

BACCALAURÉAT GÉNÉRAL

SÉRIE SCIENTIFIQUE

ÉPREUVE DE SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

Session 2019

Corrigé

Ce corrigé comporte 12 pages numérotées de 1 sur 12 à 12 sur 12.

Maison flottante mobile ou « Boathome »

2. Homologation du navire

Q1. Déterminer, à partir de la figure 2 page 4, 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.

D'après la figure 2 $T_e + h_D = H_C$ soit $h_D = H_C - T_e = 1,6 - 1,09 = 0,51$ m. Les conditions imposées par la norme, en termes de hauteur d'envahissement pour un navire de longueur de coque de 18 m, est de $h_{DR} = 0,4$ m minimum. La valeur relevée lors des essais étant supérieure, le navire respecte donc la norme sur ce critère.

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.

Il faut : $h_D \geq h_{DR}$ donc $h_{D\ limite} = 0,4$ m.

Angle $\phi_{maxi} \approx 4,35^\circ$.

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 page 6, l'équation issue du théorème du moment dynamique au point O en projection sur l'axe (O, \vec{x}_0) .

Théorème du moment dynamique au point O appliqué à l'ensemble S :

$$\sum \overrightarrow{M_{O, \vec{F}_{(ext \rightarrow S)}}} = \vec{\delta}_O(S/R_0)$$

À l'équilibre statique on a : $\vec{\delta}_O(S/R_0) = \vec{0}$

$$\text{Donc : } \overrightarrow{M_{O, \vec{F}_H}} + \overrightarrow{M_{O, \vec{P}_B}} + \overrightarrow{M_{O, \vec{P}_P}} = \vec{0} \text{ avec } \overrightarrow{M_{O, \vec{F}_H}} = \vec{0}$$

Projection du T.M.D. sur l'axe (O, \vec{x}_0) :

$$-||\vec{P}_B|| \cdot OG_B + m_P \cdot g \cdot (d \cdot \cos(\phi) - h \sin(\phi)) = 0 \text{ avec } OG_B = a \cdot \sin(\phi) \text{ et } ||\vec{P}_B|| = m_B \cdot g$$

D'où l'expression :

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

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

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

En reprenant l'expression du moment dynamique :

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

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

$$\frac{\sin(\phi)}{\cos(\phi)} = \tan(\phi) = \frac{m_P \cdot g \cdot d}{(m_B \cdot a + m_P \cdot h) \cdot g} \quad \text{et donc} \quad \phi = \arctan\left(\frac{m_P \cdot d}{(m_B \cdot a + m_P \cdot h)}\right)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{m_P \cdot d}{(m_B \cdot a + m_P \cdot h)}\right) = \frac{900 \cdot 1,8}{33043 \cdot 1,33 + 900 \cdot 0,93}$$

$$\phi = \arctan(0,0362) = 2,07^\circ$$

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.

Voir DR1.

Le tracé donne une hauteur d'envahissement $h_D = 0,47 \geq 0,4 \text{ m}$. Le navire répond donc aux exigences.

3. Confort des passagers

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 $\phi = 0^\circ$.

Théorème du moment dynamique appliqué au bateau au point O en projection sur l'axe (O, \vec{x}_0) pour $(\phi = 0^\circ)$:

$$m_P \cdot g \cdot 1,8 + m_1 \cdot g \cdot 1,425 = m_2 \cdot g \cdot 1,425$$

Et donc :

$$(m_2 - m_1) = \frac{m_P \cdot 1,8}{1,425}$$

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

La masse nécessaire à équilibrer le bateau est transférée du réservoir 1 vers le réservoir 2. La masse m_1 est donc allégée de cette valeur alors que la masse m_2 est augmentée de cette même valeur. Chaque litre transféré a un « double effet » sur le rétablissement de l'équilibre du bateau (allègement d'un côté et alourdissement de l'autre).

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.

Voir DR1.

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'envahissement.

