

LYCÉE LA MARTINIÈRE MONPLAISIR LYON

SCIENCES INDUSTRIELLES POUR L'INGÉNIEUR

CLASSE PRÉPARATOIRE M.P.S.I. ET M.P.I.I.

ANNÉE 2024 - 2025



C1 : MODÉLISATION DES SYSTÈMES PLURITECHNIQUES

## TD 3 - Notions de grandeurs physiques (C1-4)

### Compétences

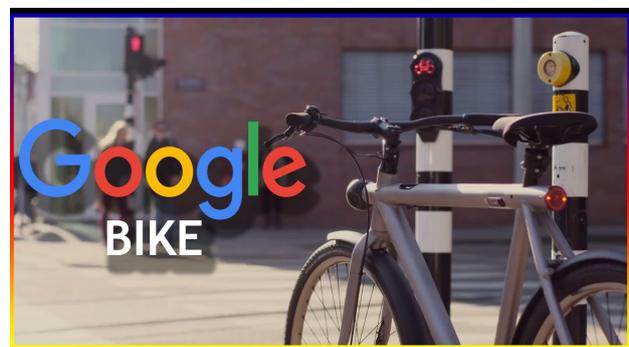
- **Analyser**
  - Extraire un indicateur de performance pertinent à partir du cahier des charges ou de résultats issus de l'expérimentation ou de la simulation : ordres de grandeurs, unités, grandeurs physiques
- **Modéliser**
  - Identifier les grandeurs d'entrée et de sortie d'un modèle.
  - Identifier les paramètres d'un modèle.
  - Associer un modèle aux composants des chaînes fonctionnelles.
- **Communiquer**
  - Utiliser un vocabulaire technique, des symboles et des unités adéquats.

## Exercice 1 : Analyse et spécification globale du vélo autonome

**Source :** Emilien DURIF

### 1 Présentation générale

On souhaite donner des spécifications globales permettant de concevoir un vélo autonome. Le diagramme des exigences concernant uniquement l'exigence du déplacement autonome est donné sur la figure 1. On se propose ici de déterminer le profil de vitesse permettant de remplir les exigences listées dans le tableau ci-dessous.



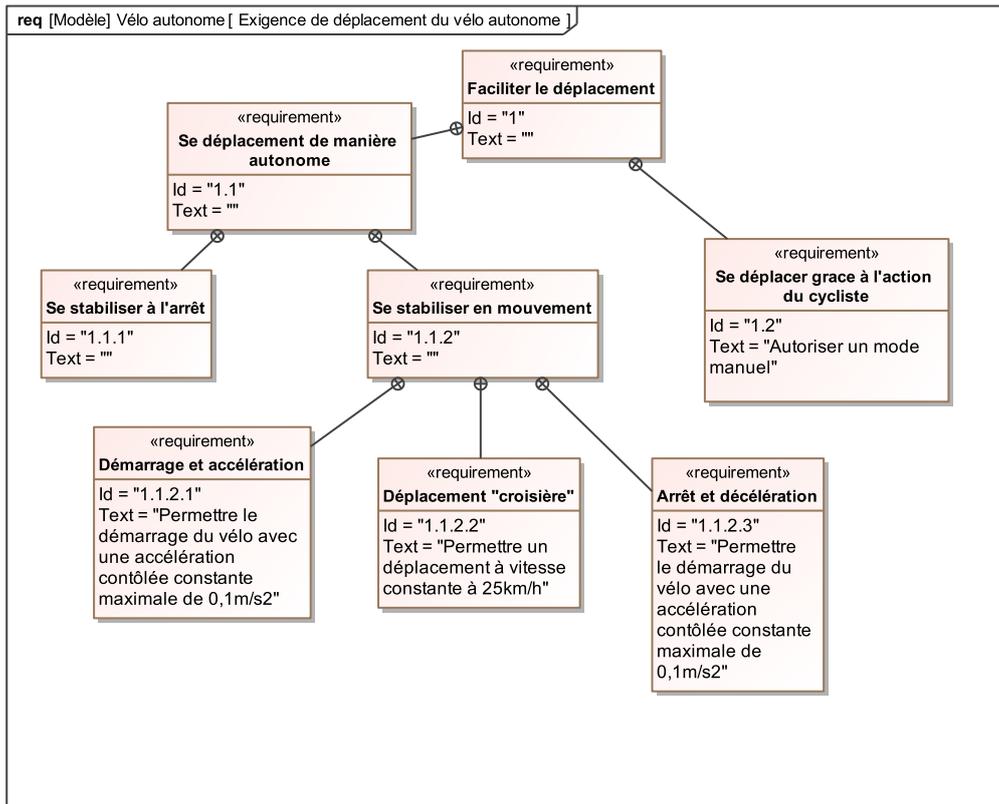


FIGURE 1 – Diagramme des exigences partiel concernant le déplacement autonome du vélo

