

BACCALAURÉAT GÉNÉRAL

SÉRIE SCIENTIFIQUE

ÉPREUVE DE SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

Session 2018

Durée de l'épreuve : 4 heures

Coefficient 4,5 pour les candidats ayant choisi un enseignement de spécialité autre que sciences de l'ingénieur.

Coefficient 6 pour les candidats ayant choisi l'enseignement de sciences de l'ingénieur comme enseignement de spécialité.

Aucun document autorisé.

L'usage de tout modèle de calculatrice, avec ou sans mode examen, est autorisé.

Dès que le sujet est remis, assurez-vous qu'il est complet.
Ce sujet comporte 22 pages numérotées de 1 sur 22 à 22 sur 22.

Les pages 20 à 22 sont à rendre avec la copie.

Navette autonome NAVYA ARMA



Constitution du sujet

1	Texte.....	Page 3
2	Documents techniques.....	Page 19
3	Documents réponses.....	Page 20

Le sujet comporte 24 questions.

Les documents réponses DR1 à DR3 pages 20 à 22 sont à rendre avec la copie.

À l'heure où la majorité de la population française vit et travaille dans les grandes zones urbaines, la gestion du transport des biens et des personnes devient un enjeu pour le développement des villes. La problématique du « dernier kilomètre »¹ pousse les pouvoirs publics à proposer des formes de mobilités alternatives à la voiture individuelle : l'autopartage, vélo en libre service...

Lors de l'aménagement du quartier de la Confluence, la métropole de Lyon a eu pour objectif de développer un projet durable et intelligent, où se mêlent innovation technique, environnementale et architecturale.

Deux navettes Arma en accès gratuit prennent en effet le relais des tramways pour desservir entreprises, centres commerciaux et restaurants. Silencieuses, sans rejet polluant, les navettes Arma s'inscrivent totalement dans l'esprit de l'éco-quartier lyonnais.

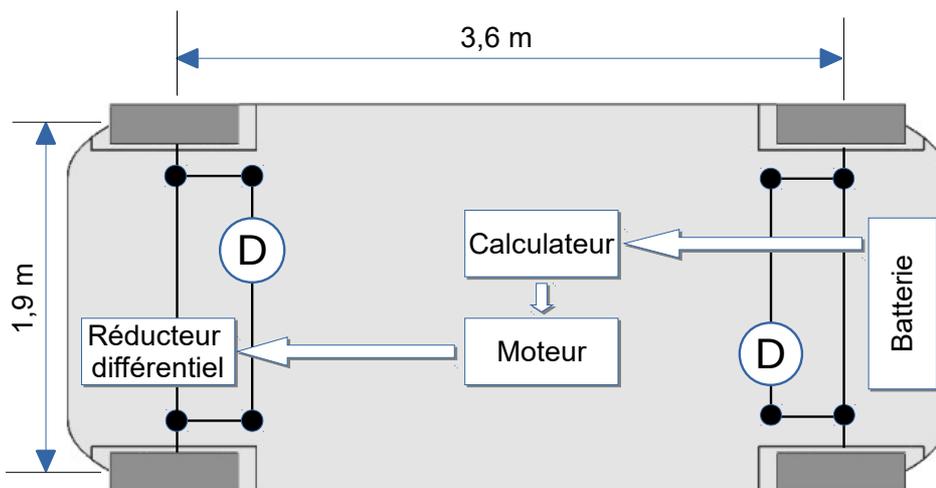
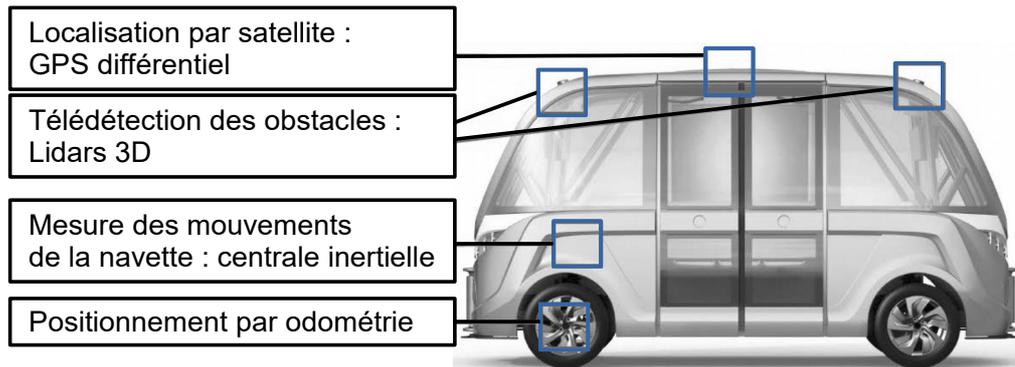