La masse du navire est augmentée de 2000 kg.

Le volume d'eau déplacé par la coque du bateau en appliquant le principe d'Archimède sera donc :

$$V = \frac{m}{\rho_{\text{eau}}} = \frac{2000}{1000} = 2 \text{ m}^3$$

La surface à la flottaison du navire étant de 43 m², on peut en déduire l'enfoncement du navire :

$$\Delta h = \frac{V}{S} = \frac{2}{43} = 0,046 \text{ m}$$

La hauteur d'envahissement sera donc réduite de 0,046 m. La réserve à angle de gîte nul était de 0,11 m (Q1) et de 0,07 m (Q5) pour $\phi = 2,5^\circ$.

L'ajout des réservoirs est donc compatible avec les exigences de la norme.

4. Sécurité des passagers

Q10. Compléter, sur le document réponse DR2 page 22, la chaîne d'information proposée en plaçant les repères 1 à 9 du glossaire fourni.

Voir DR2

Gestion de l'alarme

Q11. Vérifier si la plage de mesure du capteur choisi est compatible avec les valeurs de ϕ_{maxi} 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 $0,1^\circ$.

Dans les caractéristiques du capteur il est précisé que la gamme de mesure est de -180° à $+180^\circ$ et ϕ_{maxi} compris entre $-4,3^\circ$ et $4,3^\circ$: on se situe dans cette gamme. Le choix du capteur est cohérent sur ce point.

Le nombre de valeurs différentes entre -180° et 180° avec une résolution de $0,1^\circ$ est de

3601. Il faudra donc au minimum 12 bits ($2^{12} = 4096$) pour coder ces 3601 valeurs différentes.

Q12. Comparer cette valeur mesurée à la valeur codée prévue pour un angle de $-4,3^\circ$. **Justifier** l'écart en utilisant les données constructeur du capteur du document technique DT2 page 20.

4,3 → 43 →	0000 0000 0010 1011
compl. À 1 :	1111 1111 1101 0100
compl. À 2 :	1111 1111 1101 0101
donc - 43 → - 4,3 →	1111 1111 1101 0101
La valeur reçue :	1111 1111 1101 0111 → nombre négatif
compl. À 2 :	1111 1111 1101 0110
compl. À 1 :	0000 0000 0010 1001 → donc 41 soit $-4,1^\circ$

L'écart est de $0,2^\circ$, or dans la documentation technique DT2 la précision du capteur est de $0,2^\circ$. Cette précision est compatible avec le cahier des charges ($0,5^\circ$)

Q13. En se basant sur l'exemple de la variable Durée, **compléter** le tableau du document réponse DR2 page 22 pour les variables Alarme, BpArrêt et ValeurCapteur.

Voir DR2

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

Voir DR3

Protocole de communication

Q15. À partir de l'exemple donné au bas du document technique DT2 page 20, **indiquer** le format de la trame complète pour la valeur d'angle $\phi=4,3^\circ$ et une valeur du « checksum » de FF.

$\$IIXDR,A,4.3,D,g\grave{a}te*FF<CR><LF>$

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

$$\text{Checksum} = 0E_{(16)} \oplus 29_{(16)} = 0000\ 1110_{(2)} \oplus 0010\ 1001_{(2)} = 0010\ 0111_{(2)} = 27_{(16)}$$

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.

En cas d'inversion de données transmises la valeur du « checksum » n'est pas affectée car la fonction « OU exclusif » est commutative et associative.

Ce système de détection d'erreur dans la transmission de la trame n'est pas fiable à 100% cependant la probabilité que 6 bits changent d'état sur les 24 transmis de la partie « variable » est très faible.

