



MINISTÈRE
DE L'ÉDUCATION
NATIONALE, DE
L'ENSEIGNEMENT
SUPÉRIEUR ET DE
LA RECHERCHE

EAI STI 1

SESSION 2015

AGRÉGATION CONCOURS INTERNE ET CAER

Section : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR

**Options : sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie mécanique,
sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie électrique,
sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie des
constructions.**

ÉPREUVE DE SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR

Durée : 4 heures

Calculatrice électronique de poche – y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.

De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.

NB : La copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.

Tournez la page S.V.P.

A

• **Sujet :**

Mise en situation	page 2
Structure du sujet	page 3
Première partie	page 4
Deuxième partie	page 8
Troisième partie	page 9
Quatrième partie	page 10
Cinquième partie	page 11
Sixième partie	page 14

• **Documents :**

Documentation technique (DT1 à DT11)
Documents réponses (DR1 à DR6)

Le sujet comporte six parties indépendantes qui peuvent être traitées dans un ordre indifférent.

Les différentes parties seront traitées sur des copies séparées.

Toutes les réponses devront être détaillées sur la copie et les résultats encadrés ou soulignés.

Préciser les unités des résultats.

Tous les documents réponses DR1 à DR6, remplis ou non, sont à rendre avec les copies.

L'AR VAG TREDAN : NAVIRE ELECTRIQUE « ZERO EMISSION »

MISE EN SITUATION :

Le premier bateau électrique au monde alimenté exclusivement par des **supercondensateurs** a été baptisé le 18 septembre 2013 à Lorient.

Ce navire « **zéro émission** » qui fait la navette entre Lorient et Pen-Mané (Locmiquélic) porte bien son nom : « Ar Vag Tredan » veut dire « bateau électrique » en breton.



L'Ar Vag Tredan est un **catamaran électrique** sans batteries qui peut accueillir 150 personnes, dont 3 à mobilité réduite, ainsi que 10 vélos. Il est doté de deux propulseurs azimutaux et est capable d'atteindre une vitesse maximum (chargé) de 10 nœuds. Ils permettent à la fois de propulser le navire et d'assurer la direction puisqu'ils peuvent tourner à 360° indépendamment l'un de l'autre.

Construit par le chantier STX de Lanester, ce bateau navette à la propulsion exclusivement électrique **se recharge à chaque escale en seulement 4 minutes**. Une performance offerte par la rapidité de recharge des supercondensateurs qui surpasse de loin celle des batteries traditionnelles.

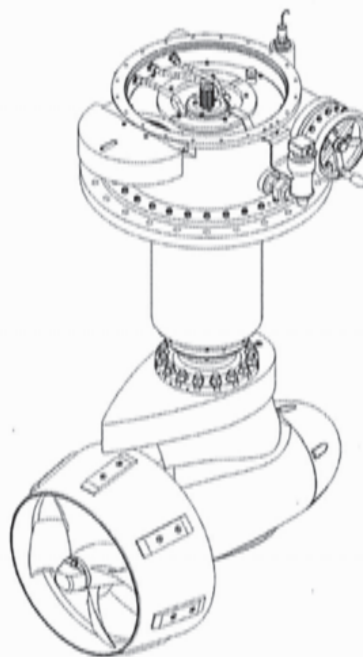
En exploitation, l'Ar Vag Tredan effectue chaque jour 28 aller-retour, à raison d'un par demi-heure, pour un trajet aller d'environ 7 minutes entre Lorient et Locmiquélic, de l'autre côté de la rade.

Avec 28 recharges complètes par jour, le bateau sera rechargé environ 7000 fois par an. **Cette cadence de recharge serait impossible à tenir pour des batteries**, car les batteries Li-Ion (Lithium-Ion) et les batteries Ni-MH (Nickel-hydrure métallique) ne supportent que 500 à 1000 cycles de recharge en moyenne.

STRUCTURE DU SUJET :

Ce sujet permet d'appréhender les problématiques essentielles auxquelles les ingénieurs du projet ont été confrontés. Vous serez donc amenés à :

- Valider une nouvelle architecture navale de la navette en vérifiant le respect de son autonomie énergétique pour le trajet assigné. (**Partie n°1**) ;
- Vérifier après modélisation la flottabilité du navire dans les conditions prévues par le « règlement de classification des navires » du Bureau Veritas. (**Partie n°2**) ;
- Vérifier le dimensionnement d'éléments de structure du navire avant de proposer des solutions de conception. (**Partie n°3**) ;
- Analyser un élément de confort passager : la climatisation et plus particulièrement la pompe à chaleur associée. (**Partie n°4**) ;
- Paramétrer la loi de commande du convertisseur d'énergie qui permet la charge des supercondensateurs pour valider le temps de charge maximum de 4 minutes. (**Partie n°5**)
- Analyser la conception des propulseurs azimutaux de la navette. Justifier les choix technologiques des étanchéités du carter et des éléments mécaniques des guidages avant de modéliser le comportement dynamique de l'arbre d'hélice. (**Partie n°6**)



Propulseur azimutal

PARTIE N°1 : ARCHITECTURE NAVALE ET AUTONOMIE ENERG ETIQUE.

La conception de la navette procède par itérations successives des deux processus suivants :

- les performances attendues en termes de stabilité du navire, de vitesse et d'économies d'énergie, le nombre de passagers à embarquer, l'encombrement probable des équipements (principalement les supercondensateurs) déterminent la structure du navire,
- la structure du navire (carène) retenue et les performances attendues déterminent la puissance totale en amont des hélices des propulseurs. Compte-tenu du trajet parcouru par la navette, l'énergie à stocker est évaluée pour déterminer la capacité totale des supercondensateurs. Ceci définit un nouvel encombrement et une nouvelle masse pour les supercondensateurs.

L'itération est effectuée jusqu'à ce que toutes les contraintes évoquées soient satisfaites.

Pour l'Ar Vag Tredan, après deux itérations, les architectes navals ont revu à la baisse le volume octroyé aux supercondensateurs bâbord et tribord.

On utilise les modules de supercondensateurs M65V375F de la société Batscap initialement prévus (document technique **DT4**).



Armoires SC

Modules de supercondensateurs
M65V375F

Problématique : Pour valider la nouvelle architecture, le chef de projet doit vérifier si les caractéristiques de la nouvelle carène, compte-tenu du trajet à parcourir par la navette, permettent une autonomie énergétique suffisante.

Dans un premier temps, nous devons déterminer les nouveaux besoins énergétiques de la navette pour une traversée aller/retour de la rade de Lorient dans le cas le plus défavorable (c'est-à-dire avec du courant).

L'estimation par simulation de la puissance mécanique totale en amont des hélices des propulseurs azimutaux en fonction de la vitesse a été actualisée (document technique DT1).

Le trajet effectué par l'Ar Vag Tredan est décrit ci-dessous :



- A : Embarcadère de Pen Mané
- R : Embarcadère « Quai des Indes » à Lorient
- 1 : Rade de Lorient
- 2 : Avant port

On suppose que le courant de marée est porteur de la navette à l'aller (A→R) et contraire au retour (R→A).

Quelques définitions :

Le **Loch** est un instrument de navigation maritime qui permet d'estimer la vitesse de déplacement d'un navire sur l'eau, soit sa vitesse relative (**vitesse Loch** (V_L)) en surface par rapport à la masse d'eau où il évolue.

La **vitesse fond** (V_F) d'un navire se définit par rapport au référentiel terrestre (le fond).

Le **mille marin** correspond à une distance de 1,852 km.

Le **nœud** est une unité de mesure de la vitesse utilisée en navigation maritime et aérienne. Un nœud correspond à un mille marin par heure, soit $1,852 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ou $0,514 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Question 1 : Etablir les expressions littérales des grandeurs V_F , Δt , W et W_T présentes sur le **document-réponse DR1**.

Question 2 : Compléter le tableau « Bilan énergétique de la traversée aller-retour » du **document-réponse DR1**.

Donner l'énergie totale (kW.h) nécessaire à la traversée en la majorant de 20% pour disposer d'une marge d'énergie.

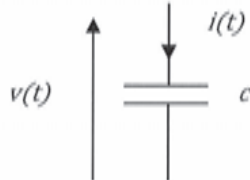
N.B. : On suppose que le courant de marée (voir flèche sur la figure en haut de page) est parallèle à l'axe longitudinal de la navette durant tout le trajet sur ce tronçon.

Dans **un second temps**, nous devons évaluer l'énergie que les supercondensateurs peuvent stocker lors d'une recharge avant d'effectuer son trajet aller-retour dans la rade.

Pour chaque bord, on prévoit un volume maximum de $4,8 \text{ m}^3$. On réserve 30% du volume disponible pour le passage des câbles et la ventilation. La masse totale par bord ne doit pas excéder 3,5 t.

Question 3 : Pour chaque bord, déterminer le nombre maximum de modules M65V375F intégrables dans le volume utile alloué.

On modélise chaque module de supercondensateurs par un supercondensateur unique de capacité constante c :



Question 4 : Comment associer les modules pour obtenir une tension aux bornes de l'ensemble de 520V compte-tenu de leurs caractéristiques électriques ?

Proposer un schéma de raccordement permettant d'intégrer tous les modules.

Question 5 : Calculer la capacité du supercondensateur équivalent à tous les modules convenablement associés d'un bord.

Les supercondensateurs utilisant de l'électrolyte organique présentent une **capacité variable avec la tension à leurs bornes**. Ceci a une incidence sur leur comportement énergétique.

On retiendra comme modèle de capacité variable pour l'étude la définition de **Rowe** basée sur la définition locale de la capacité c comme étant le lien entre la variation de charge dq et la variation de la tension dv :

$$dq(v) = c(v).dv$$

Cette forme s'inspire de la définition utilisée lorsqu'il s'agit d'une capacité constante. Le courant $i(t)$ s'exprime ainsi :

$$i(t) = \frac{dq}{dt} = c(v) \cdot \frac{dv(t)}{dt}$$

A circuit diagram showing a capacitor with two parallel horizontal lines. To the left of the capacitor, a vertical arrow points upwards and is labeled $v(t)$. To the right of the capacitor, a vertical arrow points downwards and is labeled $i(t)$. The letter c is placed to the right of the capacitor symbol.

La capacité équivalente des modules pour chacune des propulsions bâbord et tribord est de 375 F pour une tension de 520V. Il est possible d'approximer la capacité $c(v)$ par une droite affine (**DT1**) :

$$c(v) = a_1 \cdot v + c_1$$

Ce modèle est particulièrement important lorsque l'on ne décharge pas complètement la capacité lors d'un cycle charge/décharge. C'est d'ailleurs tout à fait le cas dans notre application. En effet, pour des raisons évidentes de sécurité et de maintien des fonctions essentielles de la navette, la tension aux bornes des supercondensateurs (propulsion bâbord et tribord : documents techniques **DT2** et **DT3**) ne doit pas descendre en deçà de 250 V.