Figure 1 : navettes Arma le long de la Saône (source doc. Keolis)

La navette Arma est un véhicule sans conducteur, 100 % électrique, qui fonctionne sur batteries rechargeables par induction. Ses systèmes de guidage lui permettent de trouver son chemin et de naviguer efficacement. Lidars (télé-détection par laser), GPS, centrale inertielle et odométrie (mesure de la distance parcourue) permettent à Arma de se positionner à quelques centimètres près de la cible souhaitée. Elle peut identifier tous les types d'obstacles sur la route : fixes tels que les poteaux (lecture de la signalisation) ou mobiles comme les piétons.

La figure 2 page 4 présente certaines caractéristiques de la navette.

1 **Dernier kilomètre** : expression désignant l'ensemble des opérations et équipements mis en œuvre pour la distribution finale des biens ou services. Cette expression s'applique aussi pour le transport des personnes en milieu urbain.



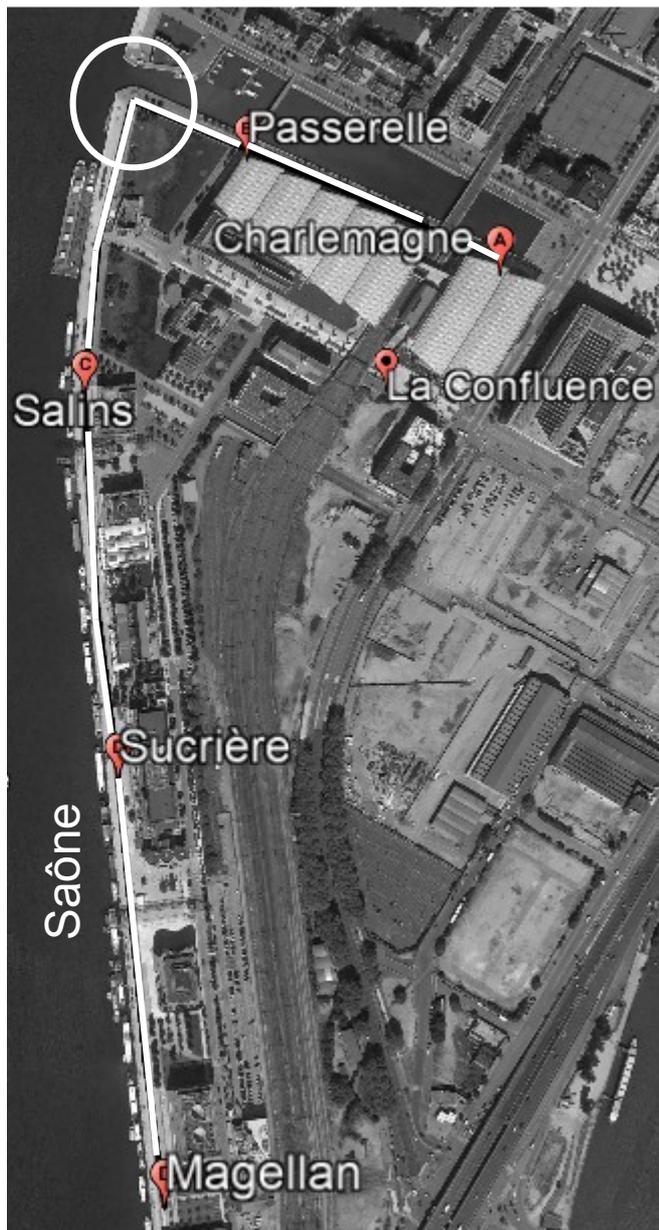
D : mécanisme de direction électrique à crémaillère

