

Maison flottante mobile ou « Boathome »

Eléments de corrigé
Vincent CROS juin 2019



Prototype « Boathome » (source : www.boathome.fr)

I - Introduction :

Le sujet s'appuie sur un produit développé par une société française basée dans la région Grand Est, la maison flottante « **Boathome** » permet d'allier le confort d'une habitation moderne et la mobilité d'un bateau pour du cabotage fluvial.

Le prototype étudié possède une motorisation électrique principale composée de 2 moteurs à courant continu qui sont alimentés par un ensemble de batteries rechargées :

- Soit par un groupe électrogène d'appoint (moteur diesel) d'une puissance de 18 kW ;
- Soit par un branchement filaire à quai sur le réseau de distribution d'électricité.

Cette configuration doit pouvoir permettre un niveau d'autonomie en déplacement compatible avec les usages auxquels cette maison flottante est destinée.

L'extrait du cahier des charges ci-dessous permet de caractériser une partie des fonctions du système :

Fonctions à réaliser	Critères
Assurer le confort des passagers	Limiter l'angle de gîte (figure 4 page 6) : <ul style="list-style-type: none"> • < 2,5° sans compensation • < 0,5° avec système de compensation
Assurer la sécurité des passagers	Hauteur h_D d'invasissement d'après la norme ISO 12217-1 relative aux navires de catégorie D (figure 2 page 4). Avertir les passagers en cas de gîte excessive
Assurer une autonomie minimale	Autonomie > 8 h

L'étude qui suit a pour **objectif d'analyser et de justifier** les dispositifs mis en place dans la conception du « **Boathome** » permettant de **répondre aux exigences de confort, sécurité et d'autonomie**.

Cette étude se décompose en 5 étapes :

- Etape 1 :** l'homologation du navire.
- Etape 2 :** Le confort des passagers.
- Etape 3 :** La sécurité des passagers.
- Etape 4 :** La vérification de l'autonomie du « **Boathome** ».
- Etape 5 :** L'élaboration d'une synthèse du travail effectué.

Etape 1 : l'homologation du navire.

Objectif de cette partie : Vérifier la capacité du « **Boathome** » à respecter les normes de stabilité.

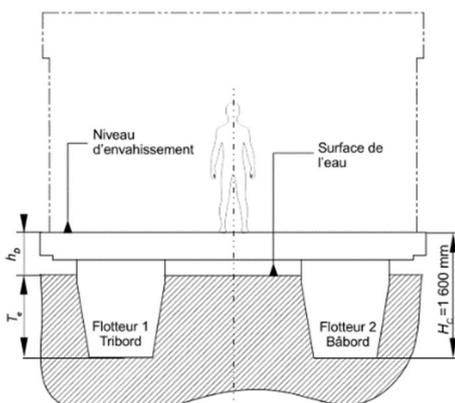


Figure 2 : vue en coupe du Boathome.

La figure 2 présente en coupe la coque du « **Boathome** ». H_C désigne la hauteur de la coque, T_e le tirant d'eau de carène ou hauteur immergée du bateau et h_D la hauteur d'invasissement par l'eau.

Le « **Boathome** » est considéré comme un bateau de plaisance de la catégorie de conception **D**, de ce fait il doit être conforme à toutes les normes et réglementations en vigueur dans ce domaine, notamment celles liées à la sécurité.

La norme ISO 12217-1 précise la valeur minimale de la hauteur de la coque afin d'éviter un envahissement par l'eau. La figure 3 fixe la valeur limite applicable à des navires de plaisance de longueur comprise entre **6 m et 24 m**.

La longueur de la coque du « **Boathome** » est de **18 m**.

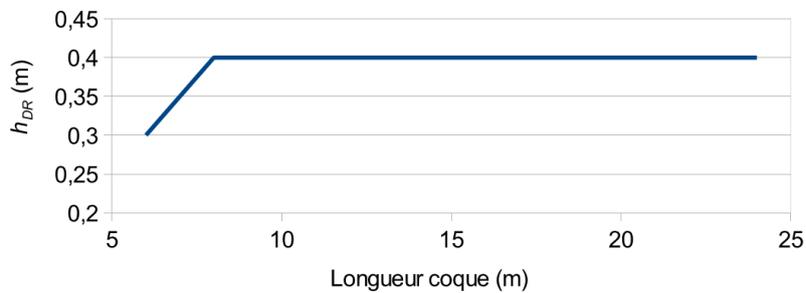


Figure 3 : hauteur d'envahissement par l'eau recommandée (h_{DR}) pour navire de catégorie D (extrait norme ISO 12217-1).

Lors de la mise à l'eau du prototype, la mesure de la valeur du tirant d'eau de carène T_e a été effectuée dans les conditions de chargement maximal selon la norme : $T_e = 1,09 \text{ m}$.

Q1 - Déterminer, à partir de la figure 2, la valeur de la hauteur d'envahissement par l'eau h_D dans le cas de l'équilibre horizontal du bateau. **Conclure** sur le respect des conditions de la norme ISO 12217-1.

Sur la figure 2 on remarque que $H_C = 1,6 \text{ m}$, comme $T_e = 1,09 \text{ m}$ on en déduit que :

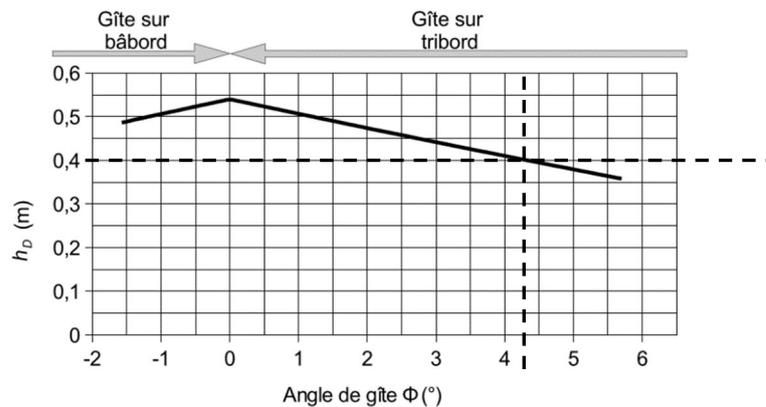
$$h_D = H_C - T_e = 1,6 - 1,09 = 0,51 \text{ m}$$

Par ailleurs sur la figure 3 on relève que pour une longueur de 18 m, $h_{DR} = 0,4 \text{ m}$. Comme $h_{DR} < h_D$ on en conclut que le prototype « Boathome » respecte les conditions de la norme ISO 12217-1.

La hauteur d'envahissement par l'eau h_D évolue avec l'angle de gîte du bateau (angle d'inclinaison transversale du bateau) noté ϕ (figure 4).

Une simulation de l'évolution de la hauteur h_D en fonction de l'angle de gîte a été réalisée dans le cadre de l'homologation du bateau. Les résultats de la simulation sont donnés sur le document réponse DR1.

Évolution de la hauteur d'envahissement par l'eau h_D en fonction de l'angle de gîte ϕ .



Q2 - Relever sur le document réponse DR1 la valeur de l'angle de gîte maximal noté ϕ_{maxi} , pour une hauteur d'envahissement par l'eau à la limite des exigences de la norme.

Selon la norme $h_D \geq h_{DR} = 0,4 \text{ m}$ donc par exploitation du document réponse DR1 on détermine que $\phi_{maxi} = 4,5^\circ$.

La norme prévoit de déterminer par calcul la valeur de l'angle ϕ (figure 4) dans le cas d'un chargement maximal désaxé correspondant au cas de charge le plus critique. L'ensemble des passagers est placé à une distance $d = 1,8 \text{ m}$ de l'axe central du bateau (figure 4).