Question 6 : Déterminer numériquement les coefficients a_1 et c_1 sachant que 100% de v correspond à la tension maximale de 520 V pour laquelle la capacité des supercondensateurs est de 375 F. Donner l'expression renseignée de $c(v)$.

Question 7 : Montrer que lors d'une charge, l'énergie stockée par la capacité du supercondensateur peut s'écrire :

$$W_c = \frac{1}{2} c_1 (V_{max}^2 - V_{min}^2) + \frac{1}{3} a_1 (V_{max}^3 - V_{min}^3)$$

On rappelle que l'expression de l'énergie stockée W_c en fonction de la puissance instantanée $p(t)$ s'écrit :

$$W_c = \int_0^t p(t) dt \text{ avec } p(t) = v(t) \cdot i(t)$$

On notera V_{min} la tension en début de charge et V_{max} la tension obtenue en fin de charge.

Question 8 : Evaluer la quantité d'énergie totale (kW.h) stockée lors d'une charge à l'embarcadère de Port Mané.

A partir de la documentation technique **DT4**, évaluer simplement l'énergie totale des supercondensateurs (modèle de capacité constante avec 375 F). La comparer au résultat précédent et conclure.

Finalement, nous devons nous prononcer sur l'autonomie énergétique de la navette.

Question 9 : Les résultats obtenus précédemment permettent-ils de valider l'autonomie énergétique de la navette compte-tenu de l'évolution de sa structure ? Justifier la réponse.

PARTIE N°2 : FLOTTABILITE DU NAVIRE DANS LES CONDITIONS PREVUES PAR LE « REGLEMENT DE CLASSIFICATION DES NAVIRES » DU BUREAU VERITAS.

Le document technique **DT5** comporte toutes les données ayant trait à l'architecture navale.

Modélisation du navire :

Le modèle simplifié du navire est représenté sur le document technique **DT6**. Pour toute l'étude on traitera le problème comme étant un problème plan sur la section transversale du navire et on ne tiendra pas compte des dissymétries longitudinales.

Les flotteurs ont une section transversale de 2 mètres de large (b) et de 3 mètres de hauteur. Ils ont une longueur totale de 24 mètres et sur les 6 mètres de l'extrémité arrière leur hauteur diminue jusqu'à atteindre une hauteur nulle.

*Le **tirant d'eau** (t) est la hauteur de la partie immergée du bateau (flotteur dans notre cas) qui varie en fonction de la charge transportée. Il correspond à la distance verticale entre la surface de l'eau et le point le plus bas de la coque.*

Question 10 : Montrer que le volume immergé d'un flotteur peut s'écrire en fonction du tirant d'eau t et de la largeur d'un flotteur b sous la forme $V = bt^2 + 18bt$

Question 11 : Vérifier que l'équation qui détermine le volume immergé en fonction du tirant d'eau s'écrit de la façon suivante : $V = 2t^2 + 36t$

Question 12 : Déterminer le tirant d'eau du navire à vide.

Selon l'Arrêté du 30-12-2008, directive 2006/87/CE, en phase d'essais, une charge exceptionnelle de 10 tonnes (F_1) est appliquée sur un des flotteurs (elle simule une prise d'eau dans un flotteur), et on suppose que tous les passagers et leurs bagages seraient concentrés sur la moitié de la largeur du navire (F_2) (lors d'un débarquement d'urgence par exemple). F_3 est le poids du navire à vide.

Question 13 : On admettra une modélisation mécanique d'une poutre sur deux appuis, compléter le schéma du **DR4** avec les valeurs de F_1 , F_2 , F_3 et d.

Question 14 : Calculer la charge supportée par chaque flotteur F_{v1} et F_{v2} .

Question 15 : Quelle serait alors l'inclinaison transversale du navire en degrés ?

Un second cas de chargement lié aux effets du vent, vient se rajouter à la situation précédente. Compte tenu des rafales, la pression du vent est arrêtée à 750 Pa (ce qui la rapproche de celle prise en compte dans l'arrêté du 2 septembre 1970).

On admettra que la ligne de flottaison (tirant d'eau) est à 1,18 m.

(On ne tiendra pas compte des surfaces des garde-corps constitués essentiellement de tôles grillagées) et on pourra également négliger la surface de l'avancée du poste de pilotage.

On supposera que les efforts horizontaux dus au vent seront équilibrés par la pression horizontale de l'eau répartie équitablement sur chaque flotteur. (Les pressions hydrostatiques s'équilibrant de part et d'autre de chaque flotteur seront donc négligées).

Question 16 : Calculer l'intensité et la position verticale D de F_h due au vent.

Question 17 : Calculer la charge verticale supplémentaire sur chaque flotteur F'_{v1} et F'_{v2} qu'engendrent les effets du vent complétez le document **DR4**.

*Les efforts sur les flotteurs sont concentrés sur une ligne verticale passant par leurs centres de gravités respectifs. On admettra le schéma mécanique représenté sur le **DR4**.*

Question 18 : Déterminer l'inclinaison du navire en tenant compte des effets du vent, l'inclinaison totale ne doit pas dépasser 5° . Conclure.

PARTIE N°3 : DIMENSIONNEMENT D'ELEMENTS DE STRUCTURE.

Pour cette partie on supposera que la masse des superstructures, hors flotteurs, est répartie uniformément sur toute la surface du pont ainsi que les charges dues aux passagers.

L'étude porte sur la vérification d'une des poutrelles (barrots de pont dans le domaine de la construction navale) reconstituées soudées (P.R.S.) qui relient les deux coques. La portée est de 5 mètres (portée libre entre les deux coques), et on considère qu'elles sont encastrees aux deux extrémités sur les coques.

Question 19 : Montrer que la charge répartie sur une traverse (ou barrot) peut être assimilée à une charge linéique de 5790 N/m.

Question 20 : On admettra que la charge horizontale due au vent calculée à la **question 17** est de 70 000 N, déterminer l'effort de compression dans un des barrots.

Question 21 : Quelle est la sollicitation à laquelle est soumis un barrot ?

Question 22 : Afin de prendre en compte les effets de "trainage" de cisaillement, des effets liés aux soudures et dans le but de prévenir le voilement du plâlage, on admettra un coefficient de réduction $\rho = 0.6$ pour la largeur de la semelle supérieure d'un barrot. Compléter les dimensions d'une section transversale d'un barrot (**DR5**). Justifier la valeur de b_{s1} .

Question 23 : Calculer les caractéristiques géométriques de la section transversale. Compléter le tableau **DR5**.

Question 24 : Calculez la contrainte normale maximale dans la section la plus sollicitée d'un barrot.

Des contraintes tangentielles de 30 MPa dues à la torsion des deux coques l'une par rapport à l'autre se rajoutent aux contraintes normales.

Question 25 : Vérifier la contrainte au point le plus sollicité avec le critère donné dans le règlement NR84 du 1^{er} mars 1996 qui précise qu'en un point i :

$$\sigma_{\max} = (\sigma_i^2 + 3 \cdot \tau_i^2)^{1/2} \text{ ne doit pas dépasser } 80 \text{ N/mm}^2.$$

Conclure, proposer une ou des solutions d'amélioration.

PARTIE N°4 : ANALYSE D'UN ELEMENT DE CONFORT : LA CLIMATISATION ET PLUS SPECIFIQUEMENT LA POMPE A CHALEUR.

Le coefficient de performance de la pompe à chaleur qui convertit en chaleur toute l'énergie apportée par le compresseur, si l'échange thermique entre le fluide et le circuit d'eau est parfait, est donnée par :

$$\text{COP}_{\text{théorique}} = \frac{\text{variation d'enthalpie au cours de la condensation à pression constante}}{\text{variation d'enthalpie au cours de la compression}}$$

Le $\text{COP}_{\text{efficient}}$ de Performance réel de la pompe à chaleur mesure le rendement de la pompe à chaleur dans les conditions expérimentales données.

$$\text{COP}_{\text{réel}} = \frac{\text{Energie récupérée au condenseur par le circuit d'eau qui chauffe}}{\text{Energie consommée par le compresseur}}$$

Question 26 : A partir du cycle frigorigène (document technique **DT7**), compléter le tableau **DR6**.

Question 27 : Calculer le Coefficient de Performance théorique (COP_{th}).

Question 28 : Calculer le $\text{COP}_{\text{réel}}$ (Expérimentalement l'Energie récupérée au condenseur a été calculée 146 KW) dans la situation la plus défavorable.

Question 29 : Comparer le $\text{COP}_{\text{réel}}$ et le COP_{th} . Pourquoi observe-t-on une différence ?

PARTIE N°5 : PARAMETRAGE DE LA LOI DE COMMANDE DU CONVERTISSEUR D'ENERGIE ADAPTE AU RESPECT DU TEMPS DE CHARGE DES SUPERCONDENSATEURS.

Problématique : On désire évaluer, lors d'une **charge à quai**, le comportement électrique des supercondensateurs pour définir une loi de commande des convertisseurs qui permettra d'assurer :

- la pérennité de l'appareillage électrique ;
- les performances attendues en terme notamment de temps de charge.

La structure de l'installation électrique propre à la propulsion de la navette est identique à bâbord comme à tribord.

Toute l'étude ne porte que sur l'ensemble des supercondensateurs du côté bâbord.

A chaque retour à Port-Mané, la tension aux bornes de l'ensemble des supercondensateurs est de **250V**, valeur en deçà de laquelle le bon fonctionnement des équipements électriques de bord n'est pas assuré. En fin de charge, l'ensemble des supercondensateurs présentera à ses bornes une tension de **520 V**.

Le synoptique de la propulsion bâbord est représenté sur le document technique **DT3**.

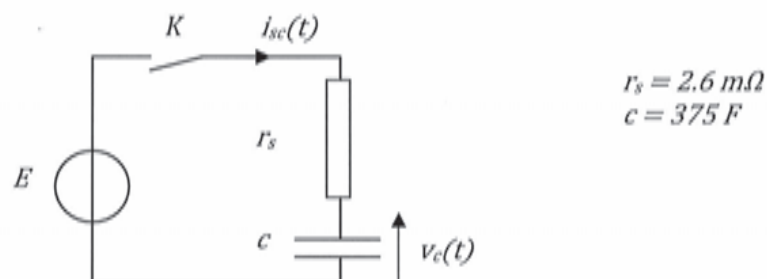
Question 30 : Sur le document-réponse **DR2**, compléter les cases associées aux composants électriques de puissance en indiquant leur désignation.

Indiquer en couleur sur ce même document-réponse le parcours de l'énergie électrique destinée à recharger les supercondensateurs à partir de la prise « réseau » présente sur le quai.

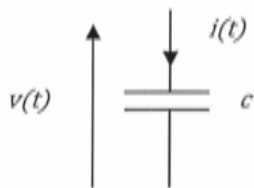
Nous allons à présent envisager une **première loi de commande** : elle consiste à charger **sous tension constante** l'ensemble des supercondensateurs d'un bord. Nous évaluerons les contraintes électriques qu'elle engendre sur l'appareillage et statuerons finalement sur sa pertinence.

