

# Paquebots de croisière

## 1. LA PRESENTATION DE L'ETUDE

**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.

⇒ Les 2 paquebots proposent des croisières transatlantiques ou itinérantes, (pas dans les mêmes conditions de durée et de vitesse).

	QM2	Musica
Vitesse maximum	⇒ 30 noeuds	⇒ 23 nœuds
Puissance propulsive	⇒ 86 MW	⇒ 35 MW
Nombre d'hélices	⇒ 4	⇒ 2
Mode de propulsion	⇒ PODS	⇒ Ligne d'arbre

**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 ?

⇒  $920/39=23,6$  nœuds; pas possible pour le Musica car sa vitesse max est de 23 nœuds.

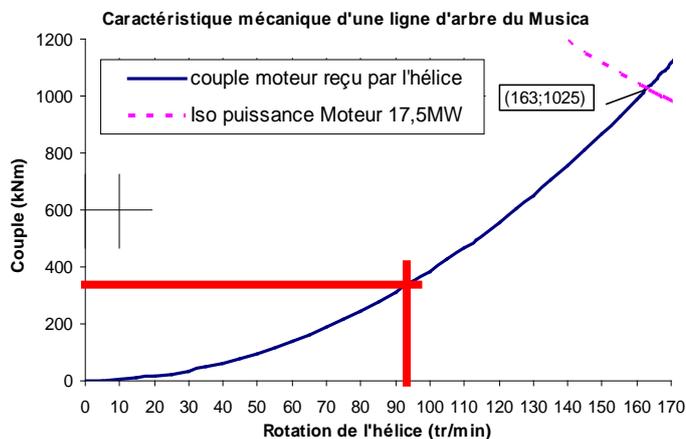
## 2. LA PROPULSION DU PAQUEBOT MUSICA

**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.

⇒  $P_p = F.V = 580\ 000 \cdot 13.1852/3600 = 3\ 879$  kW

⇒  $P_H = P_p / 2 = 1\ 939$  kW

### 2.1 FONCTIONNEMENT DES EFFECTEURS : LES HELICES



**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.

⇒ Fréquence de rotation hélice = 163 tr/min pour vitesse max = 23 nœuds, donc à 13 nœuds fréquence de rotation hélice =  $163 \cdot 13/23 = 92,13$  tr/min

⇒ Méthode graphique : d'où un couple reçu d'environ 350 kNm.

⇒ Par calcul :

- ⇒ Calcul de  $k$  : à vitesse max,  $C=1025 \text{ k.Nm}$  donc  $k = 1\,025\,000 / (163 \cdot \pi / 30)^2 = 3518$
- ⇒  $C_{13 \text{ nœuds}} = 3518 \cdot (92,13 \cdot \pi / 30)^2 = 327\,457 \text{ Nm}$
- ⇒  $P_M = C\omega = 327\,457 \cdot 92,13 \cdot \pi / 30 = 3\,159,269 \text{ kW}$  (Graphique :  $P_M = 3\,370 \text{ kW}$ )
- ⇒  $\eta_H = P_H / P_M = 1\,939 / 3\,159 = 0,614 = 61,4 \%$  (Graphique :  $\eta_H = 57\%$ )

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

**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.

- ⇒ De l'hélice au palier de butée : effort de compression plus torsion
- ⇒ Du palier de butée au moteur : uniquement en torsion
- ⇒  $F = k_c \cdot \Delta L / L \Rightarrow \Delta L / L = (580\,000 / 2) / 920 \cdot 10^6 = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ m/m} \Rightarrow \Delta L \text{ total} = 0,3 \cdot 10^{-3} \cdot 35,2 = 10,5 \text{ mm}$
- ⇒  $C = k_t \cdot \Delta \theta / L \Rightarrow \Delta \theta / L = (1\,025\,000) / 98 \cdot 10^6 = 1,04 \cdot 10^{-2} \text{ rd/m} \Rightarrow \Delta \theta = 1,04 \cdot 10^{-2} \cdot 43,6 = 0,45 \text{ rd} \approx 26^\circ$

## 2.3 CONVERSION DE L'ENERGIE : LES MOTEURS

**Question 2D :** Considérant les conditions ci-dessus et les caractéristiques du moteur (plaque signalétique, annexe 5) :