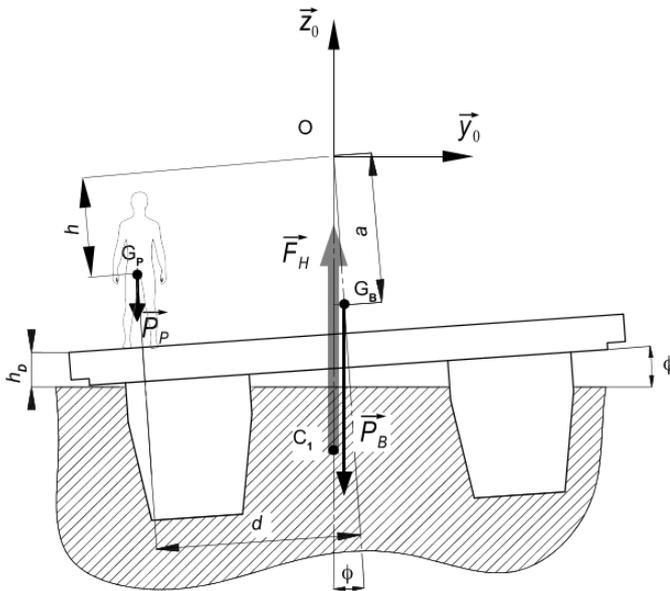


Figure 4 : modèle à l'équilibre avec une gîte d'angle ϕ .

- O** : Centre de rotation du bateau appelé métacentre.
(O, $\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0$) : le repère lié à la terre et considéré, dans notre étude, comme galiléen.
 G_B : le centre de gravité de l'ensemble du bateau (sans les passagers).
 G_P : le centre de gravité de l'ensemble des passagers tel que :
 $\vec{OG}_P = (-d * \cos\phi + h * \sin\phi) * \vec{y}_0 + (-d * \sin\phi - h * \cos\phi) * \vec{z}_0$
 C_1 : le centre de carène du bateau en position inclinée d'un angle ϕ , (point d'application de la poussée hydraulique) tel que :
 $\vec{OC}_1 = -z_{C_1} * \vec{z}_0$
 ϕ : angle de gîte
 P_B : le poids du bateau de masse m_B sans les passagers.
 P_P : le poids de l'ensemble des passagers de masse m_P .
 F_H : la poussée hydraulique due au fluide avec :
 $\|\vec{F}_H\| = (m_B + m_P) * g$
 $m_B = 33043 \text{ kg}, m_P = 900 \text{ kg}$
 $d = 1,8 \text{ m}, a = 1,33 \text{ m}$ et $h = 0,93 \text{ m}$

Q3 - Déterminer, pour le modèle $S = \{\text{bateau} + \text{passagers}\}$ à l'équilibre statique incliné d'un angle de gîte ϕ comme indiqué sur la figure 4, l'équation issue du théorème du moment dynamique au point **O** en projection sur l'axe **(O, \vec{x}_0)**

On a isolé l'ensemble $S = \{\text{bateau} + \text{passagers}\}$, par application du théorème du moment dynamique au point **O**, l'équilibre sera respecté si :

$$\vec{\mathcal{M}}_O(\vec{P}_B \rightarrow S) + \vec{\mathcal{M}}_O(\vec{F}_H \rightarrow S) + \vec{\mathcal{M}}_O(\vec{P}_P \rightarrow S) = \vec{0}$$

$$\vec{OG}_{B\Lambda} \vec{P}_B + \vec{OC}_{1\Lambda} \vec{F}_H + \vec{OG}_{P\Lambda} \vec{P}_P$$

$$\vec{OG}_{B\Lambda} \vec{P}_B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \vec{x}_0 \\ (+a * \sin\phi) & 0 & \vec{y}_0 \\ (-a * \cos\phi) & -m_B * g & \vec{z}_0 \end{bmatrix} = -m_B * a * \sin\phi * g * \vec{x}_0, \quad \vec{OC}_{1\Lambda} \vec{F}_H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \vec{x}_0 \\ 0 & 0 & \vec{y}_0 \\ -z_{C_1} & (m_B + m_P) * g & \vec{z}_0 \end{bmatrix} = 0 * \vec{x}_0$$

$$\vec{OG}_{P\Lambda} \vec{P}_P = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \vec{x}_0 \\ (-d * \cos\phi + h * \sin\phi) & 0 & \vec{y}_0 \\ (-d * \sin\phi - h * \cos\phi) & -m_P * g & \vec{z}_0 \end{bmatrix} = m_P * (d * \cos\phi - h * \sin\phi) * g * \vec{x}_0$$

Conclusion à l'équilibre nous avons en projection sur l'axe **(O, \vec{x}_0)** :

$$-m_B * a * \sin\phi * g + m_P * (d * \cos\phi - h * \sin\phi) * g = 0$$

Q4 - De l'équation précédente déduire que l'expression de l'angle de gîte est $\phi = \arctan\left(\frac{m_P * d}{m_B * a + m_P * h}\right)$, calculer la valeur numérique de ϕ .

On a déterminé que l'équilibre avait à condition que la condition précédente soit vérifiée donc que :

$$-m_B * a * \sin\phi * g + m_P * (d * \cos\phi - h * \sin\phi) * g = 0$$

$$(m_B * a + m_P * h) * \sin\phi = m_P * d * \cos\phi \text{ donc que } \tan\phi = \frac{\sin\phi}{\cos\phi} = \frac{m_P * d}{m_B * a + m_P * h}$$

Conclusion :

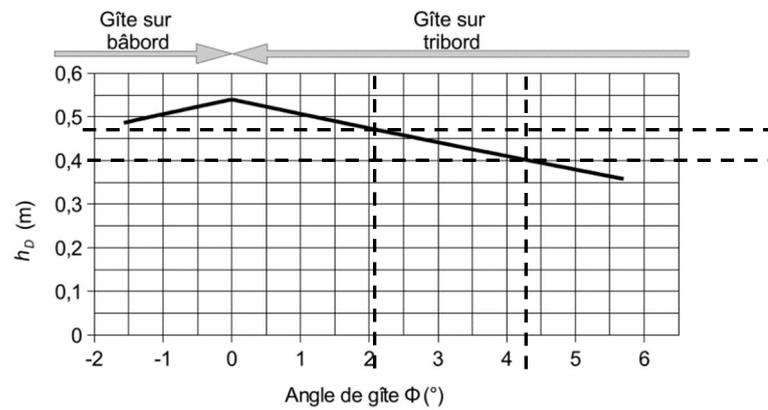
$$\phi = \arctan\left(\frac{m_P * d}{m_B * a + m_P * h}\right)$$

Numériquement :

$$\phi = \arctan\left(\frac{900 * 1,8}{33043 * 1,33 + 900 * 0,93}\right) = 2,07^\circ$$

Q5 - Effectuer un tracé sur le document réponse DR1 page 21 et **relever** la hauteur d'envahissement par l'eau h_D de ce cas de charge. **Conclure** quant à la capacité du navire à répondre aux exigences de la norme.

Évolution de la hauteur d'envahissement par l'eau h_D en fonction de l'angle de gîte ϕ .



Par exploitation du document réponse DR1 on détermine que $h_D = 0,46$ m. Donc le navire répond aux exigences de la norme.

Etape 2 : Le confort des passagers.

Objectif de cette partie : Analyser et valider les solutions mises en œuvre pour assurer le confort des passagers.

Lors des premiers essais de navigation du prototype, il a été constaté que l'angle de gîte du bateau influait sur le confort des passagers.

Le constructeur du « **Boathome** » prévoit donc, dans sa version livrable aux clients, d'équiper le bateau d'un système d'équilibrage automatique de l'angle de gîte.