Hypothèse de travail n°1 : On modélise le bus continu associé au convertisseur d'énergie A1 par un simple interrupteur que l'on notera **K** en série avec une source de tension parfaite **E = 520 V**.

On considère qu'à l'instant initial ($t = 0$), on ferme l'interrupteur K. La tension $v_c(0)$ est égale à 250 V.



On rappelle la relation courant/tension pour un condensateur :


$$i(t) = c \cdot \frac{dv(t)}{dt}$$

Question 31 : Exprimer littéralement l'expression de $v_c(t)$ en fonction de E , r_s et c . En déduire les expressions littérale puis numérique de $i_{sc}(t)$. Tracer $i_{sc}(t)$ sur votre feuille de copie en précisant les points caractéristiques de son évolution. Quelle valeur maximale atteint-il ?

Le courant maximal que peut débiter le convertisseur A1 est de 530 A.

Question 32 : Cette stratégie de commande est-elle compatible avec les caractéristiques électriques des constituants de la chaîne d'énergie ? Justifier la réponse.

La **loi de commande** du convertisseur d'énergie A1 retenue par la société STX est du type **IPV**.

Elle se décompose en trois phases successives :

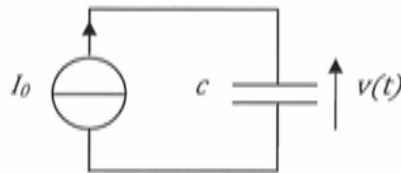
- phase n°1 : Charge à courant constant (**I**) de l'ensemble des supercondensateurs ;
- phase n°2 : Charge à puissance constante (**P**) de l'ensemble des supercondensateurs ;
- phase n°3 : Charge à tension constante (**V**) de l'ensemble des supercondensateurs.

On précise que :

- les supercondensateurs doivent stocker une énergie **W_s de 9 kWh** lors d'une charge complète portant la tension à leurs bornes de 250 V à 520 V ;
- le courant de charge **ne doit pas présenter de discontinuité** lors du passage d'une phase à la suivante ;
- le modèle retenu pour le supercondensateur équivalent se résume à une capacité « c » constante de 375 F : on néglige l'effet de la résistance série r_s .

L'objectif de l'étude consiste à **valider** le temps d'embarquement prescrit dans le CCTP (Cahier des Clauses Techniques Particulières) du navire (document technique **DT8**) en **évaluant** le temps de charge total des supercondensateurs.

Question 33 : La phase n°1 de la charge dure 60 s et s'effectue à courant constant ($I_0 = 530$ A). Déterminer les expressions littérales puis numériques de la tension $v(t)$, de la puissance $p(t)$ puis de l'énergie stockée pendant cette phase. On retiendra pour la phase n°1 le schéma équivalent suivant à partir de l'instant initial ($t=0$) :



Question 34 : La phase n°2 de la charge s'effectue à puissance constante. La valeur de cette dernière correspond à la valeur de puissance instantanée atteinte en fin de phase n°1. En fin de phase n°2, la tension atteinte est de 520 V. Déterminer la durée de cette phase de charge en considérant les grandeurs énergétiques.

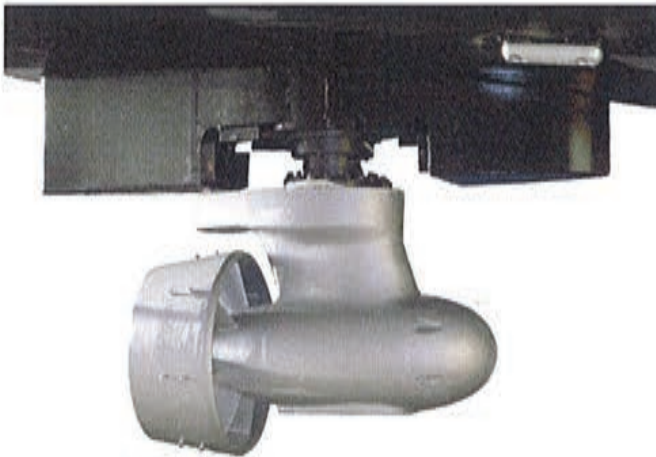
Question 35 : En considérant que la durée de la charge à tension constante de la phase n°3 est négligeable, calculer le temps total (t_{ct}) nécessaire à la recharge des condensateurs. Le temps maximum prescrit dans le CCTP (document technique **DT8**) est-il validé ?

Question 36 : Pour la phase n°3, déterminer la valeur de la tension constante à appliquer aux supercondensateurs et valider l'hypothèse de durée négligeable de cette phase.

Question 37 : Représenter sur le document-réponse **DR3** les allures du courant $i_{sc}(t)$, de la tension $v(t)$ et de la puissance $p(t)$ lors de la charge du supercondensateur équivalent. Proposer pour la phase n°2 des allures probables d'évolution du courant $i_{sc}(t)$ et de la tension $v(t)$.

Identifier les valeurs particulières des grandeurs physiques nécessaires au paramétrage du convertisseur d'énergie A1. Les faire apparaître sur les graphes du document-réponse **DR3**.

PARTIE N°6 : PROPULSEURS AZIMUTaux : ANALYSE, JUSTIFICATION DES SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES ET FABRICATION.



Afin d'éviter les pertes importantes que génère la trainée de deux safrans et des suspentes des arbres d'hélice d'un bateau classique, le choix de deux propulseurs azimuthaux a été fait. Ils permettent à la fois de propulser le navire et d'assurer la direction puisqu'ils peuvent tourner à 360°

indépendamment l'un de l'autre. L'entreprise Masson Marine a conçu, réalisé, et installé sur le catamaran ces propulseurs. Le cahier des charges de ces propulseurs azimuthaux est principalement basé sur quatre critères : le poids, le rendement global, la minimisation du volume interne à la coque et la non pollution du milieu marin.

Analyse globale d'un propulseur azimuthal (DT9 et DT10) :

Les documents techniques **DT9** et **DT10** définissent globalement un propulseur azimuthal, l'étanchéité statique n'a pas été représentée sur ces documents.

Question 38 : Construire un schéma cinématique d'un propulseur en modélisant les guidages en rotation des arbres par des liaisons pivots lorsque cela est possible.

Question 39 : Calculer et justifier le degré d'hyperstatisme du modèle ainsi construit.

La direction du propulseur est motorisée par un moteur hydraulique. En cas d'avarie de ce moteur, une commande entièrement manuelle est possible : une manivelle installée à demeure permet de faire tourner manuellement le propulseur.

Question 40 : Proposer une justification du choix d'une motorisation hydraulique.

Question 41 : Expliquer comment, en commande manuelle, le barreur connaît la position du propulseur.

Analyse de la réalisation du carter principal et de l'arbre d'hélice (DT9)

L'étanchéité dynamique du propulseur a été particulièrement travaillée afin d'éviter tout risque de pollution et tout risque d'endommagement du propulseur par de l'eau de mer. A ces fins un système « clean ship » a été installé. Il est constitué de deux joints à lèvres et de deux canalisations réalisées dans les parois du carter. Elles partent de l'intérieur du bateau et arrivent dans une gorge entre les deux joints (seule partie visible des canalisations sur DT9).

Question 42 : Expliquer comment le système « clean ship » peut permettre d'éviter l'intrusion d'eau dans le propulseur et la pollution de l'eau de mer par de l'huile.

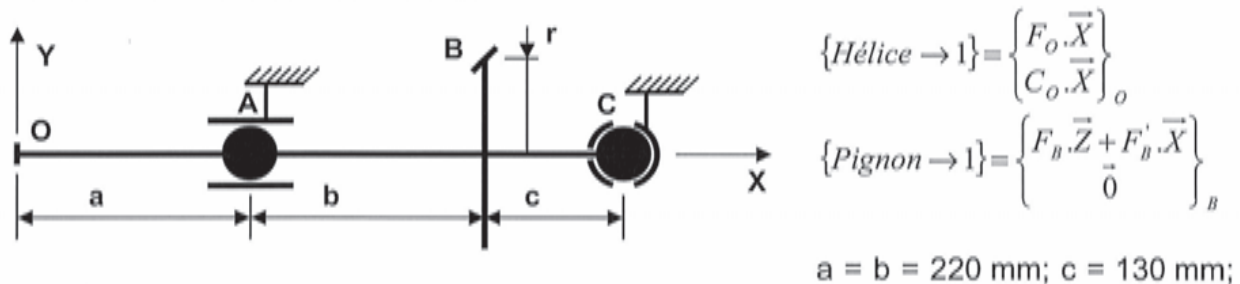
Question 43 : Proposer sous forme d'un schéma où apparaîtront le plan de joint, le système d'alimentation, les éventuels noyaux et les masselottes, une gamme de moulage du carter principal. Proposer et justifier un matériau. Expliquer comment des canalisations du « clean ship » peuvent être réalisées lors du moulage.

Question 44 : Expliquer l'intérêt de rapporter une bague sous les joints à lèvres. Proposer une manière de fixer la bague à l'arbre. Expliquer quelles sont les caractéristiques mécaniques attendues de cette bague et proposer un matériau et un procédé pour les obtenir.

Analyse du guidage de l'arbre d'hélice (DT9)

L'ensemble arbre d'hélice et roue, noté (1) dans cette partie, tourne à 700 tr/min et est guidé sur trois roulements. L'ensemble (1) subit les actions de l'hélice sur l'arbre et du pignon sur la roue. L'objectif est de valider le dimensionnement des roulements.

Cet ensemble est modélisé ci-dessous :



$r = 90 \text{ mm}; F_O = 15000 \text{ N}; C_O = -900 \text{ N.m}$ et $F_B' = 0,3.F_B$.

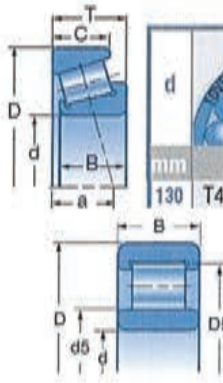
Notation : les torseurs de liaisons en un point I seront notés:

$$\{I \rightarrow 1\} = \begin{Bmatrix} X_I \cdot \vec{X} + Y_I \cdot \vec{Y} + Z_I \cdot \vec{Z} \\ L_I \cdot \vec{X} + M_I \cdot \vec{Y} + N_I \cdot \vec{Z} \end{Bmatrix}_I$$

Question 45 : Justifier la modélisation du guidage et des actions. Calculer de manière littérale les actions dans les roulements ainsi que l'action F_B .

Question 46 : Proposer une démarche, sans la mettre en œuvre, permettant de valider le dimensionnement de la liaison roue - arbre.