- 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.
  - ⇒  $P_C = P_{\text{stator}} = 2 \cdot (U \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi) = 2 \cdot 1605 \cdot 660 \cdot 1,732 \cdot 0,9 = 3\,302\,570 \text{ W}$
  - ⇒  $P_{\text{rotor}} = U \cdot I = 130 \cdot 356 = 46\,280 \text{ W} \quad \Rightarrow P_C + P_{\text{rotor}} = 3\,348\,850 \text{ W}$
  - ⇒  $\eta_M = P_M / (P_C + P_{\text{rotor}})$
  - ⇒  $\eta_M = 3\,159 / (3\,349) = 94,3\%$
- ⇒ Pertes Joules rotor =  $R_{(\text{à } 120^\circ\text{C})} \cdot I^2 = 0,365 \cdot 356^2 = 46\,259 \text{ W}$
- ⇒ Pertes Joules stator =  $2 \cdot 3 / 2 \cdot R_{(120^\circ\text{C})} \cdot I^2 = 3 \cdot 9,65 \cdot 10^{-3} \cdot 660^2 = 12\,610 \text{ W}$
- ⇒ Pertes fer et mécaniques =  $P_{\text{stator}} - P_M - P_{\text{Joules stator}} \approx 3\,303 - 3\,159 - 12,6 \approx 131,4 \text{ kW}$

## 2.4 DISTRIBUER L'ENERGIE : LES CONVERTISSEURS

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

- ⇒  $P_{DA} \approx P_C / \eta_C = 3302 / 0,99 \approx 3\,335 \text{ kW}$

## 2.5 ALIMENTER : LES MOTEURS DIESEL ET ALTERNATEURS

**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 ( $\approx 4\,000 \text{ h}$ ) entre ces deux cas d'étude et déterminer celui qui répond le mieux à la contrainte C4. (Exprimer les masses de fioul en kg).

- ⇒ Puissance totale nécessaire :  $14,75 \text{ MW}$ , soit  $1,316$  moteur diesel
- ⇒ 1<sup>er</sup> cas : le 1<sup>er</sup> moteur consomme  $202 \text{ g/kWh}$  et le second, utilisé à  $32\%$  consomme  $218 \text{ g/kWh}$ , soit une consommation totale de  $11\,200 \cdot 202 + 3\,550 \cdot 218 = 3\,036 \text{ kg/h}$
- ⇒ 2<sup>ème</sup> cas : chaque moteur fourni  $7,35 \text{ MW}$ . Ils sont utilisés à  $65\%$  et consomme  $203 \text{ g/kWh}$ , soit une consommation totale de  $14\,750 \cdot 203 = 2\,994 \text{ kg/h}$
- ⇒ Soit une économie sensible de carburant sur la durée de la croisière
- ⇒ Différence sur une durée de  $4000 \text{ h} = (3\,036 - 2\,994) \cdot 4\,000 = 168\,000 \text{ kg}$

### 3. LA PROPULSION DU PAQUEBOT QUEEN MARY 2 : LES P.O.D.

**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.

- ⇒ Le QM2 dispose d'une puissance propulsive (96MW) plus de 2 fois supérieure à celle du Musica (35MW)
- ⇒ La puissance propulsion du QM2 est fournie au moyen de 4 actionneurs à hélice de type POD (en fait il s'agit plutôt d'une traction), tandis que celle du Musica est fournie par 2 lignes d'arbres
- ⇒ L'intérêt majeur de l'utilisation des POD est un gain de volume au niveau du pont inférieur puisque l'actionneur est à l'extérieur de la coque (outboard), actionneur utilisé tant pour la 'propulsion' que la direction; donc ni ligne d'arbre, ni moteur, ni entraînement de safran
- ⇒ Ce volume 'gagné' permet alors de 'descendre' des éléments des ponts supérieurs et ainsi installer plus de cabines pour optimiser la rentabilité du navire.