Le principe retenu est celui des ballasts : l'information sur la valeur de l'angle de gîte permet de compenser l'inclinaison par le transfert d'un flotteur à l'autre, d'une quantité d'eau stockée dans des réservoirs (**figure 5**).

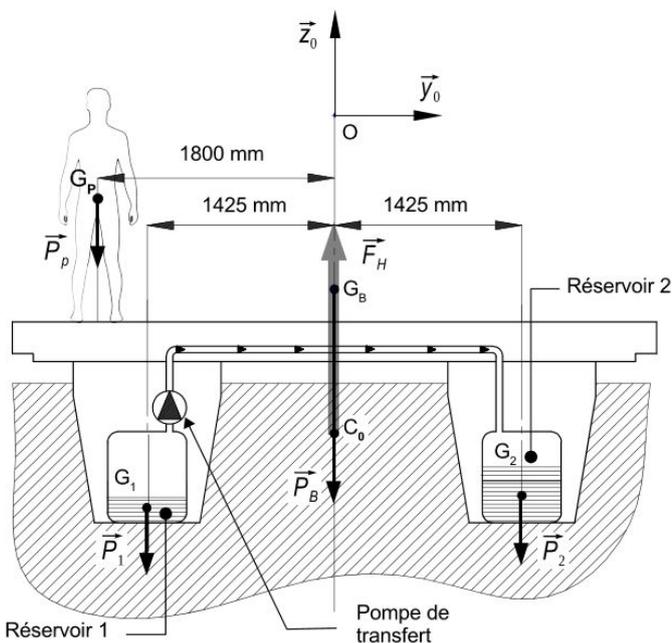


Figure 5 : principe de la correction de l'angle de gîte ϕ par transfert d'eau (ballast).

\vec{P}_1 : poids de l'eau de masse m_1 du réservoir 1.

\vec{P}_2 : poids de l'eau de masse m_2 du réservoir 2.

\vec{P}_B : poids du bateau de masse m_B sans les passagers.

\vec{P}_p : poids total de l'ensemble des 12 passagers de masse $m_p = 900$ kg.

\vec{F}_H : poussée hydraulique.

Si on exprime le volume total d'eau n_T prévu pour équilibrer le navire alors on peut écrire que :

$$V_1(\text{en litre}) = \frac{n_T}{2} - n_L \text{ et que } V_2(\text{en litre}) = \frac{n_T}{2} + n_L \text{ donc que } n_L = \frac{1}{2} * (V_2 - V_1)$$

Q6 - En appliquant au modèle $S = \{\text{bateau} + \text{passagers}\}$ à l'équilibre statique le théorème du moment dynamique au point O en projection sur l'axe (O, \vec{x}_0) , **déterminer** la différence de masses $m_2 - m_1$ qu'il faut pour maintenir un équilibre avec un angle de gîte $\phi = 0^\circ$

De façon analogue à la question **Q3** l'équilibre aura lieu si la condition suivante se vérifie :

$$1,8 * \|\vec{P}_p\| + 1,425 * \|\vec{P}_1\| = 1,425 * \|\vec{P}_2\|$$

Donc que :

$$1,8 * m_p + 1,425 * m_1 = 1,425 * m_2$$

Soit :

$$m_2 - m_1 = \frac{1,8}{1,425} * m_p$$

On note n_L le nombre de litres d'eau transférés du **réservoir 1** vers le **réservoir 2** pour rééquilibrer le bateau à l'horizontale.

V_1 et V_2 représentent respectivement les volumes d'eau de masse volumique $\rho = 1000 \text{ kg} * \text{m}^{-3}$ exprimés en litres, présents dans les réservoirs 1 et 2 après obtention de l'équilibre horizontal.

Q7 - Montrer que $n_L = \frac{1}{2} * (V_2 - V_1)$

Le constructeur du bateau envisage de placer deux réservoirs d'une capacité de **2000 l** avec un remplissage initial de **1 000 l** dans chaque réservoir.

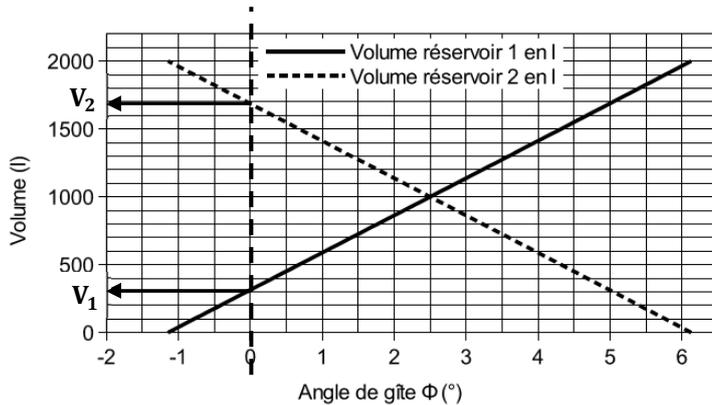
L'amélioration du modèle de stabilité avec prise en compte du système de correction de l'angle de gîte a permis de tracer la courbe d'évolution du volume des réservoirs en fonction de l'angle de gîte ϕ pour la position des passagers décrite sur la **figure 5**.

Le résultat de la simulation est donné sur le document réponse DR1 pour un volume des réservoirs évoluant entre **0** et **2 000 l**.

Lors des tests de stabilité pour homologuer le navire, l'angle de gîte réel relevé pour la position des passagers décrite figure 5 est de $\phi = 2,5^\circ$ avant utilisation du système de correction de gîte.

Q8 - En effectuant un tracé sur le document réponse DR1 page 21, **déterminer** le nombre de litres d'eau à transférer afin d'annuler l'angle de gîte.

Évolution des volumes (en litres) des réservoirs en fonction de l'angle de gîte ϕ .



En analysant la figure ci-contre, on constate que pour maintenir l'angle de gîte $\phi = 0^\circ$ il faut que :

$$V_2 = 1700 \text{ L}, V_1 = 300 \text{ L}$$

Soit un transfert de **700 L**.

La surface projetée totale des flotteurs au niveau de la surface de l'eau est de **43 m²** avant le remplissage des réservoirs. Grâce à la forme géométrique des flotteurs cette surface reste constante lorsque que le bateau s'enfonce dans l'eau après correction de l'angle de gîte.

Rappel du principe d'Archimède : tout solide plongé dans un fluide subit de la part de ce fluide une action mécanique verticale (poussée hydraulique), dirigée du bas vers le haut et dont la norme est égale au poids du volume de fluide déplacé par ce solide.

Q9 - Déterminer, en utilisant le principe d'Archimède, l'enfoncement du bateau sous l'effet de l'ajout des deux réservoirs. **Conclure** sur la possibilité d'améliorer le confort des passagers tout en respectant la norme relative à la hauteur d'invasement.

Pour déterminer la hauteur d'enfoncement du bateau due au **2000 L** càd **2 m³** en tenant compte de la surface de **43 m²** il faut que :

$$2 = 43 * h_e \text{ donc que } h_e = \frac{2}{43} = 46,51 \text{ mm}$$

On en déduit dans ce cas que :

$$h_D = 460 - 46,51 = 413,5 \text{ mm}, h_D \geq h_{DR} = 0,4 \text{ m}$$

Conclusion : le choix fait par le constructeur pour améliorer le confort des passagers permet de respecter à nouveau la norme relative à la hauteur d'invasement

Etape 3 : La sécurité des passagers.

Objectif de cette partie : **Valider** le choix d'un capteur permettant d'améliorer la sécurité des passagers en déclenchant une alarme en cas de gîte maximale.