Pour info. :

Caractère	Code décimal	Code hexa.	Code binaire
« 4 »	52	34	0011 0100
« . »	46	2E	0010 1110
« 3 »	51	33	0011 0011

Checksum « 4.3 »

$$4 \oplus . = 34 \oplus 2E = 1A = 0011\ 0100 \oplus 0010\ 1110 = 0001\ 1010$$

$$4 \oplus . \oplus 3 = 1A \oplus 33 = 29 = 0001\ 1010 \oplus 0011\ 0011 = 0010\ 1001$$

Checksum « 3.4 »

$$3 \oplus . = 33 \oplus 2E = 1D = 0011\ 0011 \oplus 0010\ 1110 = 0001\ 1101$$

$$3 \oplus . \oplus 4 = 1D \oplus 34 = 29 = 0001\ 1101 \oplus 0011\ 0100 = 0010\ 1001$$

Validation du choix du capteur

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.

Pour le capteur choisi il est dit dans la documentation que la précision est de 0,2° à 25°C sur une plage de -180° à +180° avec une résolution de 0,1°.

Une précision de l'ordre de 0,2° sur une gîte maximale de ± 4,3° représente un écart acceptable vis à vis du cahier des charges.

Pour la transmission, la probabilité d'inversion étant faible, le contrôle s'avère suffisant.

5. Vérification de l'autonomie du « boathome »

Q19. Calculer, à partir des données constructeur (figure 10 page 13), la puissance nominale absorbée par l'induit P_a , le couple moteur nominal C_{MN} ainsi que le rendement nominal η_N .

$$\text{Puissance nominale absorbée : } P_a = U_N \cdot I_N = 48 \cdot 225 = 10800 \text{ W}$$

$$\text{Couple utile : } C_{MN} = \frac{P_U}{\omega_N} = \frac{P_U}{\frac{\pi \cdot N_N}{30}} = 159,2 \text{ Nm}$$

$$\text{Rendement nominal : } \eta_N = \frac{P_U}{P_a} = 0,93$$

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

On a : $C_{NM} = k \cdot I_N$ donc $k = \frac{C_{NM}}{I_N} = \frac{159,2}{225} = 0,71 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{A}^{-1}$

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 page 23.

À rotor bloqué, la vitesse de rotation du moteur $\omega_M = 0$ d'où $E = k \cdot \omega_M = 0$. En régime établi $U_L = L \cdot \frac{dI}{dt} = 0$. La loi des mailles se résume donc à écrire $U = R \cdot I$. On en déduit donc $R = \frac{U}{I} = \frac{5}{100} = 0,05 \Omega$.

Q22. Calculer la résistance $\|\vec{R}_{hydro}\|$ pour la vitesse de croisière et pour la vitesse maximale du bateau ainsi que la résistance $\|\vec{R}_{aéro}\|$ pour 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.

On peut déterminer les valeurs de $\|\vec{R}_{hydro}\|$ pour les vitesses de croisière et maximale :

$$\|\vec{R}_{hydro}\|_{crois} = 1389 \text{ N} \text{ et } \|\vec{R}_{hydro}\|_{maxi} = 4668 \text{ N}$$

La valeur moyenne des vents rencontrés par le navire est inférieure à $4 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$

$$\|\vec{R}_{aéro}\|_{moy} \leq 11,34 \text{ N}$$

L'effet de la résistance aérodynamique peut être négligée car elle représente environ 2 % de la traînée hydrodynamique à vitesse de croisière et 0,24 % à la vitesse maximale.

Q23. À partir des résultats de la simulation multiphysique du système de propulsion (figure 12), **relever**, en Joule, 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 de 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.

Énergie simulée pour une heure à $5,5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$:

$$E_{abs} \approx 1,03 \cdot 10^7 \text{ J} \rightarrow E_{abs} \approx 1,03 \cdot 10^7 / 3600 = 2861 \text{ W} \cdot \text{h pour 1 h (3600s)}$$

Énergie mesurée pour une heure à une vitesse de 5 à 6 km·h⁻¹ : 3000 W·h

$$\text{Écart : } \varepsilon_3\% = \frac{2861-3000}{3000} \times 100 = -4,63 \%$$

Origines de l'écart :

- la simulation est effectuée sur un cycle de 1 heure avec une phase démarrage puis une vitesse constante de 5,5 km·h⁻¹ : on ne tient pas compte dans la simulation des phases de ralentissement ;
- on néglige dans la simulation (et à juste titre) la résistance aérodynamique de la partie émergée du bateau.