1.1.2 Se stabiliser en mouvement		
Critère	Niveau	Flexibilité
Accélération et décélération maximale	$ a_{max}  = 0,1 \cdot g = 0,981 m \cdot s^{-2}$	Maxi en valeur absolue
Vitesse maximale en croisière	$V_{max}$	25km/h
Durée pour se déplacer de 10m	$t_f$	?
Stabilisation vertical	inclinaison par rapport à la vertical	$< 1^\circ$
1.1.1 Se stabiliser à l'arrêt		
Stabilisation vertical	inclinaison par rapport à la vertical	$< 1^\circ$

## 2 Vérification de l'exigence 1.1.2 : stabilisation en mouvement

On donne les caractéristiques du moteur utilisé pour la propulsion.

Grandeur	Valeur
Vitesse maximal sans chargement	$N_{max} = 320 tr/min$
Couple maxi	$C_{maxi} = 21,6 \cdot N \cdot cm$
Diamètre des roues utilisées	$D_r = 9cm$



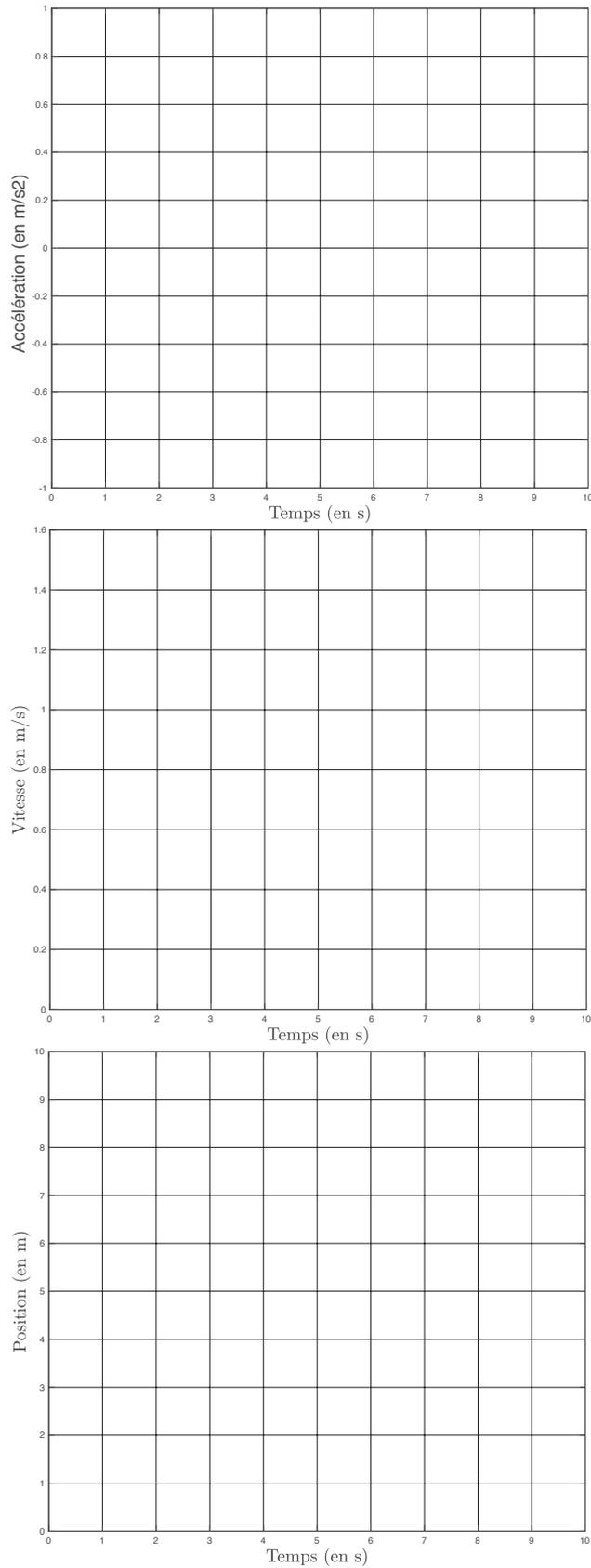
On propose d'utiliser un profil de vitesse en trapèze avec la même durée d'accélération et de décélération.