**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%.
- ⇒ Vitesse moyenne du navire:  $V=920/39 = 23,6$  noeuds
- ⇒ Effort à 23,6 nœuds:  $F = k.V^2 \Rightarrow F_{23,6} = 3,4.10^6 \cdot (23,6/30)^2 = 3,4.10^6 \cdot 0,618 = 2,1$  MN
- ⇒ Puissance propulsive du navire:  $P_P = F.V = 2,1.10^6 \cdot 23,6.1852/3600 = 25,55$  MW
- ⇒ Puissance à fournir par les moteurs Diesel et turbines à gaz:
- ⇒  $P = P_P / \eta + P_{\text{hôtellerie}} = (25,55/0,55 + 12) \cdot 10^6 = 46,45 + 12 = 58,45$  MW

**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.

- ⇒ Pour produire cette puissance à partir de TAG 25MW ou Diesel 16,4MW plusieurs solutions sont possibles:
- ⇒ A partir des consommations spécifiques

	TAG 1		TAG 2		DA1		DA2		DA3		DA4		Total (t/h)
	Util	Cons	Util	Cons	Util	Cons	Util	Cons	Util	Cons	Util	Cons	
<b>2 TAG +1 DA</b>	25 (100%)	(250) 6,25t/h	25 (100%)	(250) 6,25t/h	8,45 (51,2%)	(206) 1,74 t/h							<b>14,24</b>
<b>Tout DA</b>					14,6 (89%)	(201) 2,935t/h	14,6 (89%)	(201) 2,935t/h	14,6 (89%)	(201) 2,935t/h	14,6 (89%)	(201) 2,935t/h	<b>11,74</b>

- ⇒ La solution tout Diesel est plus économique d'un point de vue consommation.

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

- ⇒ Si la vitesse est doublée, alors l'effort est multiplié par 4; et la puissance propulsive par 8 car  $P=F.V$
- ⇒ La puissance consommée est proportionnelle au cube de la vitesse.

**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).

- ⇒ Le volume spécifique des TAG est 10 fois moindre que celui des Diesel et leur masse spécifique est 25 fois moindre: gain de place et de charge pour une même puissance.
- ⇒ Les TAG émettent moins de Nox que les DA (5,6g/KWh contre 8g/KWh) et leur utilisation pour les puissances élevées est moins consommatrice de combustible (Rque: mais le MGO est plus cher que le HDO)
- ⇒ En s'appuyant sur l'exemple de la question 3B:
- ⇒ Avec 4 moteurs Diesel (11,74 t/h), tournant à 514 tr/min, l'émission de Nox est de:  $58,45 \cdot 8 \approx 468$  Kg / h à 23,6 nœuds

- ⇒ Avec 2 TAG et 1 DA (14,24 t/h), tournant à 3600 tr/min, l'émission de Nox est de:  
 $50 \cdot 5,6 + 8,45 \cdot 8 \approx 347,6 \text{ Kg/h}$
- ⇒ Sur un trajet de 39h, l'utilisation des TAG aura permis une émission de Nox moindre de 4,7 tonnes par rapport à une utilisation de moteurs Diesel seuls.
- ⇒ Sur 4000 h, la différence est de 481 tonnes de Nox.

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

### 4.1 CONSIGNER LA VITESSE

**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.

- ⇒ 4mA pour 0 nœuds et 20mA pour 23 nœuds ⇒ pour 13 nœuds  $I = 4 + 13 \cdot 16/23 = 13,04 \text{ mA}$
- ⇒ 0000 pour 0 nœuds et 7FFF pour 23 nœuds ⇒ pour 13 nœuds :  $32767 \cdot 13/23 = 18520 \equiv 4858$   
 (Attention: 4578 si division en hexa)
- ⇒ Réponse recevable: 0000 pour 0mA et 7FFF pour 20mA ⇒ pour 13,04 mA : 5374 (valeur min 1999 pour 4 mA)

**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:

**Question 4C :** Tracer sur le schéma électrique le parcours du courant  $I$  correspondant à l'intervalle repéré Ⓣ 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 tracés estimés 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.

- ⇒ Pour 163 tr/min ⇒  $f = n \cdot p = 16 \cdot 7/60 = 19,017 \text{ Hz}$  (correspond à la plaque signalétique)
- ⇒ Pour 13 nœuds, soit 92,13 tr/min ⇒  $f = 10,75 \text{ Hz}$

**Question 4F :** La commutation des thyristors provoque des faibles variations du courant dans les enroulements du moteur, et donc une ondulation du couple fournit 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.