Pistes d'amélioration du modèle de simulation : établir une simulation sur un cycle de déplacement plus proche du réel d'un parcours standard.

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.

Consommation pour 1 h (3600 s) : 780 – 720 = 60 A·h

50 % de 780 A·h = 390 A·h

Temps de navigation possible : $\frac{390}{60} = 6,5$ h soit 6h et 30 min.

Le temps de navigation avec uniquement les batteries est inférieur aux exigences de 8h.

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.

En utilisant les dimensions fournies pour les panneaux, il est possible de placer au maximum :

- 3 x 3=9 panneaux sur la zone de 3 m x 5,5 m
- 3 x 2=6 panneaux sur la zone de 3 m x 3,5 m

Soit un total de 15 panneaux

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 h de navigation. **Conclure** sur l'apport des panneaux en termes de gain d'autonomie sur une croisière de plusieurs jours.

En décembre : consommation pour 1h (3600 s) : 780 – 740 = 40 A·h

Pour 8 h de navigation : 40x8 = 320 A·h soit 41 % de la capacité de la batterie donc les 8 h d'autonomie pourront être respectées.

En juin : consommation pour 1h (3600 s) : $780 - 775 = 5 \text{ A}\cdot\text{h}$

Dans cette situation d'ensoleillement, les panneaux sont presque autosuffisants pour assurer la production d'énergie nécessaire à la propulsion à vitesse de croisière permettant d'augmenter l'autonomie du « Boathome ».

6. Synthèse.

Q27. En s'appuyant sur les résultats et les conclusions des parties 2 à 5, **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.

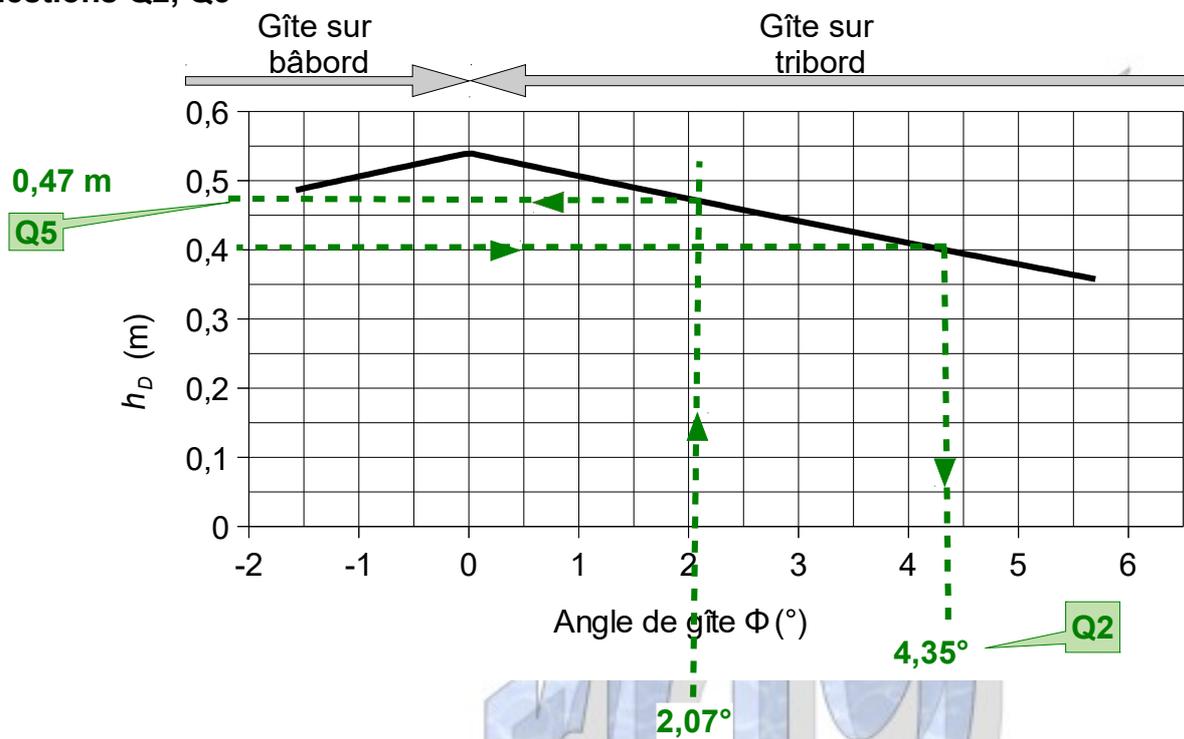
Les différents modèles de simulation utilisés ont montré des écarts relatifs par rapport aux valeurs expérimentales faibles. Ces modèles peuvent servir de base pour une aide à l'amélioration du prototype (consommation d'énergie par exemple) et permettre ainsi de rapprocher les performances réelles des futurs produits livrés de celles des attentes des clients utilisateurs sans avoir à développer de nouveaux prototypes matériels coûteux.