 <p>15 places masse à vide : 2 400 kg masse totale en charge : 3 450 kg</p>	 <p>la navette répète le circuit programmé avec une précision de 2 cm</p>
 <p>puissance du moteur de traction : 15 kW vitesse maximum : 45 km·h⁻¹ vitesse de croisière : 25 km·h⁻¹</p>	 <p>la navette détecte les obstacles statiques et dynamiques et adapte sa trajectoire</p>
 <p>batterie LiFePO₄ énergie : 33 kW·h durée de charge : 5 à 12 heures autonomie : 9 heures</p>	 <p>la navette peut croiser d'autres véhicules sans perturbation</p>
	 <p>la navette peut être dépassée par d'autres véhicules</p>
	 <p>la navette respecte les priorités sur son circuit</p>

Figure 2 : caractéristiques de la navette ARMA

Le chemin suivi par la navette Arma est situé dans le quartier de la Confluence à Lyon (Rhône). Il est représenté figure 3. Il part de la station Charlemagne et s'arrête à la station Magellan.

La navette autonome ARMA est programmée par apprentissage du parcours à effectuer. Le suivi de trajectoire et la circulation en milieu partagé avec des piétons imposent une réactivité directionnelle de la navette importante.



Arrêts	Distance cumulée
A. Charlemagne	0 m
B. Passerelle	250 m
C. Salins	635 m
D. Sucrière	1 000 m
E. Magellan	1 320 m

Figure 3 : le trajet suivi par Arma dans le quartier de la Confluence

Le sujet va permettre d'étudier en quoi l'intégration de la navette autonome ARMA dans le maillage des transports de l'éco-quartier, permet de proposer une alternative innovante et intelligente à l'automobile.

1. L'intérêt de la navette Arma dans le quartier de la Confluence

Objectif de cette partie : justifier l'intégration de Arma dans l'écoquartier lyonnais.

Données :

- le trajet de la navette Arma le long de la Saône est décrit sur la figure 3 page 5 ;
- la durée d'un aller-retour est de 10 min 30 s à la vitesse moyenne de $15 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$;
- la durée d'exploitation journalière est de 9 h ;
- l'énergie consommée est de 85 % de la capacité de la batterie pour une utilisation de 9 h (15 % de cette énergie sont nécessaires pour rejoindre le site de recharge) ;
- l'émission moyenne de CO_2 par $\text{kW}\cdot\text{h}$ d'électricité produit en France est de $0,09 \text{ kg CO}_2\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$;
- le nombre de passagers embarqués est de 15.

Q1. À partir des données fournies, **calculer** l'énergie consommée en $\text{kW}\cdot\text{h}$ par le véhicule pour parcourir un aller-retour et **en déduire** l'énergie consommée par kilomètre parcouru (en $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{km}^{-1}$).

Q2. **Évaluer** l'impact environnemental, en $\text{kg eq CO}_2\cdot\text{km}^{-1}$, de l'exploitation de la navette Arma dans le quartier lyonnais. **En déduire** l'émission de gaz à effet de serre (GES) par passager en $\text{g eq CO}_2\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{passager}^{-1}$.

Émission de gaz à effet de serre par mode de transport en $\text{g eq CO}_2\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{passager}^{-1}$



Figure 4 : émission de GES par mode de transport en commun urbain.

transport en commun	tramway	métro	bus	Navette Arma	niveau de critère
investissement infrastructures	3	3	1	1	1 : aucun investissement 2 : investissement moyen 3 : investissement lourd
« dernier kilomètre »	3	3	2	1	1 : répond parfaitement 2 : répond partiellement 3 : ne répond pas
autonomie fonctionnelle	2	2	3	1	1 : aucune intervention humaine 2 : intervention humaine limitée 3 : intervention humaine nécessaire
nombre de passagers	1	1	2	3	1 : important 2 : moyen 3 : faible

Figure 5 : comparatif de plusieurs solutions de transport.