**Q 1 : Décrire pourquoi ce profil de vitesse est intéressant.**

**Q 2 : Déterminer la durée d'accélération notée  $t_a$  en supposant que l'on souhaite atteindre la vitesse maximale imposée par le moteur avec une accélération maximale.**

**Q 3 : Déterminer la durée qu'il faut pour atteindre la distance de 10m avec ce profil de vitesse.**

**Q 4 : Tracer sur la figure suivante les profils d'accélération, vitesse et position obtenues avec les caractéristiques déterminées précédemment.**



On souhaite déterminer que le moteur soit correctement dimensionné pour fournir l'accélération maximal. On

peut montrer que l'on peut relier l'accélération (notée  $a(t)$ ) en translation du vélo au couple à fournir par le moteur ( $C_m(t)$ ) avec la relation suivante (en négligeant l'inertie des roues) :

$$\frac{2C_m(t)}{D_r} = m \cdot a(t)$$

**Q 5 : Déterminer la masse maximale que peut déplacer le moteur en translation.**

On note  $m$  la masse du vélo et le  $D_r$  le diamètre des roues. Pour un vélo à échelle 1 on donne  $D_{r0} = 58cm$  et  $m_0 = 10kg$ .

**Q 6 : Sachant que l'on souhaite réaliser un vélo à échelle réduite avec des roues de diamètre  $D_r = 9cm$ . Donner le facteur d'échelle  $\lambda = \frac{D_r}{D_{r0}}$ . Quelle en serait la répercussion sur la masse en utilisant le même matériau? Faire l'application numérique.**

### 3 Vérification de l'exigence 1.1.1 : stabilisation à l'arrêt

L'objectif est de déterminer les conditions pour assurer l'équilibre du vélo ( $S_1$ ) à l'aide de la roue à réaction ( $S_2$ ). On note :

- $A$  est le point de contact entre la roue et le sol et correspond au point de rotation du vélo par rapport au sol.
- $B$  est le centre de la roue  $S_2$ .
- $m$  et  $G$  respectivement la masse et le centre de masse du vélo avec la roue à réaction ( $S_1+S_2$ ).
- $L_1 = \|\vec{AG}\|$  et  $L_2 = \|\vec{AB}\|$ .
- $I_1$  est le moment d'inertie de la roue à réaction autour de l'axe ( $A, \vec{z}_1$ ) et  $m_1$  est sa masse.
- $I_2$  est le moment d'inertie de la roue à réaction autour de l'axe ( $B, \vec{z}_1$ ) et  $m_2$  est sa masse.
- $\theta$  est l'angle de rotation du vélo autour de  $\vec{z}_0$  par rapport à l'axe vertical.
- $\varphi$  est l'angle de rotation de la roue à réaction  $S_2$  par rapport au vélo  $S_1$ .
- $\vec{g}$  est dirigé selon  $-\vec{y}_0$ .
- $M(A, poids \rightarrow S_1+S_2)$  est le moment de l'action du poids sur ( $S_1+S_2$ ).

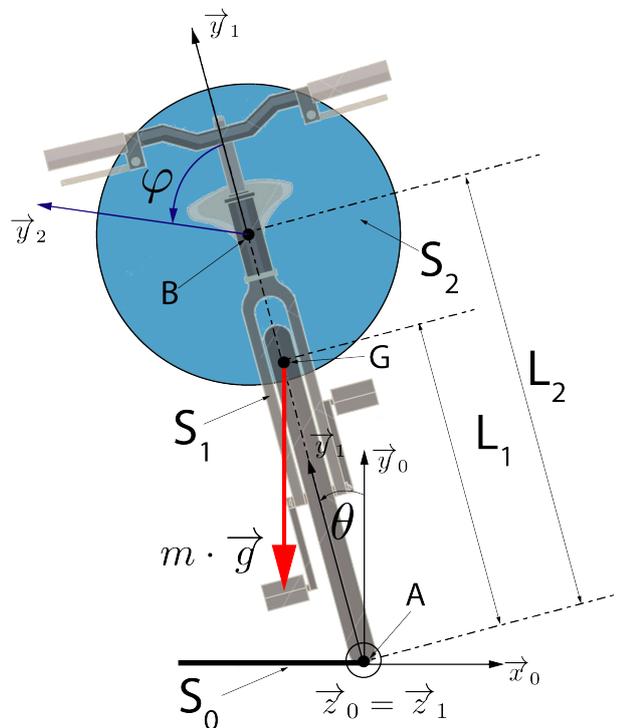


FIGURE 2 – Paramétrage du problème

L'application du théorème du moment dynamique selon l'axe ( $A, \vec{z}_0$ ) donne :

$$(I_1 + m_2 \cdot L_2^2) \cdot \ddot{\theta} + I_2 \ddot{\varphi} = M(A, poids \rightarrow S_1 + S_2)$$

**Q 7 : A l'aide de la figure 2, déterminer le bras de levier du moment de l'action du poids sur ( $S_1+S_2$ ) en fonction de  $L_1$  et  $\theta$ . En déduire  $M(A, poids \rightarrow S_1 + S_2)$ .**

$S_2$  est un cylindre de révolution de diamètre  $D_2 = 9,9cm$  et masse  $m_2 = 75g$ .