L'apport du système de ballastage permet d'assurer un niveau de confort supérieur pour les passagers.

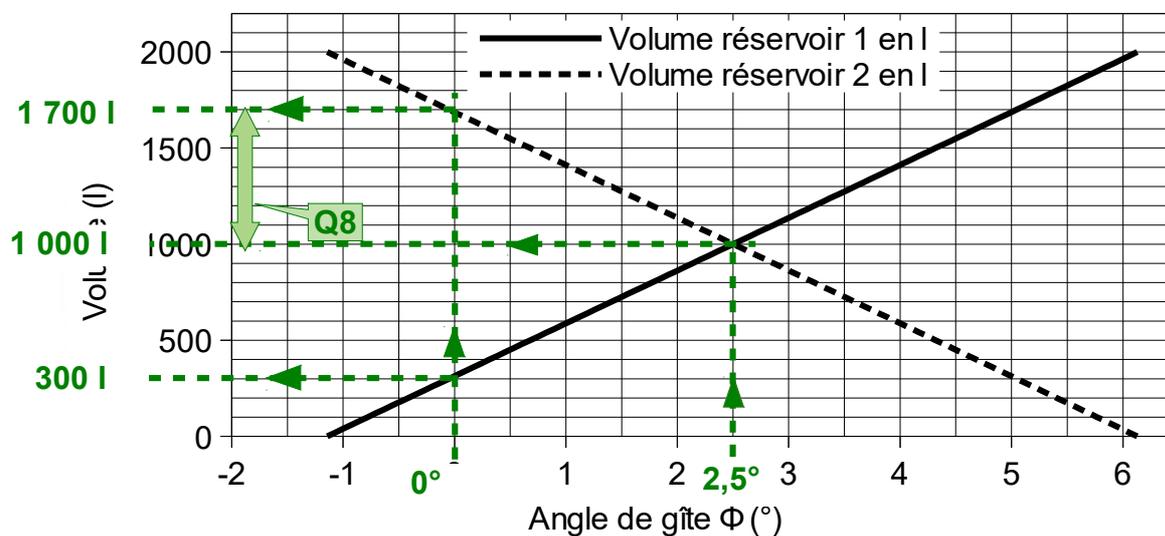
L'ajout des panneaux solaires sur la version finale permettra de gagner en autonomie et donc en capacité de mobilité pour le navire.

Document réponse DR1.