- ⇒  $f_{ond} = f \times 6 \approx 64,5 \text{ Hz}$
- ⇒ Ces variations génèrent des variations de couple sur l'arbre moteur et donc des vibrations perceptibles par les passagers

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

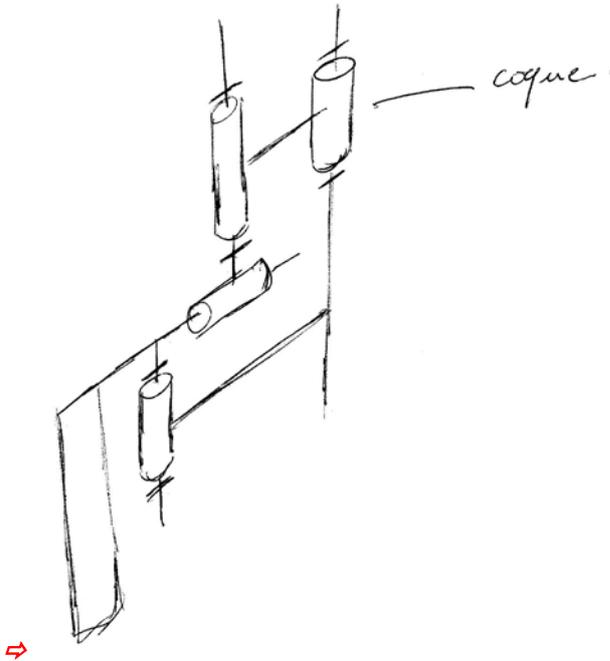
- ⇒ La fréquence de ces ondulations est multipliée par deux et leur amplitude plus faible. Les vibrations sont alors nettement moins perceptibles. Le courant est plus 'lissé' et le rendement global est amélioré.

## 5. LA GIRATION

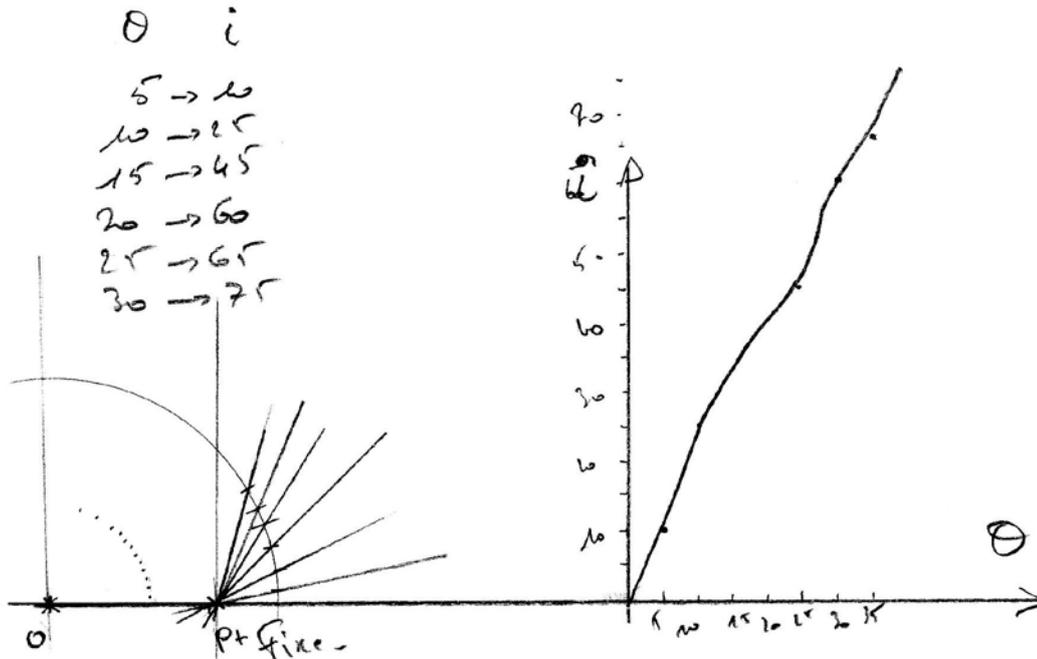
### 5.1 MODIFIER LA DIRECTION : LES APPAREILS DE GOUVERNE DU MUSICA

**Question 5A :** Sur la figure 1 du document réponse DR3, représenter graphiquement les actions mécaniques qui propulsent (de l'eau sur l'hélice) 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.



