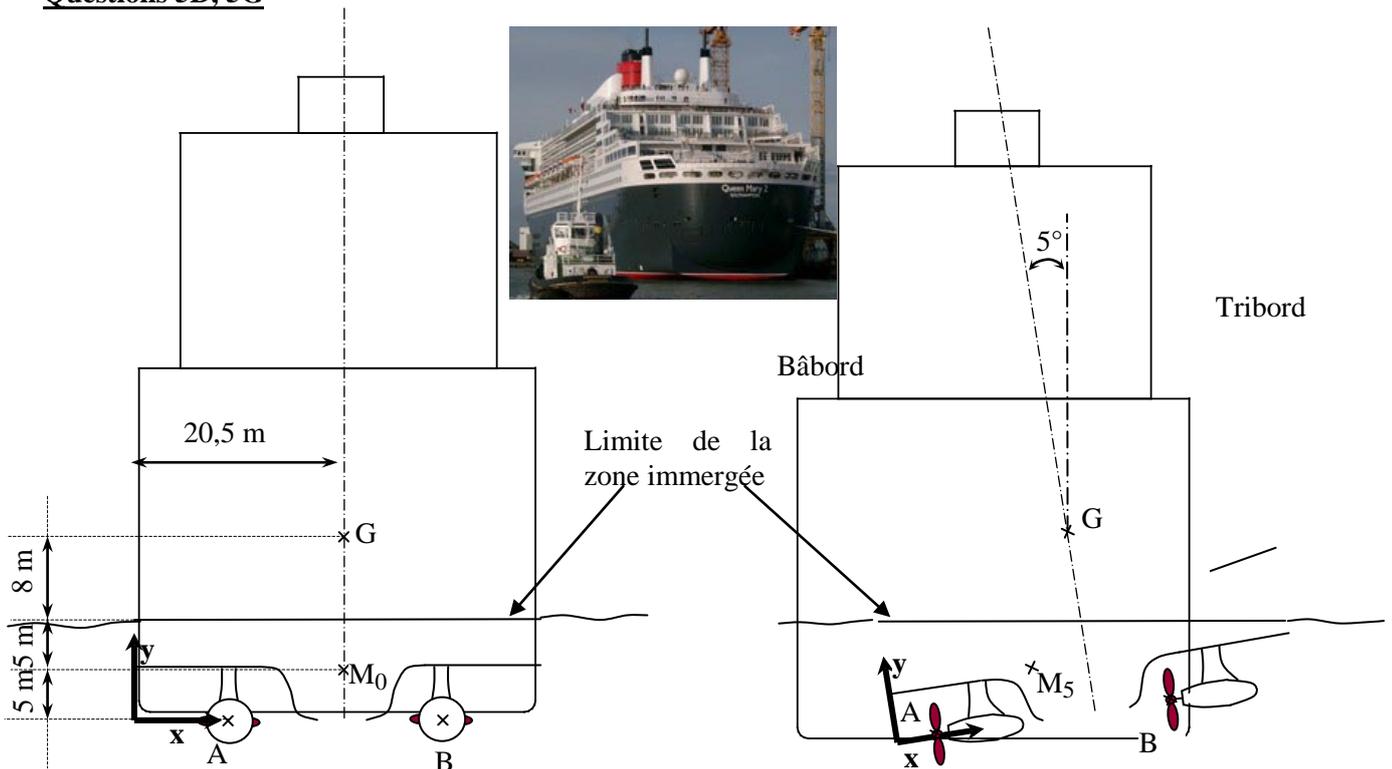


Figure 3 : Silhouette du paquebot vue de l'arrière

Figure 4 : Paquebot en gîte de 5 degrés

A et B désignent l'origine des actions de propulsion créées par le PODS.  
 M désigne le centre de la poussée d'Archimède.  
 G centre de gravité du navire.