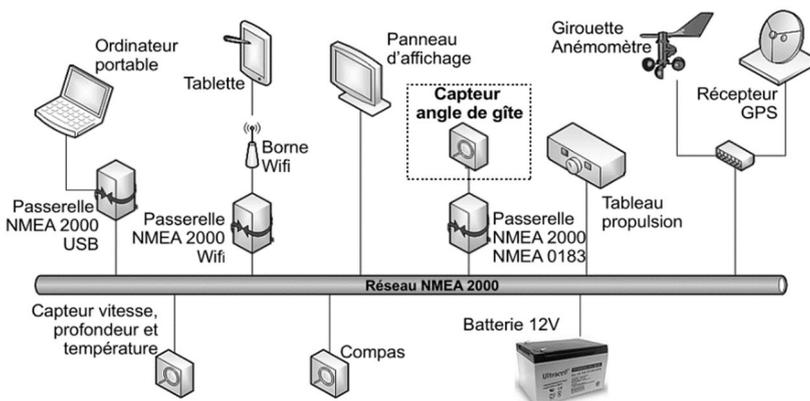
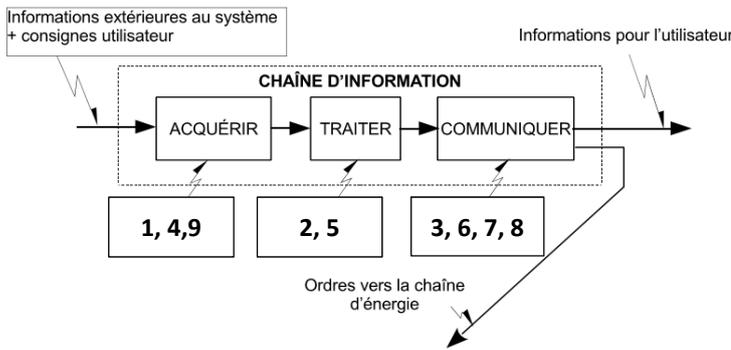


Figure 6 : architecture réseau NMEA 2000 choisi pour le « Boathome ».

Le « **Boathome** » est équipé d'un système de navigation composé d'équipements électroniques. Cet appareillage électronique est connecté en réseau (figure 6) afin que les équipements puissent partager leurs données.

Cette mise en réseau permet d'afficher des données sur plusieurs écrans ou de commander à distance des appareils (moteurs de propulsion, moteur d'étrave pour les manœuvres...).

Q10 - Compléter, sur le document réponse DR2, la chaîne d'information proposée en plaçant les repères 1 à 9 du glossaire fourni.



Rep.	Désignation	Fonction
1	Girouette + Anémomètre	Mesurer la direction et la vitesse du vent
2	Récepteur GPS	Positionner le navire
3	Tableau propulsion	Délivrer les consignes de pilotage
4	Capteur de vitesse, profondeur et température	Mesurer la vitesse du bateau par rapport à l'eau, la profondeur et la température de l'eau
5	Ordinateur portable	Assurer le traitement des informations
6	Écran de contrôle	Permettre la visualisation des informations
7	Tablette	Permettre la visualisation des informations et aide au pilotage mobile
8	Compas	Fournir une indication de la référence de direction (nord magnétique)
9	Capteur angle de gîte	Mesurer l'angle de gîte

- La girouette, l'anémomètre [1], les capteurs de vitesse, profondeur et température [4], le capteur d'angle de gîte [9] transforment une grandeur physique en une autre grandeur exploitable par le système, il s'agit de capteurs qui permettent d'acquérir les informations nécessaires au pilotage.
- Le récepteur GPS [2], l'ordinateur portable [5] permettent de traiter l'information.
- Le tableau propulsion [3], l'écran de contrôle [6], la tablette [7], le compas [8] permettent d'informer l'équipage sur la manière dont le pilotage se déroule.

Gestion de l'alarme

Le constructeur envisage, pour le système d'équilibrage du bateau, d'utiliser un capteur permettant d'évaluer la valeur de l'angle de gîte. Son choix s'est porté sur le capteur **nke** défini dans le document technique DT2.

L'étude qui suit doit permettre de **valider ou non ce choix**.

Les valeurs maximales de la gîte retenues sont $\phi_{\max i} = + 4,3^\circ$ sur tribord et $\phi_{\max i} = - 4,3^\circ$ sur bâbord. Les caractéristiques du capteur choisi pour la mesure de l'angle de gîte sont données sur le DT2.

Document technique DT2. Caractéristiques capteur angle de gîte et protocole NMEA

Capteur nke (Marine electronics)

Le capteur d'angle de gîte **nke** est un instrument de mesure qui délivre l'angle de gîte (roulis) du bateau. Il peut être raccordé à n'importe quel récepteur NMEA traitant les trames XDR.



Sortie NMEA 0183 : 5 fois par seconde, le capteur angle de gîte émet l'angle de gîte sur sa sortie NMEA.

Caractéristiques techniques

Générales	Mesures
Alimentation : 10 à 16 VDC Consommation : 25 mA Étanchéité : IP54 Poids : 270 g (avec 5 mètres de câble) Température en fonctionnement : -10°C à +50°C	Gamme de mesure : -180° à +180° Résolution : 0,1° Précision : 0,2°

NMEA - National Marine & Electronics Association

Dans ce qui suit, le Standard NMEA est défini « **simplement** » et uniquement comme étant le **protocole de transmission des données** entre les instruments et les équipements électroniques liés au GPS et à l'instrumentation.

Définition du standard NMEA-0183

Sous ce standard, toutes les données sont transmises sous la forme des caractères **ASCII**.

Les données sont transmises sous forme de trames :

\$aaXDR,b,c,c,d,ee...ee*ff<CR><LF> (certains champs sont séparés par une "virgule")

- **\$** : début de trame
- **aa** : identifiant du récepteur → « **GP** » GPS ; « **HC** » compas ; « **II** » instrument intégré (passerelle NMEA)...
- **XDR** : pour données de navigation (issues des transducteurs ou capteurs).
- **b** : type de capteur → « **A** » angle ; « **C** » température ; « **P** » pression...
- **c.c** : valeur mesurée, deux décimales maximum.
- **d** : unité de mesure → « **D** » degrés (angle) ; « **C** » degrés Celcius ; « **B** » bar...
- **ee...ee** : nom du capteur → « compas », « baromètre », « gîte », « température eau », ...
- **ff** : « checksum » ou « détection d'erreur » précédé du signe *.
- **<CR><LF>** : retour en début de ligne puis saut d'une ligne.

Exemple de trame : \$HCXDR,A,-87.5,D,compas*38<CR><LF>

→ lecture d'un angle de -87,5° sur un compas à accès direct (sans passerelle)

On appelle partie fixe de la trame **H CXDR,A, ... ,D,compas**.

On appelle partie variable de la trame **-87,5**.

Q11 - Vérifier si la plage de mesure du capteur choisi est compatible avec les valeurs de $\phi_{\max i}$ et **déterminer** le nombre minimal de bits nécessaires pour coder en base 2 l'ensemble des valeurs possibles de ϕ sur l'intervalle $[-180^\circ; +180^\circ]$ en tenant compte d'une résolution de $0,1^\circ$.

L'intervalle $[-4,3^\circ; +4,3^\circ]$ est inclus dans l'intervalle $[-180^\circ; +180^\circ]$ donc l'étendue de mesure du capteur est compatible avec les valeurs maxi de la gîte.

Un angle de 180° avec une résolution de $0,1^\circ$, il faut **convertir en base 2, 1800₍₁₀₎** il faut donc que :

$$2^n = 1800 \text{ soit } n * \ln 2 = \ln 1800$$

$$\text{soit } n = \frac{\ln 1800}{\ln 2} = 10,813$$

n ∈ ℕ conclusion il faut 11 bits et 1 bit de signe.