Deux roulements T4CB130 et un N315EG15 sont montés sur l'arbre :



d	D	B	C	T	a	$10^6 N$	$10^6 N$	e	Y	Y ₀	tr/mn*	tr/mn*
130	185	27	21,0	29,00	38,00	180,0	280,0	0,47	1,27	0,70	1700	2400
mm	mm	mm	mm	mm	mm	10 ⁶ N	10 ⁶ N				tr/mn*	tr/mn*
130	185	27	21,0	29,00	38,00	180,0	280,0	0,47	1,27	0,70	1700	2400
mm	mm	mm	mm	mm	mm	10 ⁶ N	10 ⁶ N				tr/mn*	tr/mn*

d	D	B	D5 (Ø sur rouleaux)	d5 (Ø sous rouleaux)	$10^6 N$	$10^6 N$
75	160	37	143	-	285	265
mm	mm	mm	mm	mm	10 ⁶ N	10 ⁶ N
75	160	37	143	-	285	265
mm	mm	mm	mm	mm	10 ⁶ N	10 ⁶ N

Question 47 : En considérant les actions précédemment calculées comme des actions moyennes, déterminer de manière littérale puis numérique la durée de vie moyenne en heures des trois roulements (voir document technique **DT11**).

Question 48 : Pour les roulements assurant la direction du propulseur (sur le document technique **DT10**), justifier quel serait le critère le plus sévère qui permettrait de dimensionner ces roulements.

Analyse de la dynamique de l'arbre d'hélice

Soient J_{mot} l'inertie du rotor d'un moteur, J_v l'inertie des deux arbres verticaux et J_H l'inertie de l'arbre d'hélice et de l'hélice. Soit C_{mot} le couple moteur considéré constant quel que soit sa vitesse. Soit C_R le couple résistant de l'eau sur l'hélice variant avec le carré de la vitesse de rotation ($\mu \cdot \omega_H^2$). Le rapport de réduction ($\omega_H / \omega_{\text{mot}}$) du renvoi d'angle est noté R .

Question 49 : Déterminer l'inertie équivalente J_{eq} du point de vue du moteur

(rappel : $E_c = \frac{1}{2} J_{\text{eq}} \cdot \omega^2$). En négligeant tous les frottements, déterminer, en fonction de J_{eq} ,

l'équation du mouvement qui permettrait de déterminer le temps que l'hélice mettrait pour atteindre 95% de sa vitesse maximale.

Document-réponse n°1 (DR1)

Réponses à la question 1 :

Expressions littérales des grandeurs physiques suivantes :

V_F : Vitesse fond (nœuds)

$V_F =$

Δt : Durée pour parcourir un tronçon du trajet (min)

$\Delta t =$

W : Energie nécessaire pour parcourir un tronçon du trajet (kW.h)

$W =$

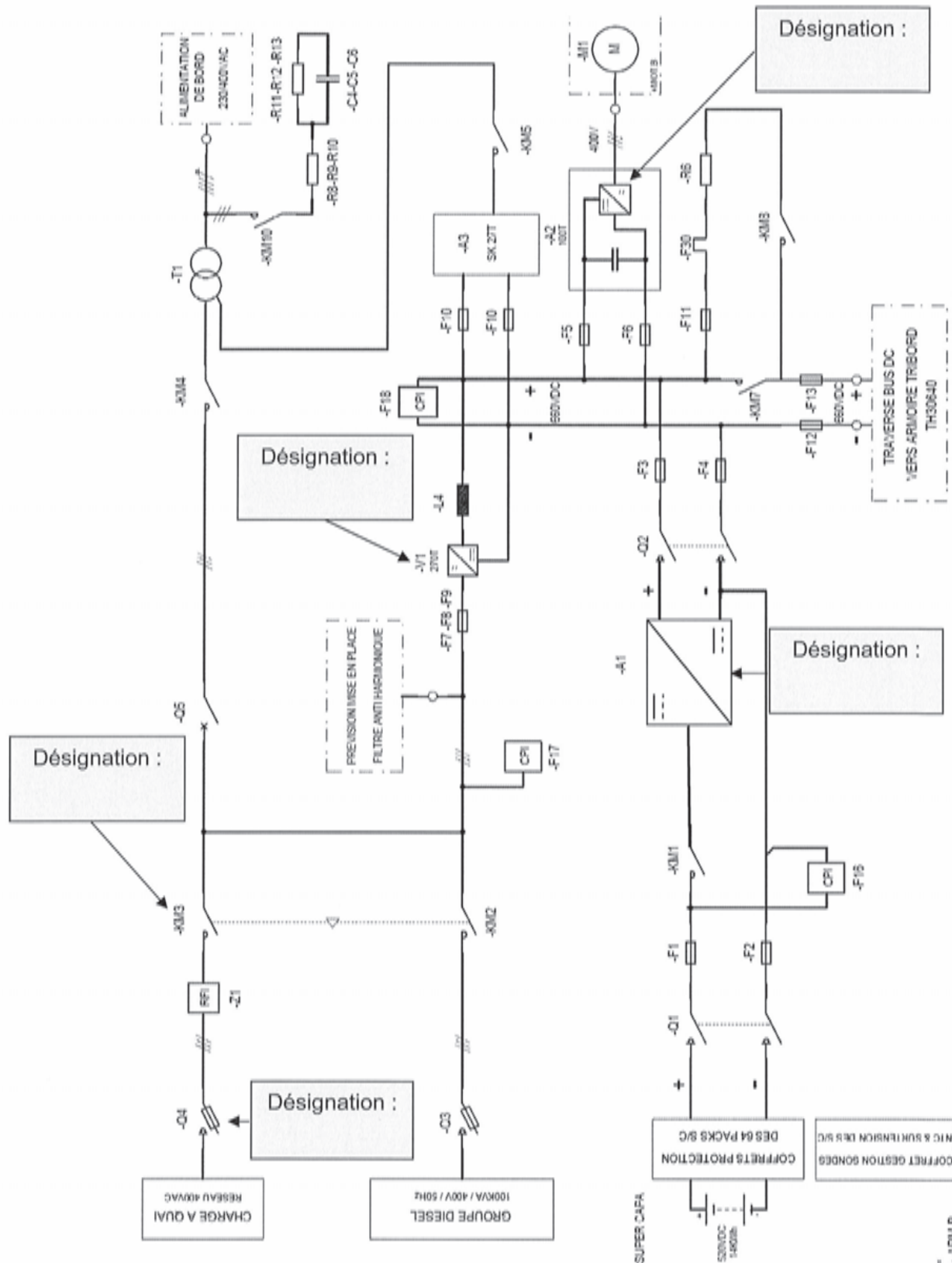
W_T : Total énergie par aller-retour (kW.h)

$W_T =$

Réponses à la question 2 :

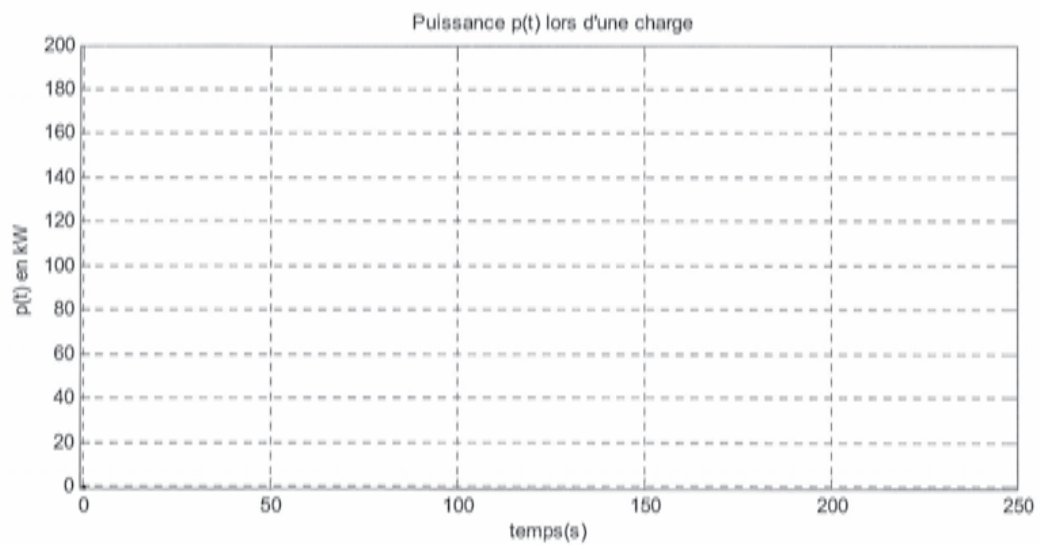
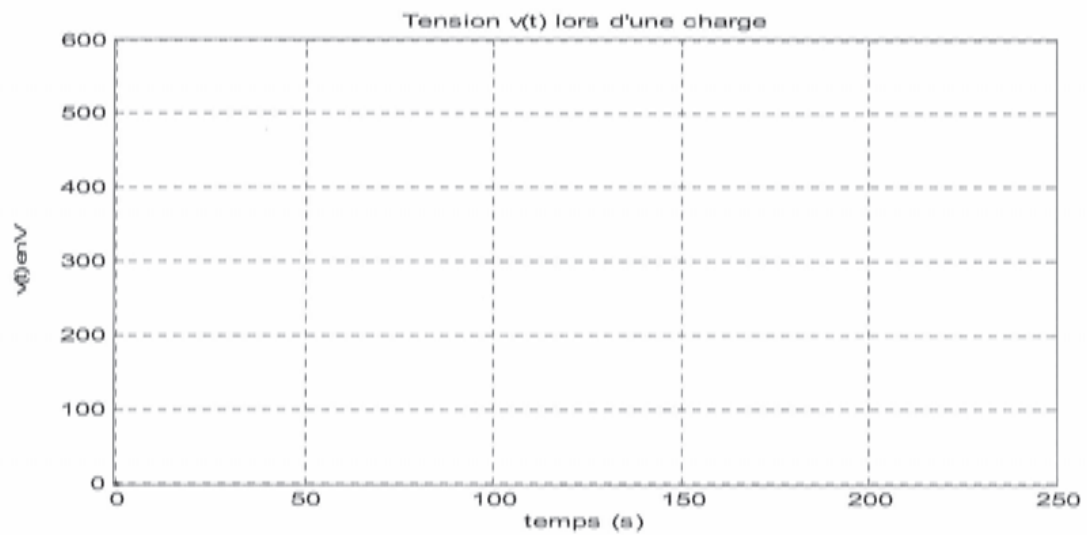
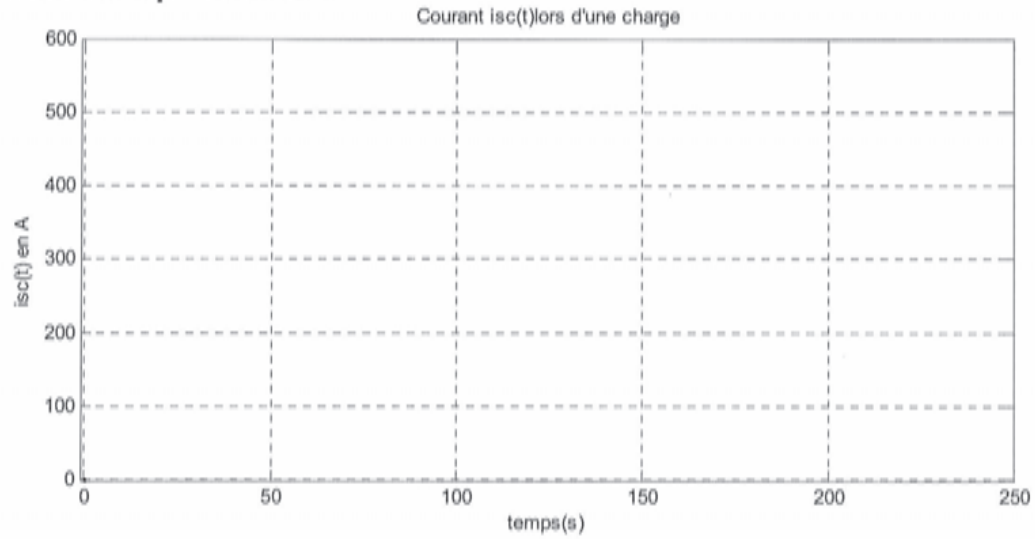
	Pen Mané	rade	avant port	Quai des Indes	avant port	rade	Pen Mané
D : Distances (milles)		0,50	0,30		0,30	0,50	
V_L : Vitesses Loch (nœuds)		8,00	5,00		5,00	8,00	
V_C : Vitesses courant (nœuds)		2,00	0,00		0,00	-2,00	
V_F : Vitesses fond (nœuds)							
Δt : Durées (min)				8,00			
P : Puissances (kW)				15,00			
η : Rendement réducteur et moteur		0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	
P_S : Puissance des servitudes (kW)		10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	
W : Energie consommée (kW.h)							
W_T : Total énergie par aller-retour (kW.h)							