**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.



⇒ A surface de voilure identique, l'angle de d'incidence est nettement supérieur donc effort plus important.

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

**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<sub>5</sub> et expliquer pourquoi le bateau ne continue pas à se renverser.

⇒ DR3, effet de couple de renversement

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

⇒  $m=150\,000$  tonnes ⇒  $P \approx 1,5$  MN

⇒  $Moment_{(poids)} = 1,5 \cdot 10^6 \cdot \sin 5 \cdot (18-4,9) - 1,5 \cdot 10^6 \cdot \cos 5 \cdot (20,5-18,8) = -827 \cdot 10^6$  Nm

**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.

⇒ Que G ne dépasse pas M en vertical.

- 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°, 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 ?

⇒ Redresse le navire

**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.

⇒  $P_{mot} = C \cdot \omega \cdot K/4 = 2100 \cdot 10^3 / 1000 / 4 \cdot 900 \cdot \pi / 30 = 49\,480$  W

⇒ 3 moteurs suffiraient; le quatrième est redondant et répond à la contrainte C3 (sécurité)

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

⇒ Alimentation moteur : jusqu'à plus de 2 000 A

⇒ Contrôle commande : de l'ordre de quelques dizaines ou centaines de mA

**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

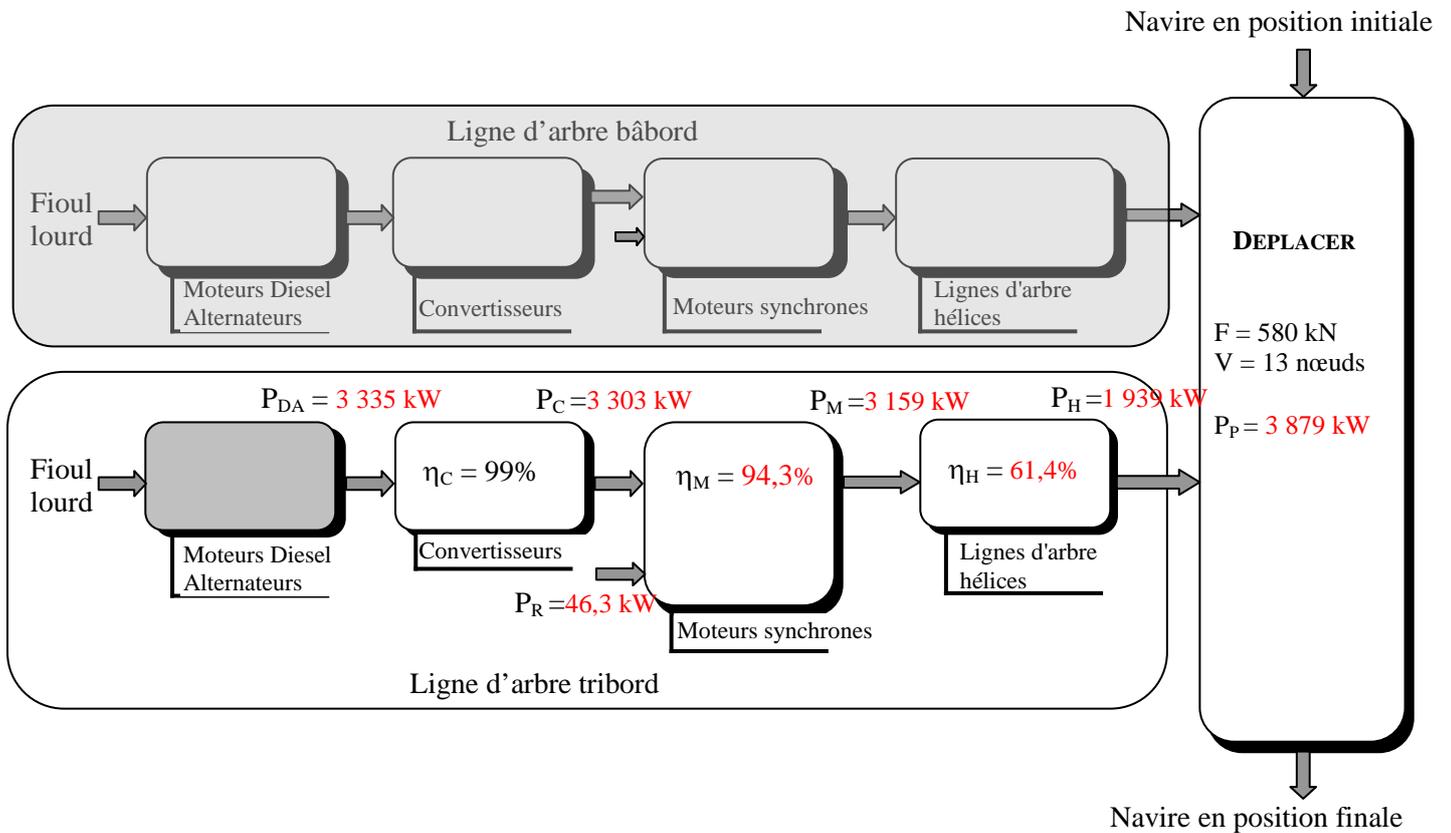
**Question 6L :** Justifier cette modification sachant que le coût du fioul domestique (MGO) est environ deux fois supérieur au fioul lourd (HDO) et que lors d'un transit à faible vitesse ou pour l'hôtellerie dans un port, la production électrique nécessaire est de l'ordre de 10MW.