**Q 8 : Déterminer  $I_2$ .**

**Q 9 : Donner une condition sur  $\ddot{\theta}$  pour que le vélo se redresse par rapport à la configuration donnée sur la figure ci-dessus avec le vélo supposé posé sur une béquille avec un angle  $\theta = \theta_0 = 10^\circ$ . En déduire une condition sur  $\ddot{\varphi}$  en fonction des paramètres du problème.**

On prendra dans un premier temps comme approximation  $L_1 = D_r$  ce qui revient à dire que le centre de gravité  $G$  du vélo se situe juste au dessus des roues. On prendra une masse du vélo souhaité de  $m = 500g$ .

On donne les caractéristiques du moteur utilisé pour la roue à réaction.

Grandeur	Valeur
Vitesse maximal sans chargement	$N_{max} = 7500 \text{ tr/min}$
Couple maxi	$C_{maxi} = 1,47 \cdot N \cdot \text{cm}$



**Q 10 :** Donner en justifiant une relation entre  $\dot{\varphi}$ ,  $I_2$  et le couple moteur de la roue à réaction  $C_{m2}$ . Avec la valeur de  $\dot{\varphi}$  déterminée précédemment en déduire si le moteur sera capable de redresser le vélo.

## Exercice 2 : Analyse de la propulsion du voilier

**Source :** Concours général des lycées STI 2016 - Equipe PTSI La Martinière Monplaisir

### 1 Présentation

Le voilier spécifié est équipé d'une propulsion hybride. Cette propulsion repose sur deux moteurs électriques actionnant chacun une hélice; les moteurs sont alimentés en énergie par des batteries et/ou par un groupe électrogène. Les moteurs permettent également un fonctionnement générateur pour recharger les batteries. La commande des 2 moteurs est indépendante; elle s'effectue depuis le poste de pilotage par 2 manettes de commandes.



#### Objectif 1 :

L'objectif de cette partie est de vérifier certaines caractéristiques de la propulsion motorisée du voilier et de justifier le choix des batteries.

### 2 Identification des flux d'énergie et des fonctions relatives à la propulsion motorisée

**Q 11 :** Le voilier étudié doit pouvoir être propulsé autrement que par ses voiles. Citer la raison et préciser les exigences d'autonomie en termes de distance et de durée de fonctionnement motorisé (voir diagramme d'exigence sur la propulsion motorisée DT1 en annexe.).

Les moteurs peuvent être utilisés selon 3 modes :

- Mode 1 : Moteurs alimentés par l'énergie des batteries seulement.
- Mode 2 : Moteurs alimentés par le groupe électrogène.
- Mode 3 : « Moteurs » en fonctionnement générateur, lorsque la propulsion à voile permet d'entraîner les hélices pour charger les batteries.

Q 12 : Sur le document réponse, surligner (en précisant le sens du flux) le flux d'énergie correspondant au mode 1 en bleu, le flux d'énergie correspondant au mode 2 en trait interrompu (=pointillé) bleu et le flux d'énergie correspondant au mode 3 en vert.

Q 13 : Compléter les fonctions proposées sur le document réponse (F1 à F6) sous les blocs correspondants.

a) Vérification du choix de batteries

*Vérification de la tension de fonctionnement*

Q 14 : A l'aide des caractéristiques des constituants (voir DT2 à DT5), vérifier que la tension de fonctionnement du pack de batterie est compatible avec la tension de sortie du groupe électrogène ainsi qu'avec la tension d'alimentation des moteurs et des variateurs de vitesse.

*Vérification du courant nominal* Q 15 : Vérifier que le pack de batterie peut fournir le courant nominal pour alimenter les 2 moteurs ST 74. On se placera sans « active cooling ».

*Vérification de l'autonomie* L'étude considère que le déplacement du voilier est rectiligne, à vitesse établie à 2.5 m/s, en propulsion motorisée seule (sans voile)

Q 16 : Sur le DT6, relever l'effort de traînée du voilier (force de résistance à l'avancement du voilier) lorsque celui-ci se déplace à  $2.5 \text{ m s}^{-2}$ . En déduire la force que doit exercer une hélice.