Q3. À partir du résultat de la question 2 et des données des figures 4 et 5 pages 6 et 7, **conclure en quelques lignes** sur la pertinence de l'implantation de la navette Arma dans le quartier lyonnais de la Confluence d'un point de vue environnemental et sociétal.

2. La navette est-elle capable de suivre le trajet souhaité ?

Objectif de cette partie : vérifier que la solution technique adoptée par le constructeur permet de parcourir le trajet désiré.

Entre l'arrêt 2 (Passerelle) et l'arrêt 3 (Salins), le véhicule doit franchir un virage A-B dont le rayon de courbure peut poser une difficulté.

La figure 6 représente la trajectoire que les ingénieurs de Navya souhaitent suivre pour programmer le trajet le long de la Saône.

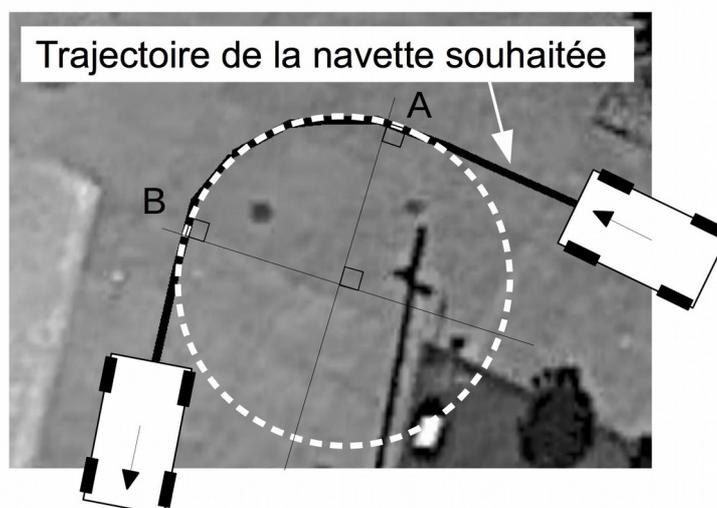


Figure 6 : virage entre les arrêts Passerelle et Salins

Donnée : afin de joindre les points A et B, le véhicule parcourt une distance de 8 m en suivant une trajectoire circulaire tangente représentée en pointillés sur la figure 6 page 7.

Q4. Calculer en mètres, le rayon de la trajectoire que doit suivre la navette.

La direction de la navette ARMA est construite autour d'un mécanisme à crémaillère et biellettes, piloté par un motoréducteur électrique à courant continu alimenté en 24 V au moyen d'une batterie. Une schématisation du mécanisme est donnée figure 7.