⇒ Pour des 'faibles' puissances (ex :10MW), une TAG consomme plus de fioul (3,3 t/h avec cogénération; 4,4 t/h sans cogénération) qu'un TD (2t/h), soit 1,65 ou 2,2 fois plus et donc coûte environ 3,3 (ou 4,4) fois plus.

⇒ Une TAG est 'intéressante' lorsque des puissances élevées sont demandées. Ses principaux avantages sont un gain de place et de masse pour une puissance donnée, ainsi qu'une émission moindre de Nox. (cf annexe 6)

# Document réponse DR1

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

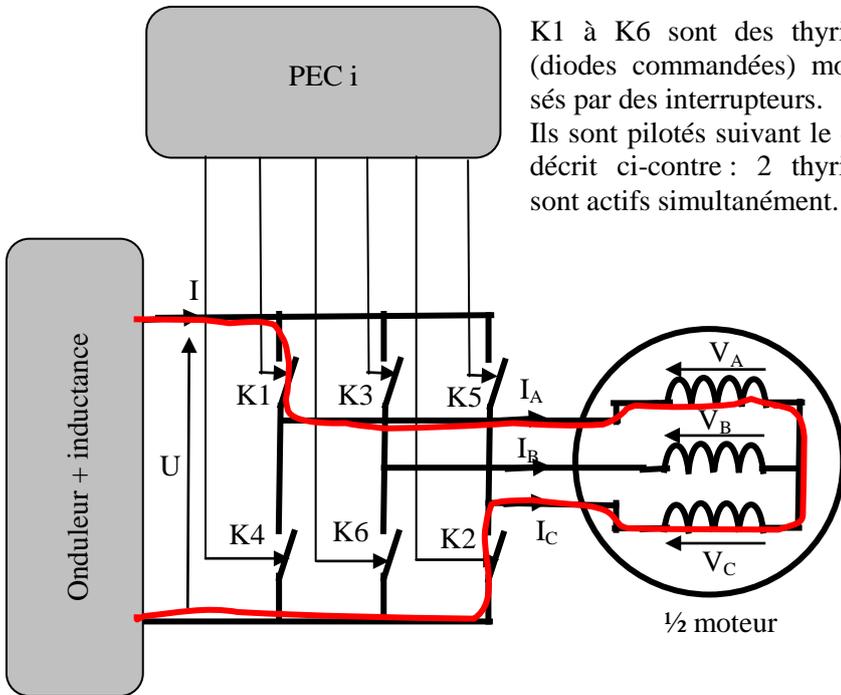


## 2 ENVOI DE LA CONSIGNE VITESSE A PARTIR DU LEVIER DE COMMANDE, VIA LE SOUS-RESEAU ETHERNET

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	03-00-4A-60-84-F5	07-1C-D2-FD-5A-C0	0806	XXX 4858 XXX	XXXX