Réponses à la question 30 :



Document-réponse n°3 (DR3)

Réponses à la question 37 :



Modèle ENSD ©NEOPTEC

Nom :
(Suivi, s'il y a lieu, du nom d'épouse)

Prénom :

N° d'inscription :

Né(e) le :

/

/

(Le numéro est celui qui figure sur la convocation ou la feuille d'émargement)

Concours

Section/Option

Epreuve

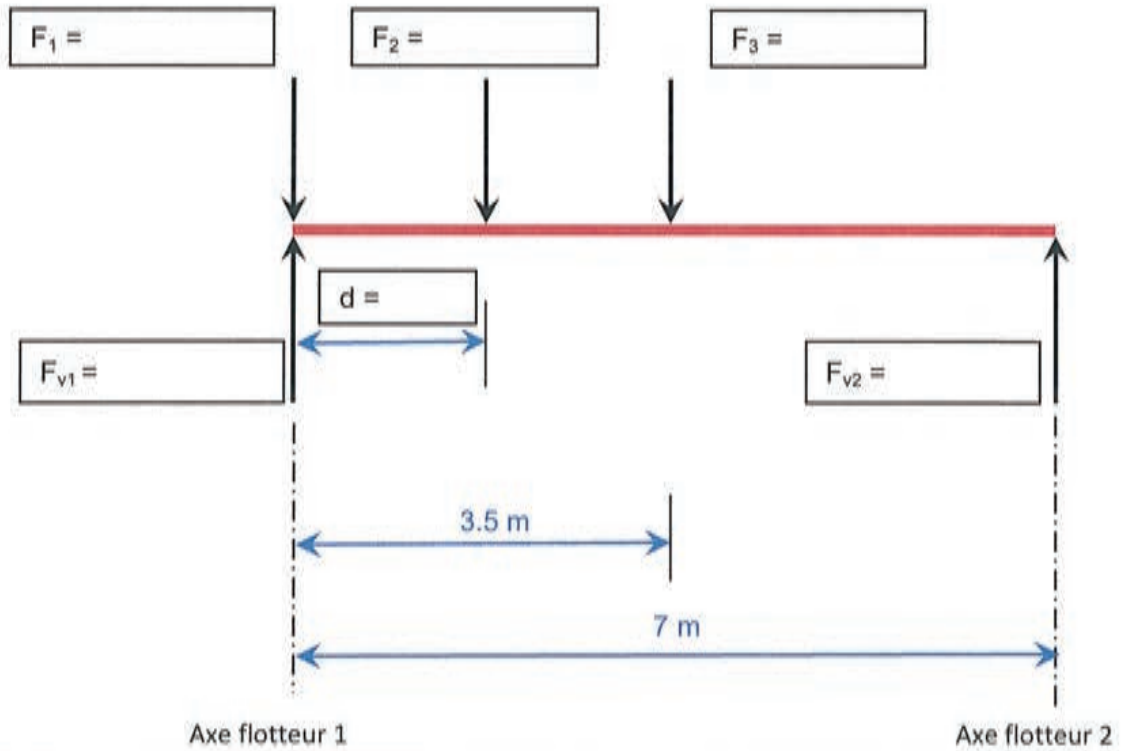
Matière

EAI STI 1

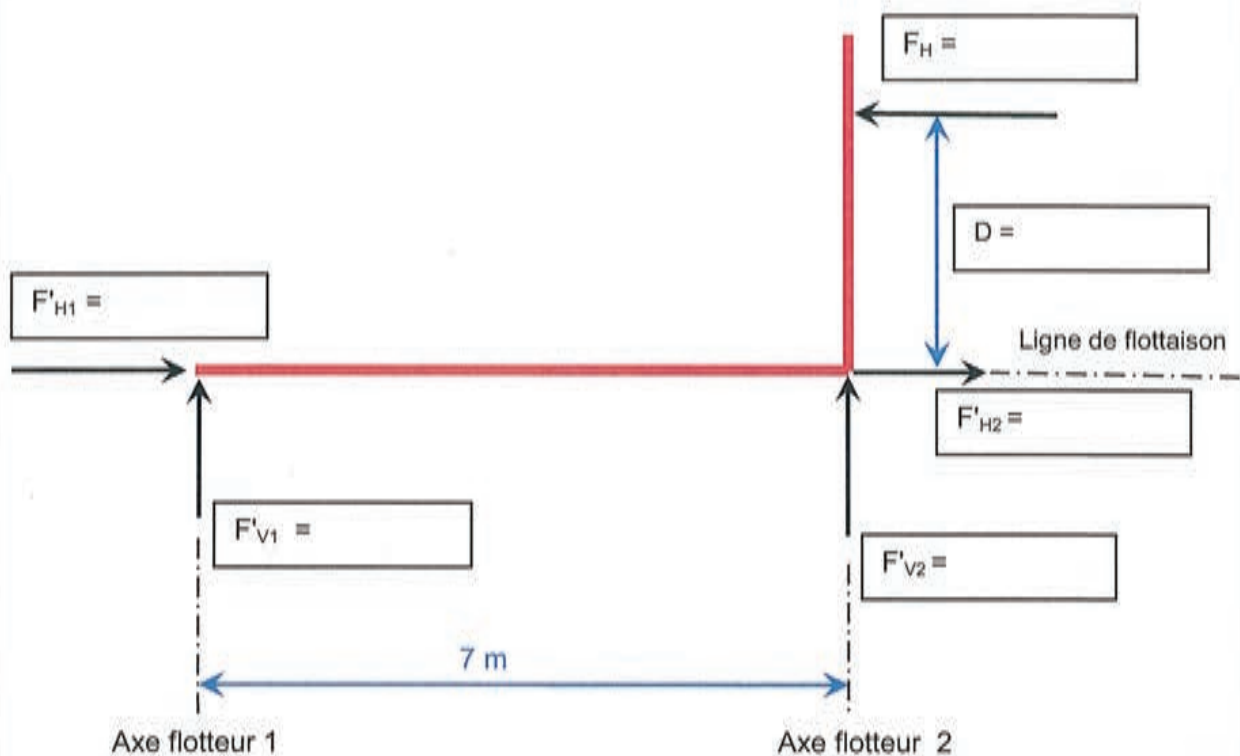
DR 4
DR 5
DR 6

Document-réponse n°4 (DR4)

Réponses à la question 13 :

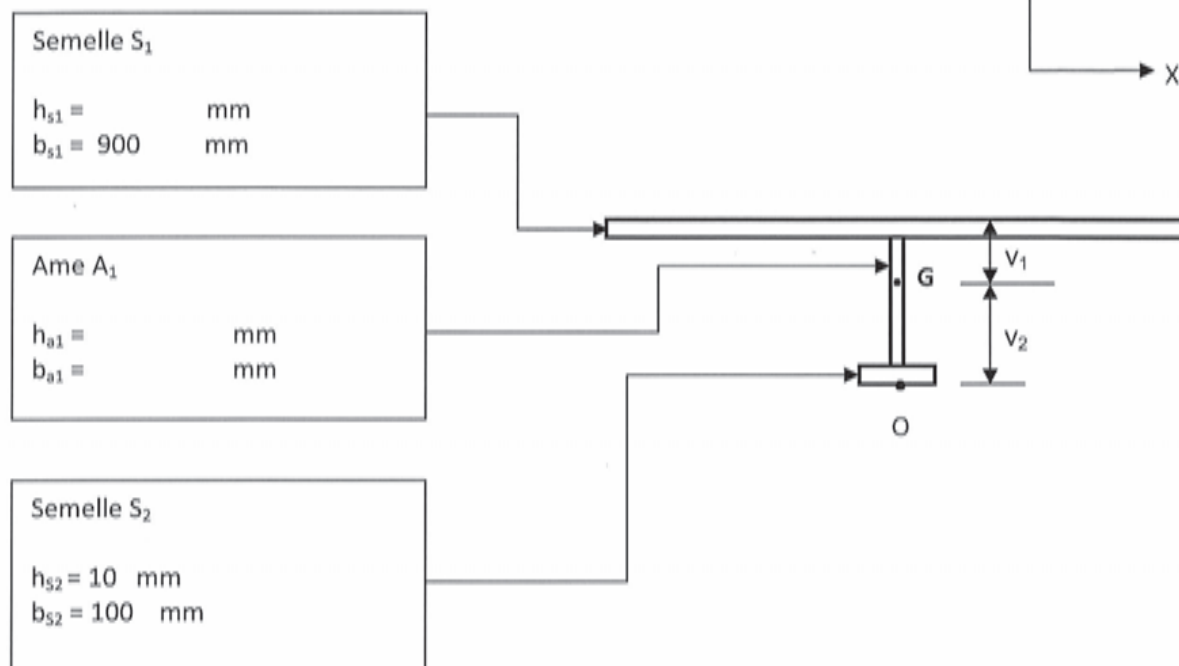


Réponses à la question 17 :



Document-réponse n°5 (DR5)

Réponses à la question 22 :



Réponses à la question 23 :

Aire en m^2	OG en m	I_{Gx} en m^4	v_1 en m	v_2 en m	I_{Gx}/v_1 en m^3	I_{Gx}/v_2 en m^3
	0.128	2,32958E-05				