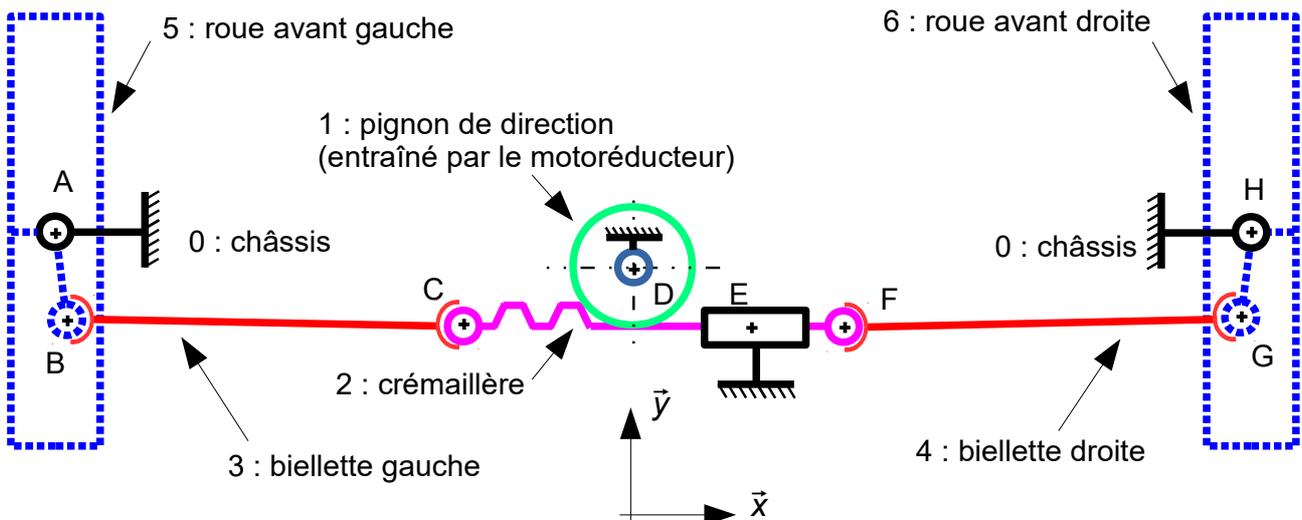


Figure 7 : schéma cinématique en vue de dessus du système de direction des roues avant

Q5. Sur le document réponse DR1 page 20, **compléter** le diagramme de la structure fonctionnelle du mécanisme de direction en plaçant les composants manquants. **Indiquer** la nature des énergies repérées dans la chaîne d'énergie.

Le faible rayon de la trajectoire entre les arrêts Passerelle et Salins impose de s'interroger sur les capacités de la navette à suivre cette trajectoire.

Les ingénieurs de Navya envisagent la possibilité d'équiper la navette de 2 ou 4 roues directrices.

Idéalement, afin de garantir le roulement sans glissement des roues sur le sol dans une trajectoire courbe, les axes de rotation des quatre roues doivent converger vers le centre de la trajectoire comme représenté sur le document technique DT1 page 19.

Les figures du document technique DT1 représentent la navette ARMA pendant le virage décrit dans la figure 6 page 7, dans deux configurations : roues avant directrices ou quatre roues directrices.

L'angle de pivotement des roues varie en fonction du rayon du virage. Les figures 8 et 9 page 9 représentent l'évolution des angles de pivotement de chaque roue dans les configurations à deux ou quatre roues directrices.