Q 17 : A l'aide de la caractéristique d'une hélice (voir DT7), déduire :

- la vitesse de rotation  $N$  (tr/min) ;
- le couple résistant  $C$  (en Nm) sur l'arbre d'une hélice à cette vitesse.

Q 18 : Exprimer la puissance mécanique de l'hélice  $P_h$  en fonction du couple et de la vitesse de rotation. Calculer ensuite cette puissance.

Q 19 : Le rendement des moteurs étant de 87%, vérifier que la puissance consommée  $P_m$  par les 2 moteurs dans ces conditions est de l'ordre de 2000W.

Q 20 : Vérifier que le pack de batteries (DT3) permet d'avoir la durée de fonctionnement spécifiée au cahier des charges. (On considérera que pour la propulsion motorisée sans voile à une vitesse de  $2,5 \text{ m.s}^{-1}$ , le pack de batteries doit fournir 2100W).

*Identification des critères de choix*

Q 21 : Le tableau (DT8) présente les caractéristiques de différents types de batteries. Classer selon 3 niveaux (prioritaire, moyennement prioritaire, secondaire) ces caractéristiques (Energie massique, Nombre de cyclage, Prix, Sécurité) qui ont amené à choisir le modèle Lithium-Fer-Phosphate.

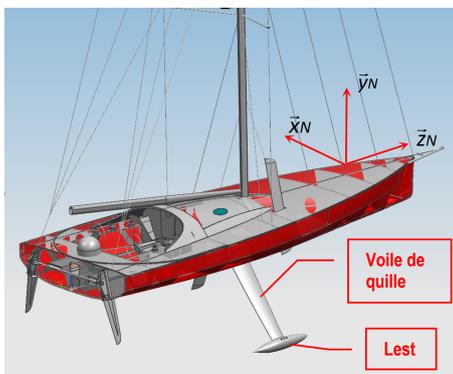
### 3 Etude du système de quille pendulaire

a) Présentation

Afin de ne pas se retourner lorsque le vent pousse sur les voiles, les voiliers monocoques sont munis d'un lest qui tend à redresser le navire. Afin d'obtenir une puissance vélique supérieure, certains modèles de compétition disposent d'une quille (élément qui supporte le lest) mobile. Cela permet aussi au plan de voilure d'être établi à un angle plus proche de la verticale qui est meilleur pour les performances aérodynamiques.