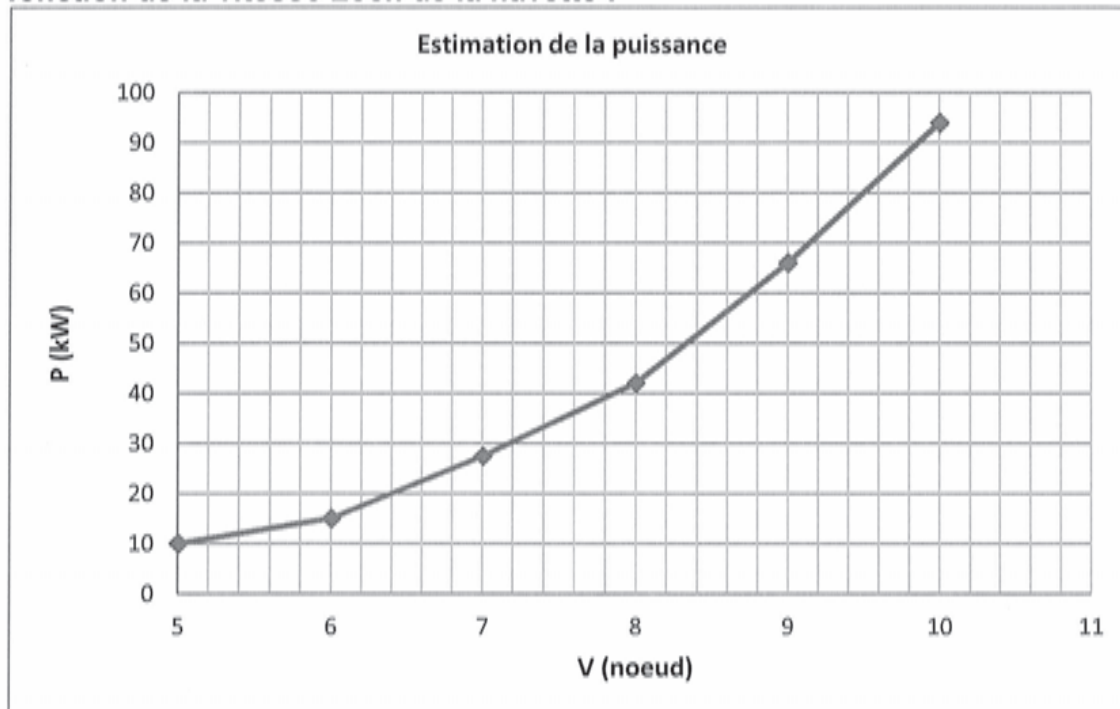
Document-réponse n°6 (DR6)

Réponses à la question 26 :

	Température en °C	Pression en Bar	Enthalpie en KJ /Kg	Etats du fluide	Transformation d'un point à l'autre
Point 1					
Point 2					
Point 3					
Point 4					
Point 5					
Point 6					

DT1

Puissance mécanique totale en amont des hélices des propulseurs azimutaux en fonction de la vitesse Loch de la navette :



Caractéristique de la capacité variable c d'un supercondensateur:

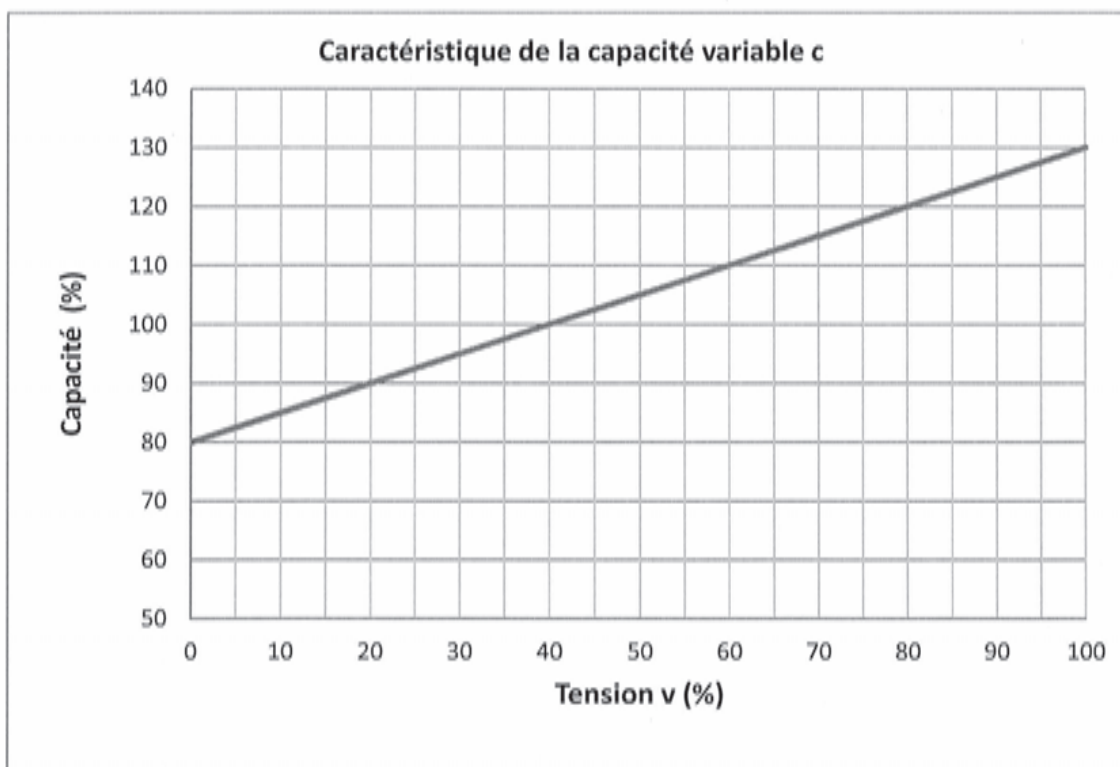


Schéma électrique unifilaire global d'un navire zéro émission :

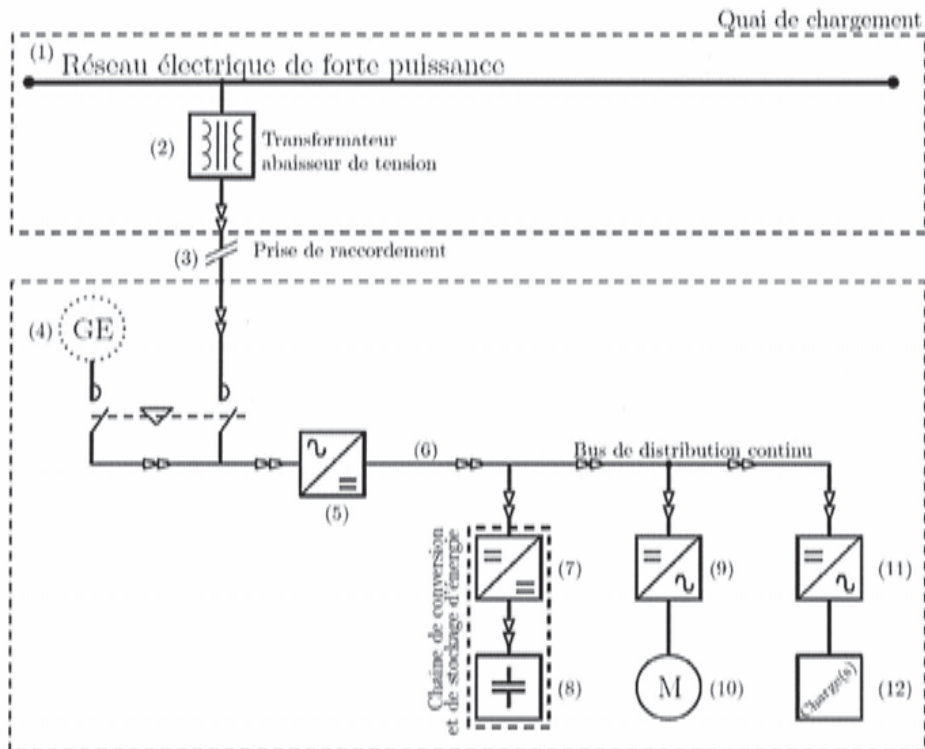
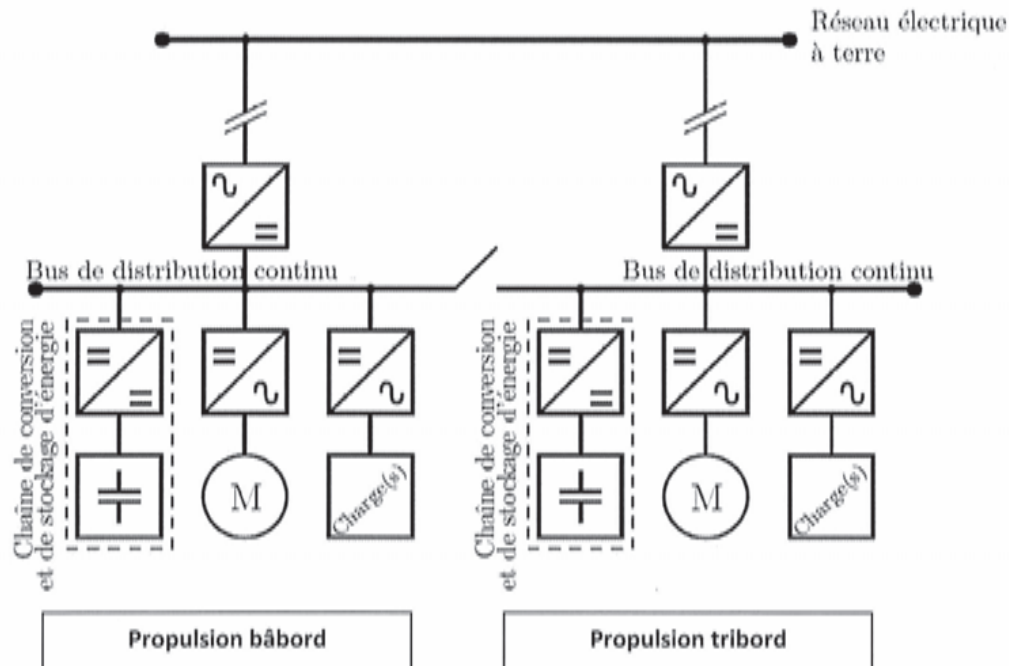
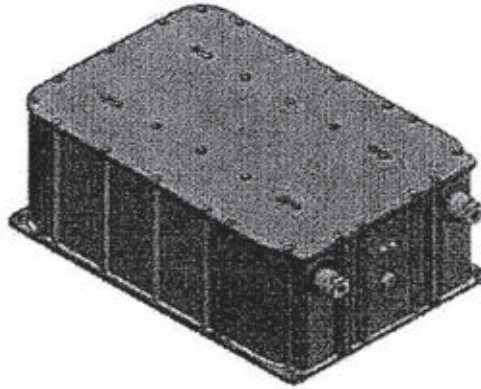


Schéma électrique unifilaire de principe de la navette Ar Vag Tredan :



DT4
Modules de supercondensateurs
M65V375F de BatScap



Specifications :

Electrical characteristics	
Capacitance (F) ⁽¹⁾	375
Voltage (V)	65
Power (10s) (kW) ⁽²⁾	60
Energy (Wh) ⁽³⁾	220
Series resistance ESR (mΩ)	2.6
Time constant (s)	1
Mechanical characteristics	
Length (mm)	630
Width (mm)	403
Height (mm)	205
Volume (without terminals) (l : liter)	52
Weight (kg)	50
Operating conditions	
Operating temperature	-35°C to +65°C
Storage temperature ⁽⁴⁾	-35°C to +70°C

- (1) : Constant current discharge, 25°C
 (2) : Ragone plot power, V_{cutoff} 32.5V, 25°C
 (3) : Total energy stored, V_{cutoff} 0 V, 25°C
 (4) : At $V = 0V$

DT5 RESSOURCES ARCHITECTURE NAVALE

Le navire est construit sur une base catamaran c'est à dire à partir de deux flotteurs reliés ensemble par un ensemble de 16 "barrots" (ou traverses) sur lesquels est soudé le platelage qui supporte tous les équipements de la superstructure (cabine passagers, cabine de pilotage).