Les valeurs de l'angle de gîte sont codées en binaire sur 2 octets. Les valeurs négatives sont codées suivant le principe du binaire signé (« complément à 2 » de la valeur positive).

On obtient la valeur négative **-N** d'une valeur binaire positive **N** par l'expression :

$$-N = \bar{N} + 1$$

où \bar{N} est le complément à 1 de **N**.

L'alarme se déclenche quand l'angle de gîte dépasse les valeurs maximales $\pm \phi_{maxi}$ pendant au moins deux secondes. Son arrêt est réalisé par l'appui sur un bouton poussoir d'arrêt. Les variables utilisées par l'algorithme de gestion de l'alarme « angle de gîte » sont :

- **Alarme**, état de l'alarme activée ou éteinte ;
- **BpArrêt**, état du bouton poussoir d'arrêt enfoncé ou relâché ;
- **ValeurCapteur**, mesure de l'angle de gîte ϕ
- **Durée**, temps d'évolution en secondes.

Q13 - En se basant sur l'exemple de la variable **Durée**, compléter le tableau du document réponse DR2 pour les variables **Alarme**, **BpArrêt** et **ValeurCapteur**

- La variable **Durée** correspond à **une information** qui est délivrée par le système microprogrammé il s'agit donc d'une variable **interne** de type **numérique** à valeur **entière**,
- La variable **Alarme** correspond à **une demande d'action** il s'agit donc **d'une variable de sortie** de type **binaire** donc à valeur **Booléenne**,
- La variable **BpArrêt** correspond à **une information** il s'agit donc **d'une variable d'entrée** de type **binaire** donc à valeur **Booléenne**,
- La variable **ValeurCapteur**, correspond à **une information** il s'agit donc **d'une variable d'entrée** de type **numérique** donc à valeur **entière**,

Q13. Définition des variables de l'algorithme de gestion de l'alarme « angle de gîte ».

Variable	Entrée	Sortie	Interne	Type		
				Entier	Flottant	Booléen
<i>Durée</i>			X	X		
<i>Alarme</i>		X				X
<i>BpArrêt</i>	X					X
<i>ValeurCapteur</i>	X			X		

Q14 - Compléter l'algorithme du document réponse DR3 permettant la gestion de l'alarme.

Initialisation

Alarme ← 0 ;

BpArrêt ← 0

Répéter

Durée ← 0 ;

Lire *ValeurCapteur* ;

Lire *BpArrêt* ;

// Test gîte, le test s'effectue sur la valeur absolue de l'angle de gîte

Si $|ValeurCapteur| > \phi_{maxi}$ Alors

Lire *Durée* ;

Si *Durée* ≥ 2 s Alors

Alarme ← 1 ;

Fin si ;

Fin si ;

// Arrêt de l'alarme

Si *Alarme* = 1 alors

Lire *BpArrêt* ;

Si *BpArrêt* = 1 alors

Alarme ← 0 ;

Fin si ;

Fin si ;

L'**initialisation** correspond aux valeurs données aux variables **Alarme** et **BpArrêt** pour lesquelles ont affecte la valeur Booléenne (**0**).

Répéter correspond à une boucle qui va traiter la lecture des variables **ValeurCapteur** et **BpArrêt**.

On compare $|ValeurCapteur|$ à la valeur de ϕ_{maxi} en fonction du résultat on déclenche l'alarme ou on reprend la scrutation et la boucle d'analyse.

Si l'alarme est déclenchée alors elle sera arrêtée par l'action sur le **BpArrêt**.

Protocole de communication

Le protocole de communication du capteur retenu est celui défini par le **standard NMEA - 0183** (document technique DT2). De manière optionnelle, lors de la réception de la trame, il est possible de vérifier qu'il n'y a pas eu d'erreur de transmission en complétant le champ appelé « **checksum** ».

Q15 - À partir de l'exemple donné au bas du document technique DT2, **indiquer** le format de la trame complète pour la valeur d'angle $\phi = 4,3^\circ$ et une valeur du « **checksum** » de FF.

\$IIXDR, A, 4.3, D, gîte*FF<CR><LF>

\$	Début de trame	A	Type de capteur « angle »	gîte	Nom du capteur
II	Instrument intégré	4.3	Valeur de l'angle	*FF	Détection d'erreur
XDR	Pour données de navigation	D	En degré	<CR><LF>	Retour / Saut

Le « **checksum** » est le résultat de l'opération « **OU Exclusif** » (XOR) entre toutes les valeurs binaires issues du codage ASCII de chacun des caractères de la trame **compris entre \$ et ***.

Pour $\phi = 4,3^\circ$, le tableau de la figure 8 présente le résultat de l'opération « OU Exclusif » :

- Entre tous les caractères de la partie fixe de la trame (exemple au bas de la page du document technique DT2) ;
- Entre les trois éléments de la partie variable de la trame.

Un premier calcul a été effectué sur la partie « **fixe** » de la trame pour un angle de gîte, la valeur de l'angle correspond à la partie « **variable** » de la trame.

Un second calcul, de même nature, a été fait sur les caractères correspondant à la valeur de l'angle $\phi = 4,3^\circ$.

Les résultats de ces calculs sont reportés dans le tableau figure 8.

« Découpage » trame	Caractère(s)	Résultat XOR (base 2)
Trame sans valeur de l'angle : partie « fixe »	Tous les caractères entre \$ et * sauf la valeur de l'angle	0000 1110
Valeur de l'angle à transmettre : partie « variable »	4.3 (les caractères « 4 », « . », et « 3 »)	0010 1001

Figure 8 : résultats des fonctions XOR.

Q16 - Déterminer la valeur du « **checksum** » de la trame transmise pour $\phi = 4,3^\circ$.

Pour le premier calcul le résultat du calcul XOR est **0000 1110**₍₂₎

Pour le second calcul, le résultat du calcul XOR est **0010 1001**₍₂₎

On détermine le résultat du XOR de ces 2 calculs :

$$0000\ 1110_{(2)} \oplus 0010\ 1001_{(2)} = 0010\ 0111_{(2)} = 27_{\#}$$

la valeur du "**checksum**" en hexadécimal est **27**_#

Q17 - Dans le cas d'une inversion de 2 caractères dans la trame reçue par rapport à la trame émise (« 3.4 » reçue au lieu de « 4.3 » émise, par exemple), **expliquer** pourquoi la valeur du « **checksum** » reste identique. **Conclure** vis-à-vis de la fiabilité de ce système de détection d'erreur.

La fonction logique « OU EXCLUSIF » obéit à la propriété de commutativité donc il est normal que le résultat soit identique. Dans ces conditions on peut conclure que ce système de détection d'erreur est peu fiable.

Validation du choix du capteur

La probabilité d'erreur d'inversion de deux caractères dans la trame est très faible puisqu'elle concerne la dégradation de 6 bits sur les 24 transmis de la partie « variable ».

Q18 - En analysant les caractéristiques techniques du capteur DT2 (gamme de mesure, résolution, précision, transmission de l'information) et l'analyse précédente, **expliquer** pourquoi le constructeur opte pour ce capteur.

Comme le système transmet le résultat de l'angle de « gîte » 5 fois par seconde on peut estimer que malgré des erreurs éventuelles les capacités du capteur l'emporte sur l'analyse du taux d'erreur, ici on retient le fait que ce capteur répond au standard NMEA.

Etape 4 : La vérification de l'autonomie du « Boathome ».

Objectif de cette partie : Evaluer la qualité d'un modèle de simulation multiphysique en vue d'améliorer les performances du produit final.