*Vélique = qui se rapporte aux voiles d'un navire*

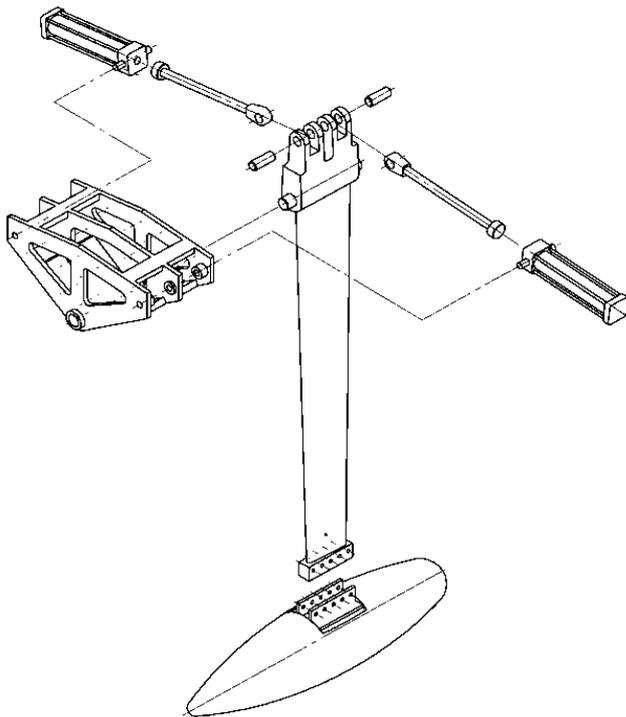
*Effort vélique = effort sur la voile*



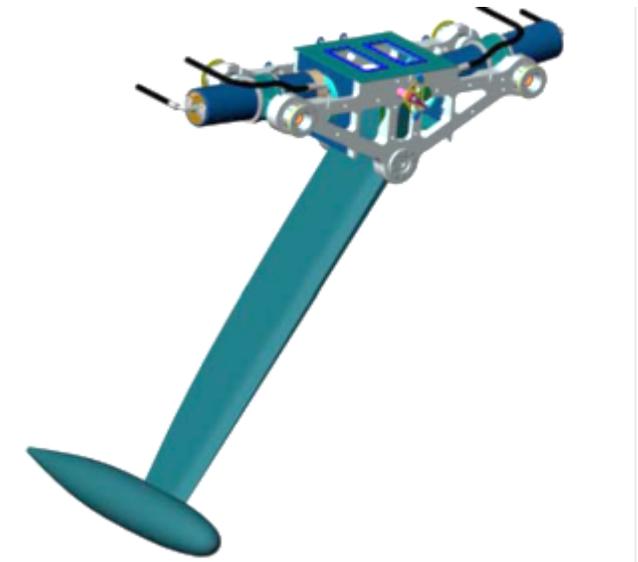
La quille est manœuvrée par deux vérins hydrauliques. Chacun d'eux est piloté par une servovalve de débit. Ce composant délivre un débit  $q(t)$  proportionnel à sa tension de commande  $v(t)$ .

L'angle de rotation de la quille par rapport au bâti est mesuré par un capteur potentiométrique.

Une barre de liaison montée sur roulement à bille permet de transmettre l'action du vérin au voile de quille. Une carte électronique à microcontrôleur est utilisée pour exécuter le programme de contrôle. Le marin dispose d'une télécommande sans fil pour envoyer les requêtes de mouvement et dispose d'un afficheur LCD pour contrôler l'état et la position de la quille. Un système d'accumulateur hydraulique permet d'emmagasiner du fluide sous pression en prévision du mouvement. Une pompe électrohydraulique remplit ces accumulateurs.



Représentation éclatée de l'ensemble



Modèle CAO

### b) Chaîne d'énergie

**Q 22 : Réaliser le schéma fonctionnel présentant la chaîne d'énergie et la chaîne d'information du système de quille pendulaire avec la fonction de chaque élément.**

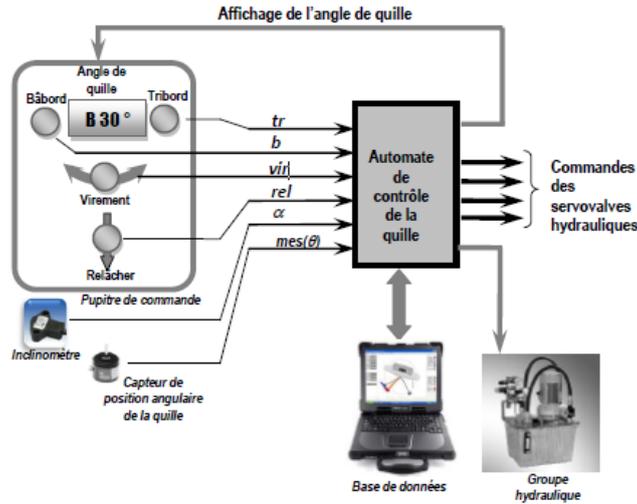
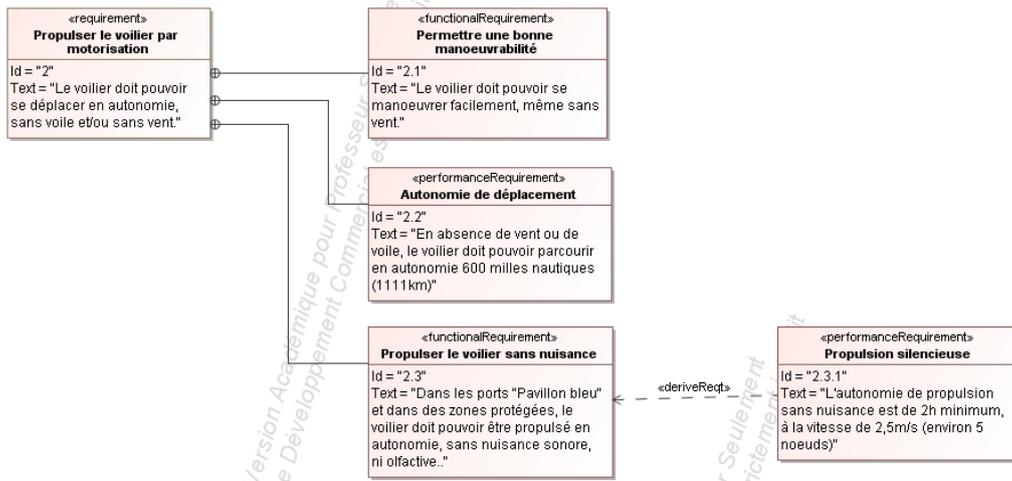


FIGURE 3 – Structure de la commande

#### 4 DOCUMENTS TECHNIQUES

##### a) DT1 : Diagramme d'exigences « propulser le voilier par motorisation »



##### b) DT2 : Moteur électrique type ST 74



Moteur ST 74	
Type	Brushless
Puissance de sortie	9 kW
Vitesse nominale	860 tr · min <sup>-1</sup>
Couple nominal	100 Nm
Tension continue	144 V
Courant nominal	64 A
Masse	65 kg

## c) DT3 : Pack de batteries



Le pack est constitué de 45 cellules LiFePO4 Lithium-Fer-Phosphate type IB-B-FHE-160, associées en série. Un circuit électronique gère la charge et la décharge en surveillant l'état de chaque cellule.