D'autres raidisseurs en tôles sont également soudés sous le platelage mais leur rôle se limite à diminuer les risques de voilement du platelage et de renforcer localement pour accueillir des équipements lourds. Ces raidisseurs ne seront pas pris en compte dans notre étude.

L'ensemble est assemblé à partir de tôles d'aluminium découpées, formées puis soudées entre elles

Les cloisons des superstructures sont également construites en tôles d'aluminium de 5 mm, renforcées par des raidisseurs de 6mm d'épaisseur et les toitures (tôles + profilés) en aluminium extrudé (marque Sapa). Elles sont complétées par une isolation incendie par laine de verre Isover Ultimate Wired mat 66 d'épaisseur 40 mm (0,031 W/m.K à 10°C).

Les surfaces vitrées en verre de sécurité trempé (TSG) norme ISO614-21005 ep. 10 mm montés avec pince glace.

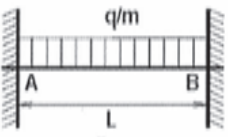
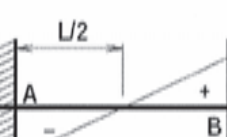
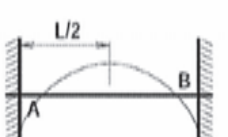
Le confort thermique de la cabine et du poste de pilotage est assuré par une pompe à chaleur Mitsubishi type PQHY-P300YHM-A alimentée comme les autres installations par les panneaux solaires et les batteries du navire. La puissance absorbée du compresseur dans les conditions les plus défavorables est de 37.5 kW.

- Masse du navire est estimée à 80 tonnes réparties en 5 tonnes pour chaque coque et 70 tonnes pour la superstructure
- La capacité du navire est de 150 passagers avec leurs bagages (colis, valises, bicyclettes...). La masse moyenne de chaque passager avec sa charge est évaluée à 100 Kg.
- Aucune pondération ne sera appliquée aux charges.
- Loi d'Archimède $F = V \cdot \rho \cdot g$ avec V volume du solide immergé
- Caractéristiques de l'alliage d'aluminium 5083 utilisé pour la structure :

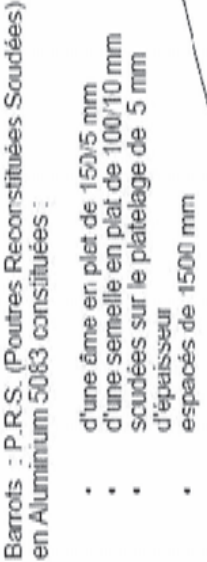
▪ Masse volumique	$\rho = 2\,700 \text{ Kg.m}^{-3}$
▪ Module d'élasticité	$E = 70\,000 \text{ MPa}$
▪ Contrainte élastique	$\sigma_e = 190 \text{ MPa}$
▪ Contrainte maximale à la rupture	$\sigma_r = 300 \text{ MPa}$

Autres données :

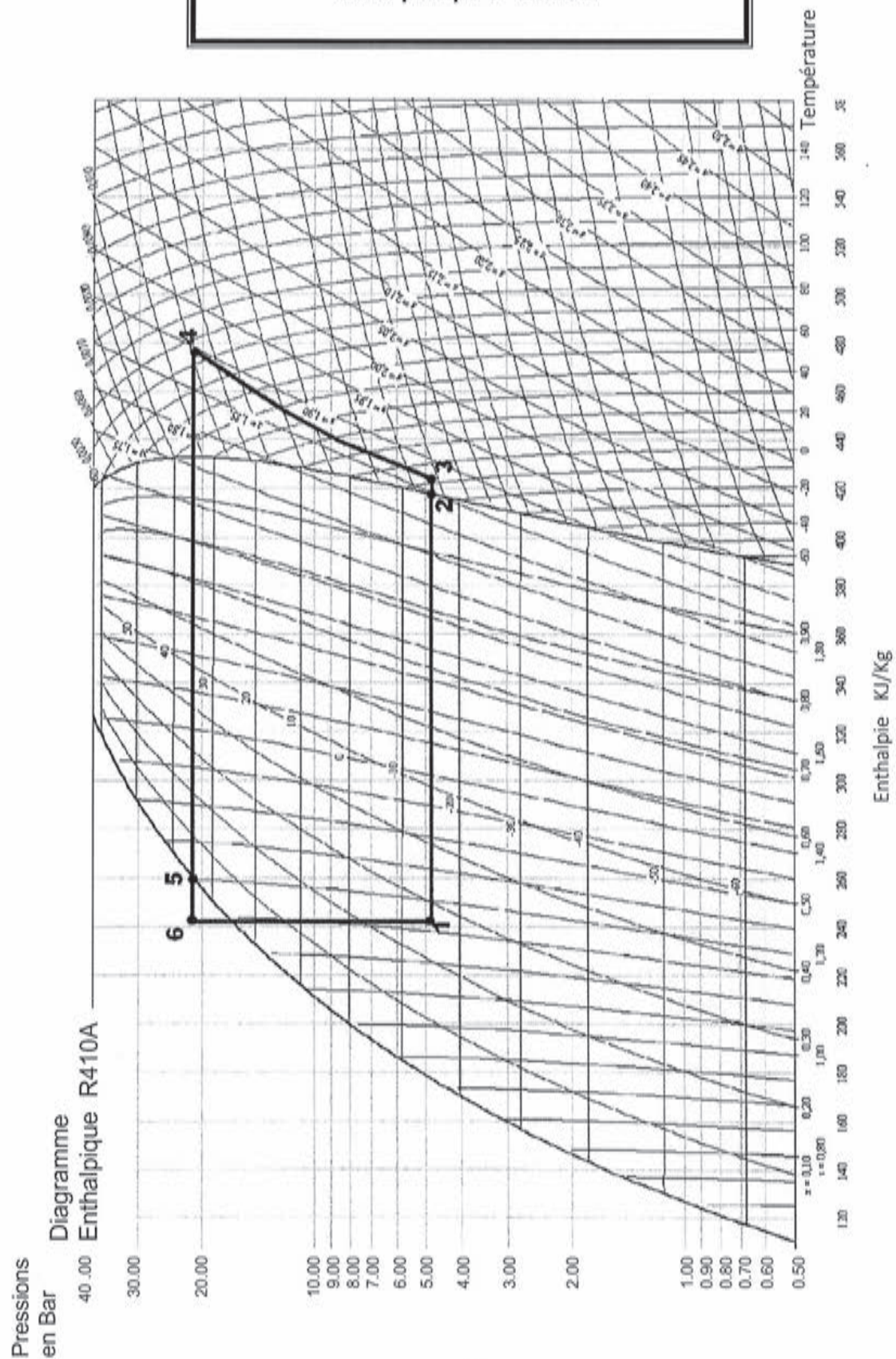
- 1 bar = 1 daN.cm⁻²
- Masse volumique de l'eau de mer $\rho = 1025 \text{ Kg.m}^{-3}$
- Accélération due à la pesanteur : $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$
- Formulaire :

 $R_{Ay} = \frac{q \cdot L}{2}$ $R_{By} = \frac{q \cdot L}{2}$ Charge uniformément répartie	 $V_A = -R_{Ay}$ $V_B = R_{By}$	 $M_A = -\frac{qL^2}{12}$; $M_B = -\frac{qL^2}{12}$	Pour $x=L/2$: $V = 0$ $M_0 = \frac{qL^2}{24}$ $f = \frac{qL^4}{384EI}$
--	---	---	---

DT6 Modélisation du navire



DT7
Diagramme enthalpique et cycle du fluide
de la pompe à chaleur



DT8

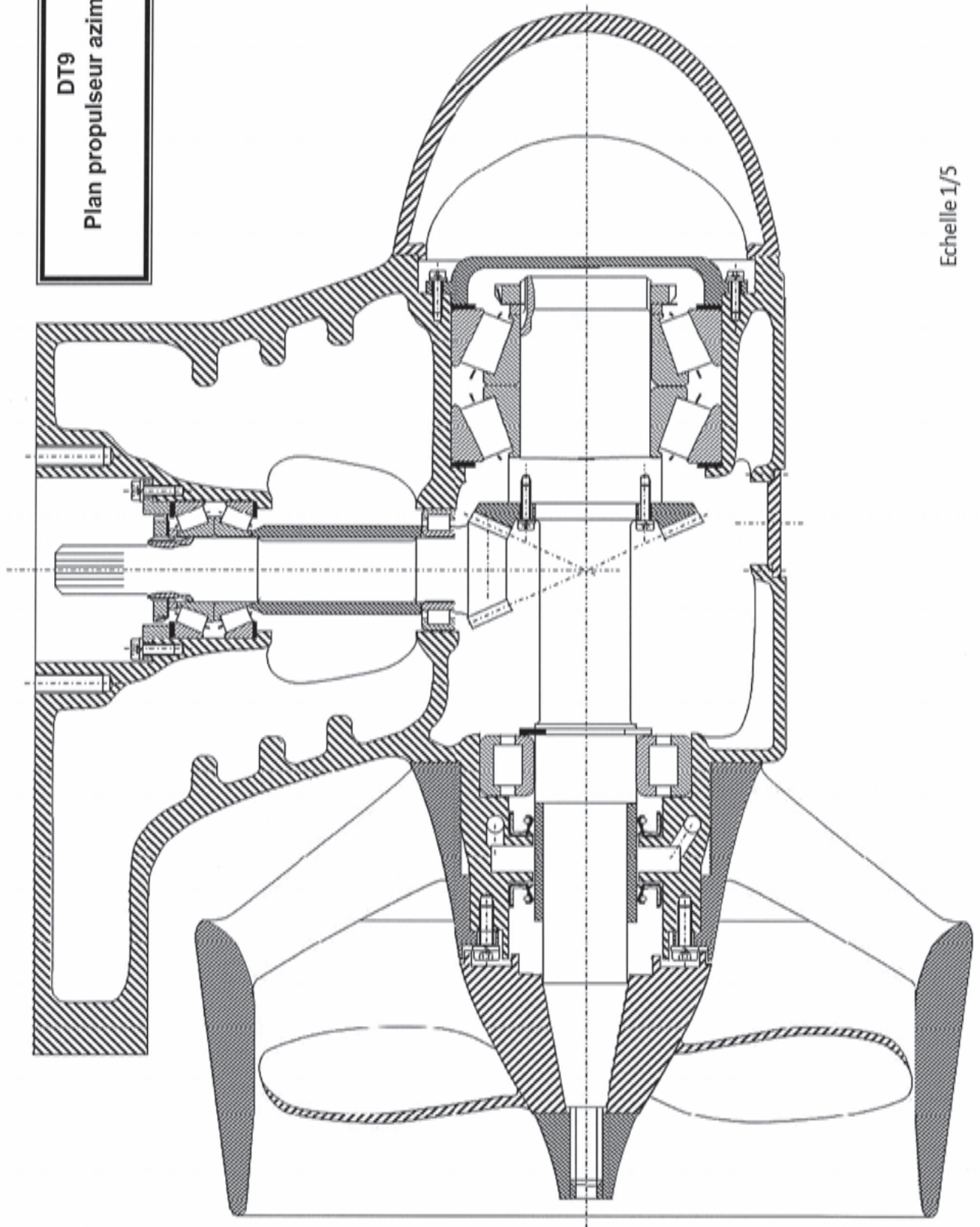
Extrait du CCTP « Fourniture d'un navire à passagers « zéro émission » ou « émission minimale » pour le réseau de transports collectifs urbains » émis par la communauté d'agglomération du pays de Lorient.