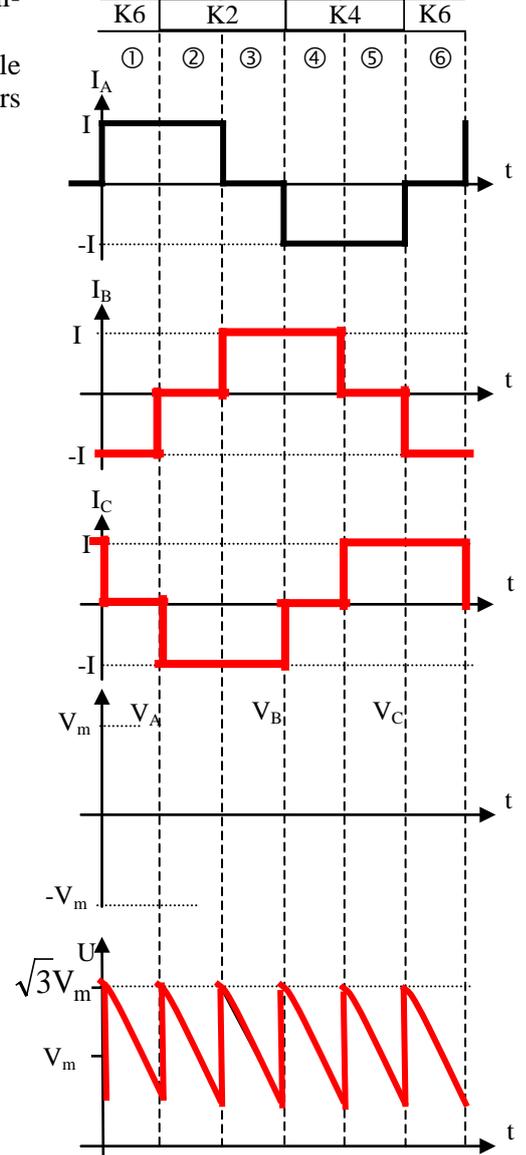
# Document réponse DR2

## 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

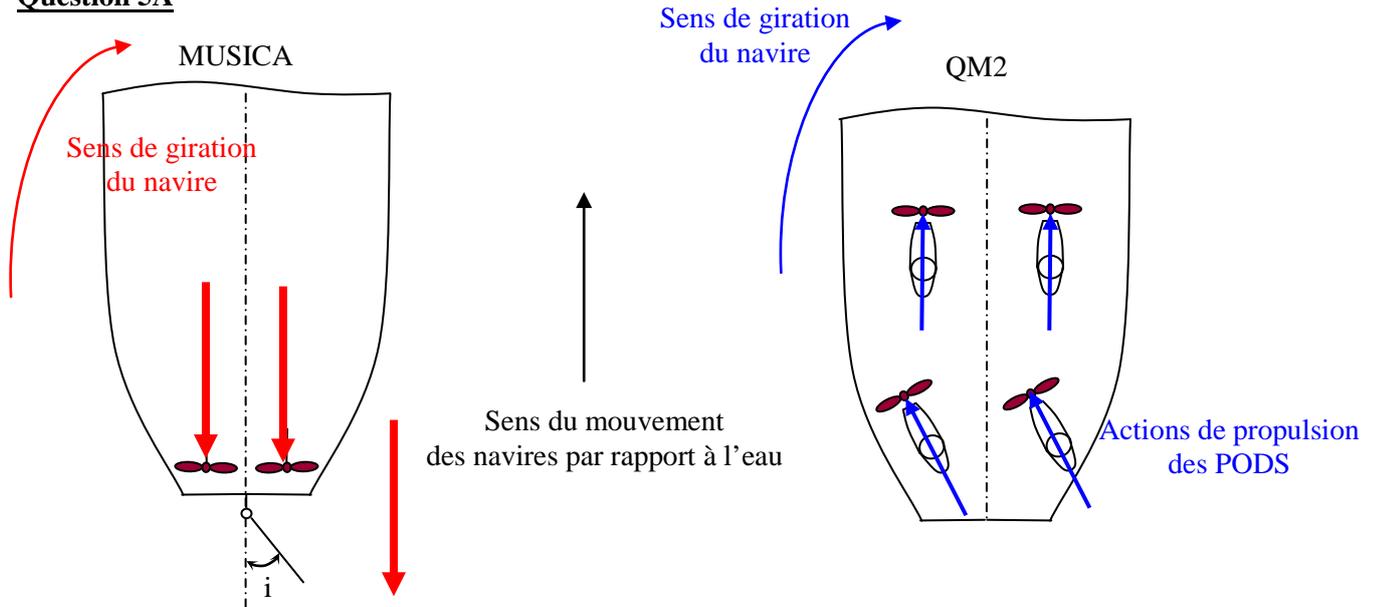


Figure 1 : Les appareils de gouverne du Musica