Le constructeur souhaite, à partir des résultats des mesures effectuées lors de la mise à l'eau et des premiers essais du prototype du « Boathome », pouvoir envisager des améliorations sur les performances du système de propulsion (vitesse maximale, autonomie).

Pour cela il est nécessaire de valider un modèle de simulation multiphysique de la chaîne d'énergie du système de propulsion (figure 9).

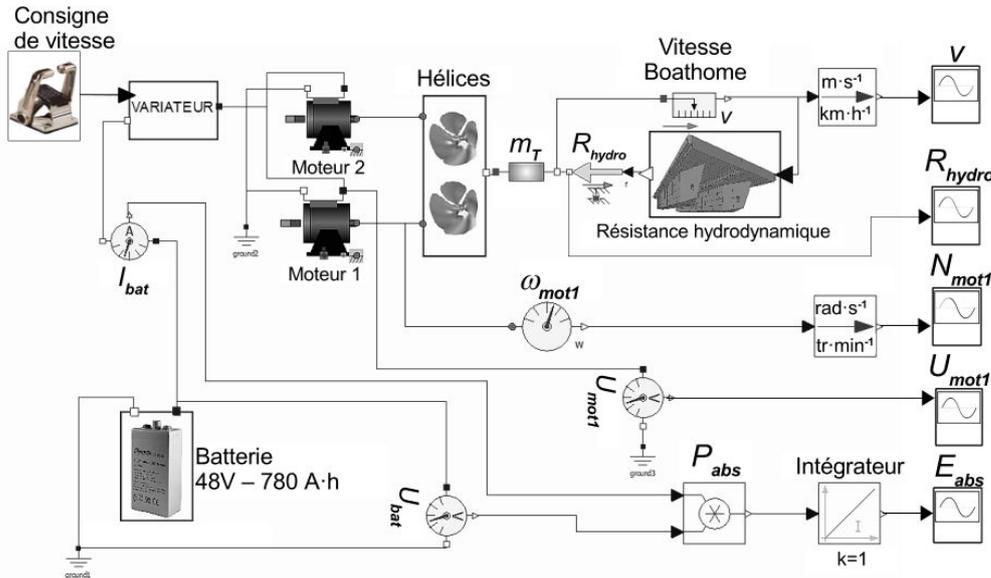


Figure 9 : modèle multiphysique de simulation du système de propulsion.

Élaboration du modèle multiphysique

La motorisation du navire est assurée à l'aide de deux machines à courant continu à aimants permanents. Les caractéristiques nominales des moteurs utilisés, issues des données constructeur, sont présentées dans le tableau de la figure 10.

Tension nominale U_N (V)	Courant nominal I_N (A)	Vitesse de rotation nominale N_N (tr·min ⁻¹)	Puissance utile P_u (kW)
48	225	600	10
Inductance de l'induit L (mH)	Inertie du rotor J_M (kg·m ²)		
1	0,05		

Figure 10 : caractéristiques nominales des moteurs.

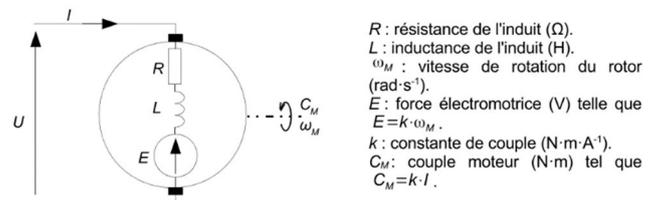


Figure 11 : modèle de la machine à courant continu.

Q19 - Calculer, à partir des données constructeur (figure 10), la puissance nominale absorbée par l'induit P_a , le couple moteur nominal C_{MN} ainsi que le rendement nominal η_N .

La puissance nominale absorbée P_a se détermine à partir de la connaissance de U_N et de I_N la manière suivante :

$$P_a = U_N * I_N = 48 * 225 = 10,8 \text{ kW}$$

Le couple nominal C_{MN} se détermine à partir de la connaissance de P_u et de N_N la manière suivante :

$$\Omega_N = \frac{\pi}{30} * N_N \text{ et } P_u = C_{MN} * \Omega_N \text{ donc } C_{MN} = \frac{P_u}{\Omega_N} = \frac{P_u}{\frac{\pi}{30} * N_N} = \frac{10000}{\frac{\pi}{30} * 600} = 159,15 \text{ m}_\Lambda\text{N soit } 160 \text{ m}_\Lambda\text{N}$$

Le couple nominal η_N se détermine à partir de la connaissance de P_u et de P_a la manière suivante :

$$\eta_N = \frac{P_u}{P_a} = \frac{10000}{10800} = 0,923 \text{ soit } 92,3 \%$$

Q20 - Déterminer par calcul la constante de couple k en $(\text{m}_\Lambda\text{N}) * \text{A}^{-1}$ d'un moteur.

En utilisant l'équation électromagnétique suivante :

$$C_{MN} = k * I_N \text{ donc } k = \frac{C_{MN}}{I_N} = \frac{159,15}{225} = 0,707 \text{ (m}_\Lambda\text{N)} * \text{A}^{-1}$$

Un essai à rotor bloqué ($\omega = 0$) sur le moteur sous une tension réduite $U = 5 \text{ V}$ a permis de relever en régime établi un courant d'induit $I = 100 \text{ A}$. On rappelle que tension aux bornes de l'inductance $U_L = L * \frac{dI(t)}{dt} = 0$ en régime établi.

Q21 - Déterminer, à partir de l'essai à rotor bloqué, la valeur de la résistance R de l'induit du moteur et **compléter** le paramétrage du modèle de simulation du moteur sur le document réponse DR3.

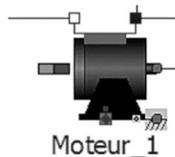
En appliquant les lois de **Kirchhoff** au schéma équivalent du moteur on peut écrire l'équation suivante :

$$U(t) = U_R(t) + U_L(t) + E(t)$$

A rotor bloqué et en régime établi :

$$U_L = 0 \text{ et } E = 0 \text{ conclusion } U = U_R = R * I \text{ donc } R = \frac{U}{I} = \frac{5}{100} = 50 \text{ m}\Omega$$

Q21.



Paramétrage du modèle		
Résistance d'induit	<input type="text" value="5 * 10^-2"/>	<input type="text" value="Ohm"/>
Inductance d'induit	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="mH"/>
Constante de couple	<input type="text" value="0,707"/>	<input type="text" value="N·m·A^-1"/>
Inertie du rotor	<input type="text" value="0,05"/>	<input type="text" value="kg·m^2"/>

Les principales résistances à l'avancement du bateau à vitesse constante sont :

- La traînée hydrodynamique due à la résistance de l'eau sur les parties immergées de la coque ;
- La résistance aérodynamique de la structure du « **Boathome** ».

Ces résistances peuvent être modélisées par des forces résistantes \vec{R}_{hydro} et $\vec{R}_{\text{aéro}}$:

$$\vec{R}_{\text{hydro}} = \frac{1}{2} * \rho_{\text{eau}} * S_C * Cx_C * V_b^2 \text{ et } \vec{R}_{\text{aéro}} = \frac{1}{2} * \rho_{\text{air}} * S_S * Cx_S * V_a^2$$

ρ_{eau} : masse volumique de l'eau, $\rho_{\text{eau}} = 1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

ρ_{air} : masse volumique de l'air, $\rho_{\text{air}} = 1,225 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

S_C : surface frontale immergée, $S_C = 2 \text{ m}^2$.

S_S : surface frontale de la structure, $S_S = 15 \text{ m}^2$.

Cx_C : coefficient de traînée de la coque, $Cx_C = 0,5$.