ANNEXE N°1 AU CCTP

LIGNES	DISTANCE ALLER- DISTANCE JOURNALIERE	TEMPS DE TRAVERSEE	TEMPS EMBARQUEMENT DEBARQUEMENT	VITESSE ACTUELLE	CAPACITE REQUISE	NB ROTATIONS QUOTIDIENNES (AR)	AMPLITUDE HORAIRE DU SERVICE
Ligne 10 semaine Pen Maré (Lorient) Quai des Indes (Lorient)	0.85 milles 47,6	7mn	4mn fonction du temp.	10 NOEUDS		28	6h33 20h26
Ligne 11 semaine La Pointe (Port-Louis) port de Pêche (Lorient)	1.3 milles 72,8	11mn	4mn fonction du temp.	10 NOEUDS		28	5h45 20h12
Ligne 12 semaine Site cathérine (Lorient) Port de Pêche (Lorient)	0.6 milles 28,8	6mn	4mn fonction du temp.	10 NOEUDS		24	5h20 8h50 18h30 18h28
Ligne 13 semaine Embarcadere (Gihres) Lorient (Port-Louis)	0.4 milles 21,6	4mn	4mn fonction du temp.	10 NOEUDS		27	6h27 18h59
Ligne 14 dimanches et jours fériés La Pointe (Port-Louis) Pen Maré (Lorient) Quai des Indes (Lorient) complément estival	2.5 milles 45	27mn	4mn fonction du temp.	10 NOEUDS		9	9h30 12h26 13h45 18h41
Ligne 15 semaine Quai des Indes (Lorient) Cité de la Voile (Lorient) Kermével (Lorient-Plage) La Pointe (Port-Louis)	3.3 milles 30	44mn	4mn fonction du temp.	10 NOEUDS		4 1/2	12h45 20h34

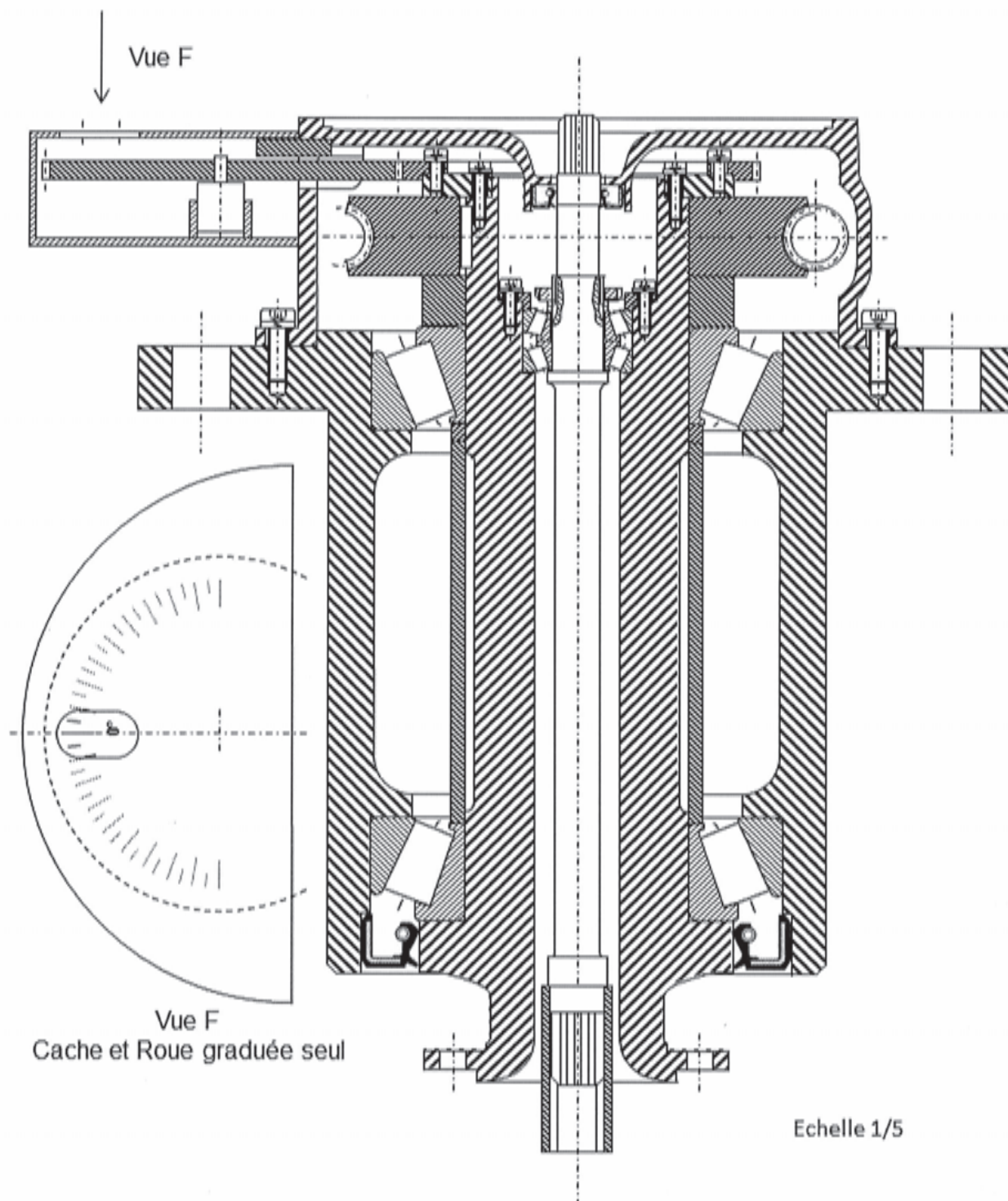
Rappel 1 mille = 1852 m, autonomie nécessaire > 135 Km pour la ligne 11; > 90 Km pour la ligne 10

DT9
Plan propulseur azimuthal 1/2



Echelle 1/5

DT10
Plan propulseur azimutal 2/2



DT11

Calcul de durée de vie des roulements

Charge dynamique équivalente P

$$P = X \cdot F_r + Y \cdot F_a$$

X et Y = facteurs de charge définis dans le tableau ci-dessous
 F_a et F_r = efforts axial et radial appliqués au roulement

Type	Coupe	Série	Angle de contact	F_a/C_0	e	$F_a / F_r \leq e$		$F_a / F_r > e$	
						X	Y	X	Y
Roulements à rouleaux coniques		302-303-313 320-322-322.B 323-323.B 330-331-332			voir liste des Roulements	1	0	0,40	voir liste des Roulements

Calcul d'un arbre monté sur 2 roulements à contact angulaire

→ Equilibre radial de l'arbre

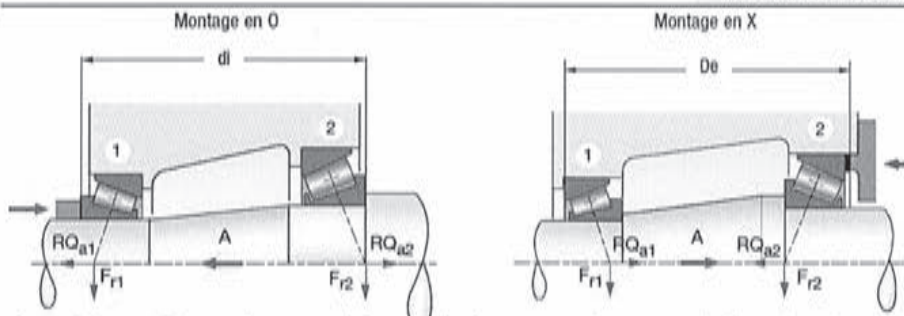
■ Calcul des efforts radiaux F_{r1} et F_{r2} appliqués aux points d'applications des charges des roulements par équilibre radial statique de l'arbre.

→ Equilibre axial de l'arbre

■ Les chemins de roulements à contact angulaire étant inclinés, les charges radiales F_{r1} et F_{r2} produisent une force de réaction axiale dite force axiale induite.

Si le roulement 1 est celui dont la force axiale induite a le sens de la force axiale extérieure A, l'équilibre de l'arbre est :

$$A + RQ_{a1} = RQ_{a2}$$



Avec RQ_{a1} et RQ_{a2} : charges axiales appliquées aux roulements calculées dans les tableaux ci-dessous :

» Cas de charge :

$$A + (F_{r1} / 2 Y_1) > (F_{r2} / 2 Y_2)$$

le roulement 1 fonctionne avec du jeu

	Roulement 1	Roulement 2
Charge axiale appliquée	$RQ_{a1} = F_{r1} / 2 Y_1$	$RQ_{a2} = A + (F_{r1} / 2 Y_1)$
Charge axiale utilisée dans le calcul de la charge dynamique équivalente	$F_{a1} = 0$	$F_{a2} = RQ_{a2}$

» Cas de charge :

$$A + (F_{r1} / 2 Y_1) < (F_{r2} / 2 Y_2)$$

le roulement 2 fonctionne avec du jeu

	Roulement 1	Roulement 2
Charge axiale appliquée	$RQ_{a1} = (F_{r2} / 2 Y_2) - A$	$RQ_{a2} = F_{r2} / 2 Y_2$
Charge axiale utilisée dans le calcul de la charge dynamique équivalente	$F_{a1} = RQ_{a1}$	$F_{a2} = 0$