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

## Questions 5D, 5G

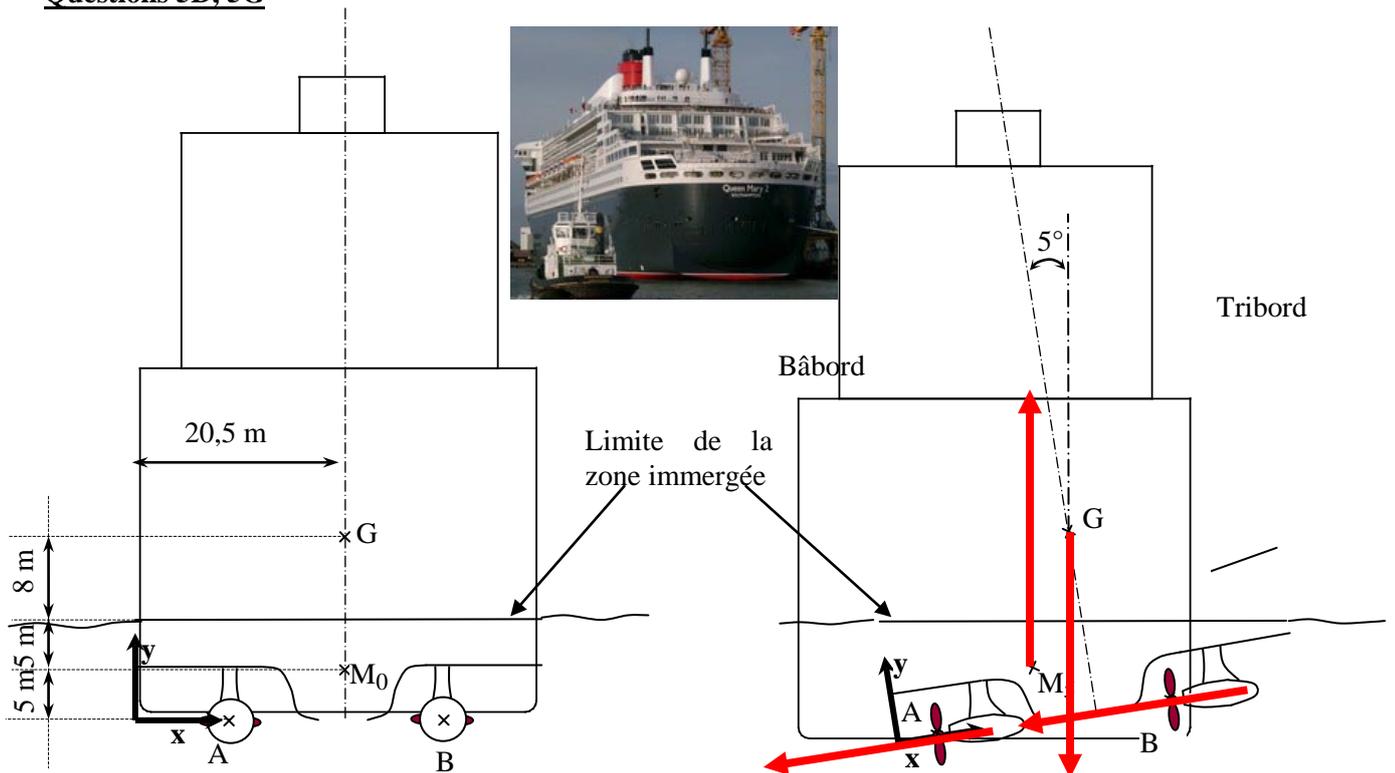


Figure 3 : Silhouette du paquebot vue de l'arrière

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.