Cx_S : coefficient de traînée de la structure, $Cx_S = 1$.

v_b : vitesse de déplacement du bateau par rapport à l'eau, en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

v_a : vitesse de l'air (vent) par rapport au bateau, en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

La catégorie de conception du navire (catégorie D) impose une limite de vent maximale pour la navigation de $22 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. La moyenne annuelle des vitesses des vents rencontrés sur la zone de navigation du « **Boathome** » (Région grand Est) est inférieure $4 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Les vitesses de croisière et maximale, du bateau, annoncées par le constructeur sont respectivement de $6 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ et $11 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.

Q22 - Calculer la résistance pour \vec{R}_{hydro} pour la vitesse de croisière et pour la vitesse maximale ainsi que la résistance $\vec{R}_{\text{aéro}}$ pour la vitesse la valeur moyenne des vitesses de vents rencontrés. **Justifier** que l'on puisse en première approche négliger l'effet de la résistance aérodynamique devant les autres résistances à l'avancement.

$$\vec{R}_{\text{hydro croisière}} = \frac{1}{2} * 1000 * 2 * 0.5 * \left(\frac{6}{3,6}\right)^2 = 1388,8 \text{ N}$$

$$\vec{R}_{\text{hydro maximale}} = \frac{1}{2} * 1000 * 2 * 0.5 * \left(\frac{11}{3,6}\right)^2 = 4668,2 \text{ N}$$

$$\vec{R}_{\text{aéro}} = \frac{1}{2} * 1,225 * 15 * 1 * \left(\frac{4}{3,6}\right)^2 = 11,3 \text{ N}$$

On constate que $\vec{R}_{\text{aéro}} \ll \vec{R}_{\text{hydro}}$ donc on peut effectivement négliger l'effet de l'air.

Validation du modèle de simulation multiphysique

Les essais sur le prototype ont permis d'obtenir des relevés sur la consommation horaire d'énergie nécessaire à la propulsion. Pour une vitesse de croisière comprise entre 5 à $6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ la consommation est en moyenne de $3\,000 \text{ W} \cdot \text{h}$. Les tests ont été effectués sur une distance totale de 400 km avec passage d'une centaine d'écluses. la figure 12 synthétise les résultats d'une simulation obtenus à partir du modèle de la figure 9.

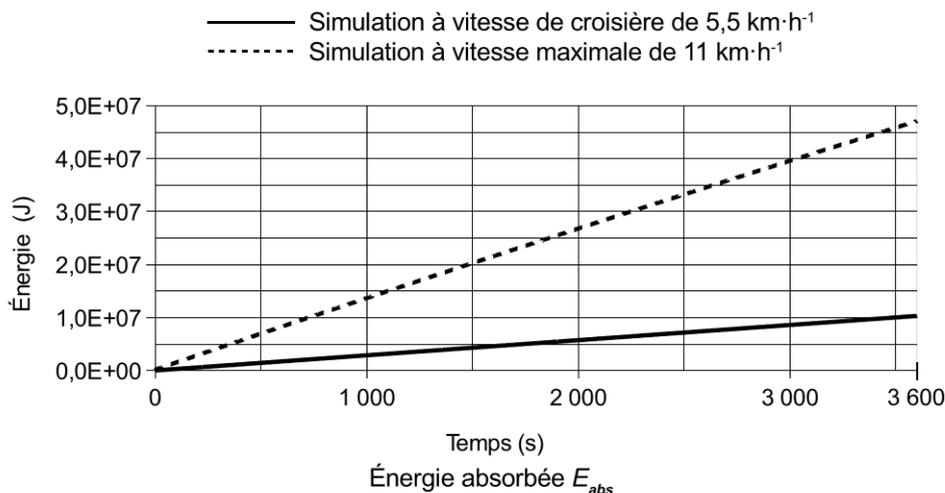


Figure 12 : résultats de simulation du modèle de propulsion pour une durée de 3 600 s.

Q23 - À partir des résultats de la simulation multiphysique du système de propulsion (figure 12), **relever**, en Joules, la valeur de l'énergie consommée pour la durée totale de la simulation à une vitesse de $5,5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ **Convertir** cette valeur en $\text{W} \cdot \text{h}$ et **calculer** l'écart relatif entre la valeur obtenue par simulation et la valeur mesurée de l'énergie consommée par le système de propulsion du bateau lors d'un déplacement à une vitesse de croisière comprise entre 5 à $6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. **Indiquer** quelles peuvent être les origines de cet écart et **proposer** un moyen permettant de le réduire.

On relève pour 3600 s la valeur de $E_{\text{consommée}} = 1,0 \cdot 10^7 \text{ J}$. Le Joule correspond à $1 \text{ W} \cdot \text{s}$ donc

$$E_{\text{consommée simul}} = \frac{1,0 \cdot 10^7}{3600} = 2777,7 \text{ W} \cdot \text{h}$$

$$\text{Ecart relatif} = \frac{E_{\text{consommée relevée}} - E_{\text{consommée simul}}}{E_{\text{consommée relevée}}} = \frac{3000 - 2777,7}{3000} = 7,4 \%$$

L'écart peut être diminué en reprenant les équations qui ont permis de modéliser par exemple :

- Les hélices,
- Les moteurs car certaines valeurs ont été prise sur les documents constructeur, il faudrait réaliser des essais sur les machines retenues,

Évaluation de l'autonomie énergétique

Le modèle de simulation multiphysique de la figure 9 permet d'évaluer la décharge des batteries du bateau. Les conditions de simulation utilisées sont les suivantes :

- La batterie de 48 V est supposée chargée à 100% de sa capacité maximale ($780 \text{ A} \cdot \text{h}$) au début du cycle de simulation ;
- Le bateau navigue à sa vitesse de croisière de $5,5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

Les spécifications techniques de la batterie imposent de ne pas la décharger à plus de 50% de sa capacité maximale afin de garantir une durée de vie optimale. Les résultats de la simulation sur une durée d'une heure sont présentés sur la figure 13. Sur la plage d'utilisation, l'évolution des grandeurs électriques sera supposée linéaire.

h

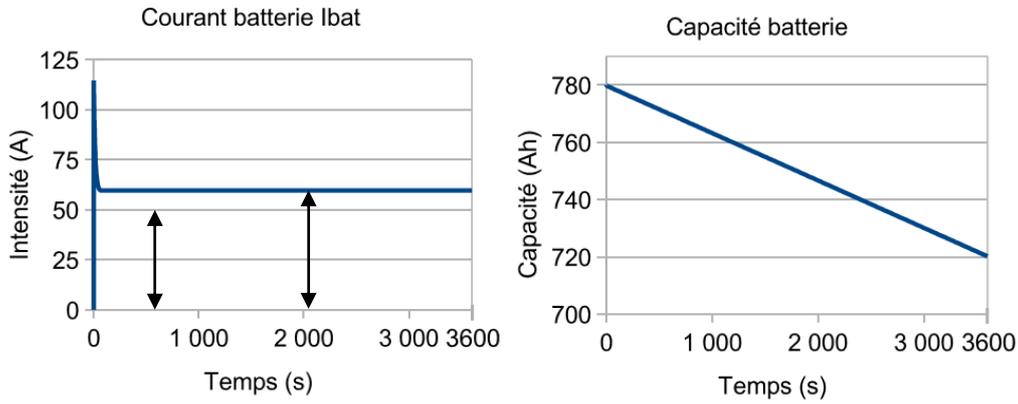


Figure 13 : résultats de simulation de la décharge des batteries.

Q24 - Déterminer, à partir des résultats de la simulation, le temps de navigation possible dans ces conditions. **Conclure** quant à la possibilité d'une navigation d'une durée de 8 heures, sans franchir le seuil des 50 % de décharge.