Questions Q2, Q5



Question Q8



Par lecture directe sur le volume du réservoir 2, on obtient $n_L = 1\,700 - 1\,000 = 700$ l

Ou en utilisant la relation obtenue en Q7 : $n_L = \frac{1}{2}(1\,700 - 300) = \frac{1400}{2} = 700$ l

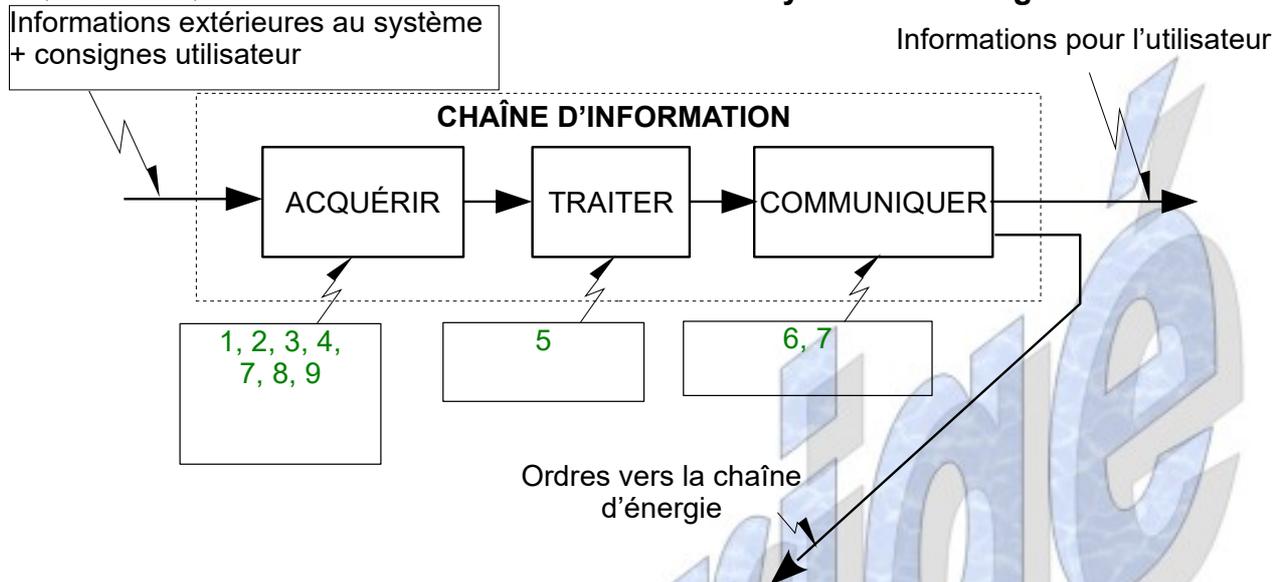
Q2 : Valeur de l'angle de gîte ϕ_{maxi} : $4,35^\circ$.

Q5 : Hauteur d'invasement h_D : $0,47$ m

Q8 : Valeur de N_L relevée pour $\phi = 2,5^\circ$: 700 L.

Document réponse DR2.

Question Q10. Chaîne d'information du système de navigation



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

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

Variable	Entrée	Sortie	Interne	Type		
				Entier	Flottant	Booléen
Durée			×	×		
Alarme		×				×
BpArrêt	×					×
ValeurCapteur	×				×	

Document réponse DR3.

Q14. Algorithme de gestion de l'alarme « angle de gîte ».

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*|...>4,3..... AlorsLire *Durée* ;Si...*Durée* > 2s.....Alors.....*Alarme*=1 ;

Fin Si ;

Fin si ;

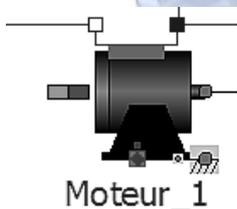
// Arrêt de l'alarme

Si BpArrêt =1...Alors

.....*Alarme*=0 ;

Fin Si ;

Q21.



Paramétrage du modèle

Résistance d'induit

0,05

Ohm

Inductance d'induit

1

mH

Constante de couple

0,71

N·m·A⁻¹

Inertie du rotor

0,05

kg·m²