Caractéristiques du pack de batterie	
Capacité nominale	23kWh

LiFePO4 Packaged Cells		
Specification	Condition	IB-B-FHE-160
Nominal Voltage	(C/3)	3.2 Volts
Nominal Capacity	(C/3)	160 Ah
Nominal Energy	(C/3)	512 Wh
Specific Energy	(C/3)	94 Wh/Kg
Self-Discharge Rate	Monthly, RT	<3%
Cycle Life @ 25 °C	100% DOD	>2000 Cycles
Cycle Life @ 55 °C	100% DOD, 1C, Active Cooling	>1000 Cycles
Cell Weight	Integrated Cell	5.4 Kg
Recommended Cutoff Voltages	Charge	3.6 Volts
	Discharge	2.5 Volts
Max Continuous Charge Current	100% DOD	80 A (C/2)
Max Continuous Charge Current	100% DOD, Active Cooling	160 A (C)
Max Continuous Discharge Current	10% to 90% DOD	160 A (C)
Max Continuous Discharge Current	10% to 90% DOD, Active Cooling	480 A (3C)
Charging Efficiency (Ratio of charge/discharge time)	100% DOC @ C/3	90%
	10% to 90% DOC @ C/3	98%
Operating Temperature	Charge	0°C to 50°C
	Discharge	-20°C to 55°C

## d) DT4 : Variateur de vitesse AVB125A200



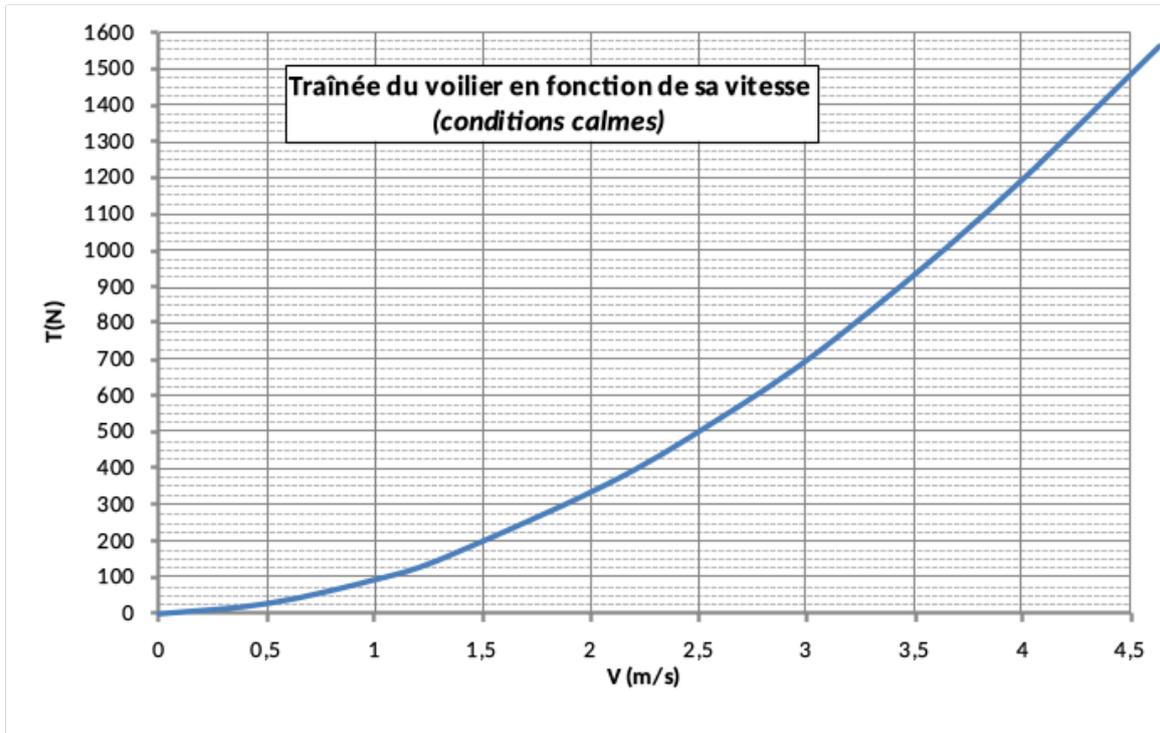
Caractéristiques de puissance	
Gamme de tension d'alimentation	40 – 175 Vdc
Seuil de surtension	190 V
Seuil de sous-tension	36 V
Courant max en crête	125 A
Courant max permanent	80 A
Caractéristiques de commande	
Information de commande	0 - 5 V ou 0 - 5 kΩ