Compte tenu du fait que les spécifications techniques de la batterie imposent de ne pas décharger de plus de 50 % il faut arrêter de naviguer lorsque la capacité atteindra la valeur de 390 A.h. en appliquant le théorème de Thalès on peut écrire que :

2 solutions possibles pour déterminer le temps de parcours maximum :

1°) En appliquant le théorème de Thalès on peut écrire la relation suivante :

$$\frac{720 - 780}{3600} = \frac{390 - 780}{t_{\text{maxi}}} \text{ donc } t_{\text{maxi}} = 3600 * \frac{390 - 780}{720 - 780} = 23400 \text{ s soit } 6,5 \text{ h}$$

2°) en régime établi on consomme 60 A on peut donc écrire la relation suivante :

$$390 = 60 * t_{\text{maxi}} \text{ donc } t_{\text{maxi}} = \frac{390}{60} = 6,5 \text{ h}$$

Il n'est donc pas possible de naviguer pendant 8 h

Intégration de panneaux solaires

Dans le but d'augmenter l'autonomie du « **Boathome** », il est envisagé d'équiper le prototype de panneaux solaires sur la terrasse du pont supérieur. Les zones réservées à cet effet sont représentées sur la figure 14. Le choix du concepteur s'est porté sur les panneaux de type BISOL BMO 270 W de dimensions **1649 * 991 * 35 mm**.

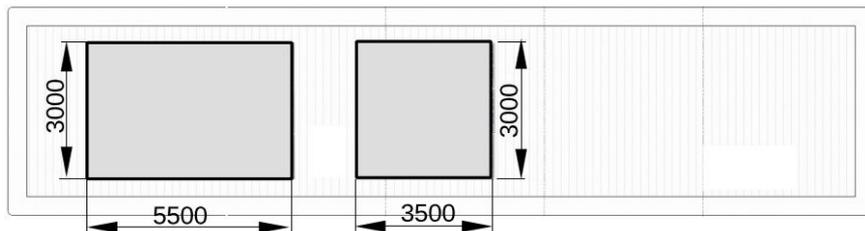


Figure 14 : zones réservées pour la mise en place de panneaux photovoltaïques – dimensions en mm.

Q25 - Déterminer le nombre de panneaux qu'il est possible d'installer sur le toit du « **Boathome** » compte tenu des dimensions des zones réservées à cet effet.

On détermine l'aire A_{panneau} d'un panneau $A_{\text{panneau}} = 1649 * 991 = 1634159 \text{ mm}^2$

On détermine l'aire A_1 de la première surface réservée $A_1 = 3000 * 5500 = 16500000 \text{ mm}^2$

On détermine l'aire A_2 de la deuxième surface réservée $A_2 = 3000 * 3500 = 10500000 \text{ mm}^2$

En faisant l'hypothèse que les panneaux soient juxtaposables on peut déterminer le nombre de panneaux implantables de la manière suivante :

$$\text{Pour l'aire } A_1, \text{ nb}_1 = \frac{A_1}{A_{\text{panneau}}} = \frac{16500000}{1634159} = 10,096 \text{ soit } 10 \text{ panneaux.}$$

$$\text{Pour l'aire } A_2, \text{ nb}_2 = \frac{A_2}{A_{\text{panneau}}} = \frac{10500000}{1634159} = 6,425 \text{ soit } 6 \text{ panneaux.}$$

En conclusion on peut raisonnablement implanter **16 panneaux**.

L'utilisation du modèle multiphysique préalablement validé enrichi d'une source d'alimentation solaire doit permettre au concepteur de valider l'apport de cette production d'énergie.

Par rapport au modèle précédent, ce modèle prend en compte :

- Une irradiance solaire (flux d'énergie solaire lumineuse) correspondant aux conditions de fonctionnement les moins avantageuses (moyenne d'irradiance du mois de décembre région Grand Est) et les plus avantageuses (moyenne d'irradiance du mois de juin région Grand Est) ;
- La position horizontale des panneaux sur le toit terrasse du « **Boathome** » ;
- Le nombre de panneaux préalablement calculé (question Q25).

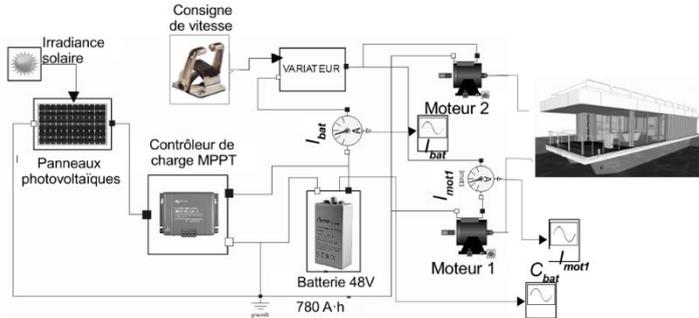


Figure 15 : modèle multiphysique de la motorisation avec alimentation par panneaux photovoltaïques.

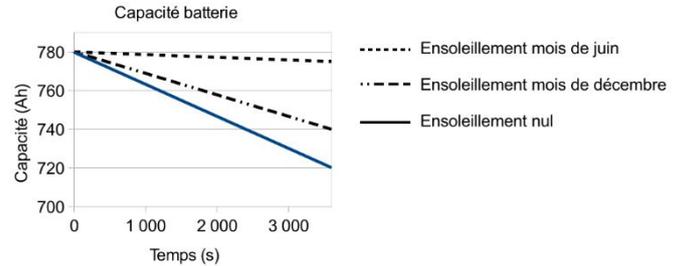


Figure 16 : résultats simulations avec batteries et panneaux photovoltaïques en vitesse de croisière.

Q26 - À partir des résultats de simulation (figure 16), **calculer** les taux de décharge de la batterie pour les périodes de juin et décembre sur une durée de 8 heures de navigation. **Conclure** sur l'apport des panneaux photovoltaïques en termes de gain d'autonomie lors d'une croisière de plusieurs jours.

En appliquant à nouveau le théorème de Thales on peut écrire les relations suivantes :

Pour le mois de juin :

$$\frac{775 - 780}{3600} = \frac{C_{\text{juin}} - 780}{8 * 3600} \text{ donc } C_{\text{juin}} = 8 * (775 - 780) + 780 = 740 \text{ A} \cdot \text{h}$$

$$\text{soit un taux de décharge de } \tau_{\text{juin}} = \frac{\|740 - 780\|}{780} = 5,1 \%$$

Pour le mois de décembre :

$$\frac{740 - 780}{3600} = \frac{C_{\text{décembre}} - 780}{8 * 3600} \text{ donc } C_{\text{décembre}} = 8 * (740 - 780) + 780 = 460 \text{ A} \cdot \text{h}$$

$$\text{soit un taux de décharge de } \tau_{\text{décembre}} = \frac{\|460 - 780\|}{780} = 41 \%$$

En conclusion l'ajout des panneaux photovoltaïques permet d'améliorer notablement l'autonomie du bateau.

Etape 5 : L'élaboration d'une synthèse du travail effectué.

Q27 - En s'appuyant sur les résultats et les conclusions des étapes 1 à 4, **expliquer** dans une synthèse de 5 à 6 lignes, en quoi les évolutions proposées sur le prototype du « **Boathome** » permettent de répondre au mieux aux exigences du cahier des charges notamment sur les aspects mobilité, confort et sécurité.

L'ensemble des démarches d'analyses effectuées permettent de valider les performances attendues du prototype pour l'ensemble des exigences du cahier des charges sauf, dans certains cas, au sens de la sécurité mais le choix d'un compromis et le rôle d'un ingénieur. Le choix d'implanter des panneaux solaires associés aux équipements de contrôle commande serait à comparer avec le coût d'une augmentation de la capacité de la batterie d'accumulateur et de l'augmentation de la masse embarquée.