## e) DT5 : Groupe électrogène PDC 8220VP-30

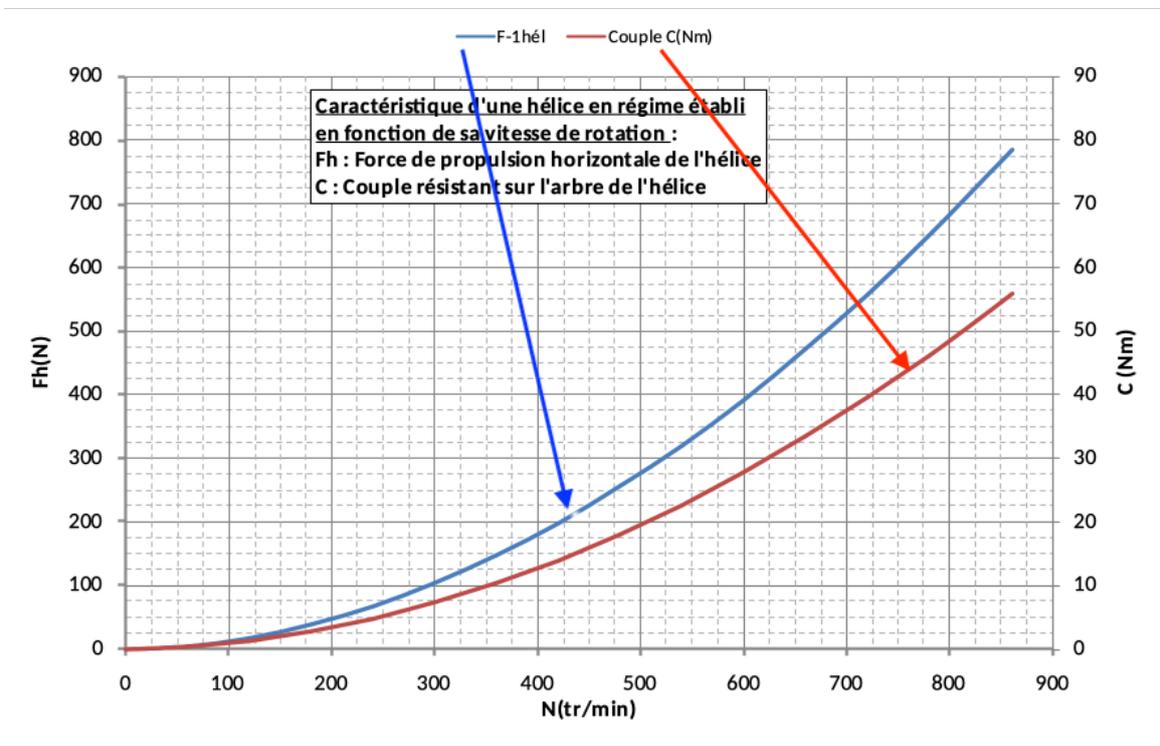


PDC 8220VP-30	
Ratings kW (continuous)	14kw
Output DC Voltage	48 - 144V
Engine RPM	2900
Cylinders	3
Cylinder Volume	1.13 Liters
Weight	153kg/337lbs
Operating Temperature	-20°C to 72°C
Fuel Consumption	0,34L/kWhr (calculated)
Hard Enclosure Dimensions	Length: 700mm/27.6"
	Width: 535mm/21"
	Height: 650mm/25.6"

f) DT6



g) DT7



**h) DT8 : Caractéristiques pour différents types de batteries**

Type de batterie	Plomb (Pb)	NiMH	Li-ion	
			Cobalt LiCoO <sub>2</sub>	Phosphate LiFePO <sub>4</sub>
Energie massique (Wh/kg)	30 - 50	60 - 120	150 - 190	90-120
Nombre de cycle charge/décharge	100 – 1000 (selon profondeur de décharge)	300 - 800	1000	2000
Coût	< 100 €/kWh	~ 1000 €/kWh	500 – 1000 €/kWh	500 – 1000 €/kWh
Sécurité (risque d'emballement thermique)	Version AGM : Pas de risque de fuite ou d'explosion	Pas de risque	Risque potentiel d'emballement thermique	Pas de risque