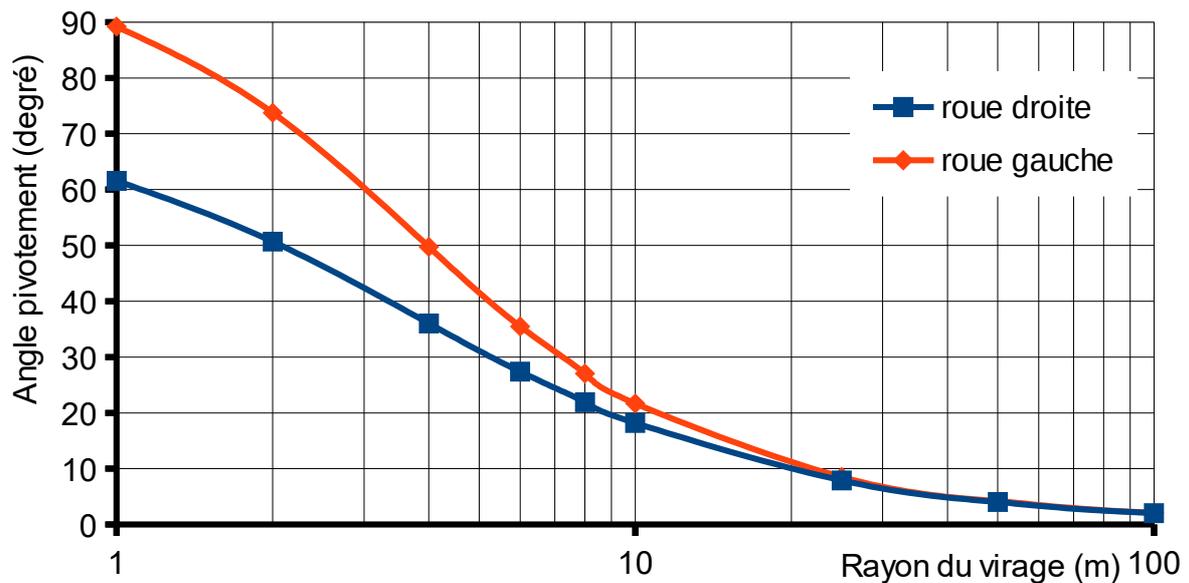


Figure 8 : configuration avec roues avant directrices

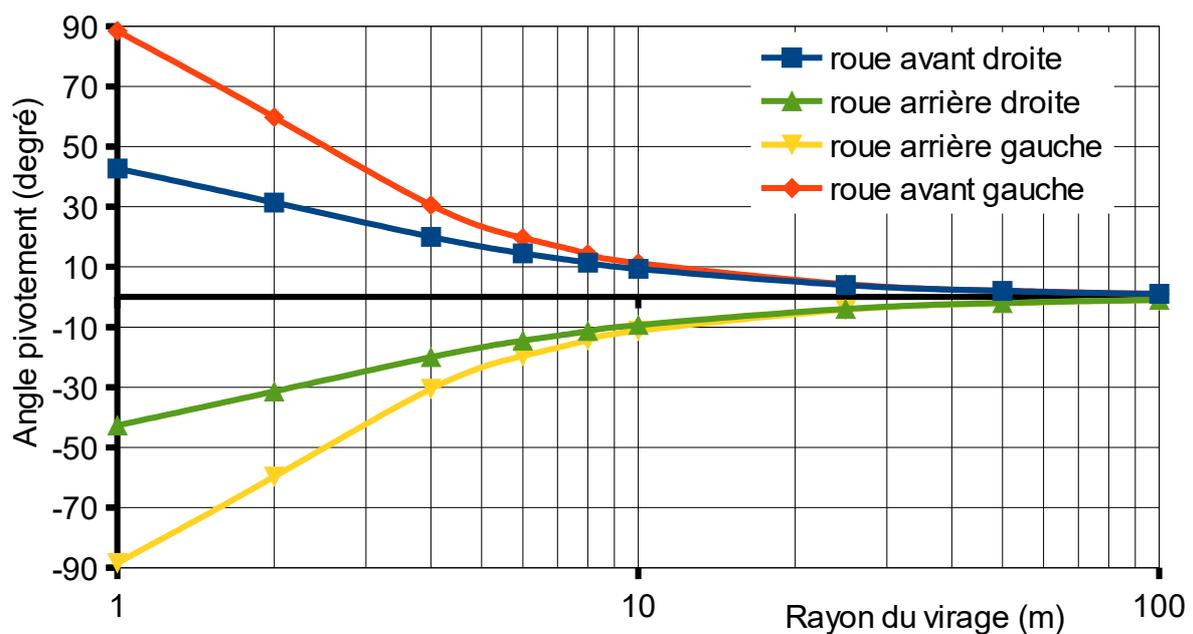


Figure 9 : configuration avec quatre roues directrices

Le rayon de la partie circulaire de la trajectoire entre les arrêts Passerelle et Salins est considéré égal à 5 m.

Q6. À l'aide des figures 8, 9 et du document technique DT1 page 19, **déterminer** les valeurs des angles de pivotement α_A et α_D pour la configuration à deux roues directrices et les valeurs des angles de pivotement α_A , α_B , α_C et α_D pour la configuration à quatre roues directrices.

La direction de la navette Arma est basée sur un système à crémaillère (voir figure 7 page 8). Un engrenage pignon-crémaillère transforme le mouvement de rotation du motoréducteur en mouvement de translation qui est transmis aux pivots des roues par des biellettes ce qui provoque le pivotement des roues.

La figure 10 représente les angles de pivotement des roues de la navette de chaque essieu en fonction du déplacement de la crémaillère compris entre -60 mm et +60 mm.

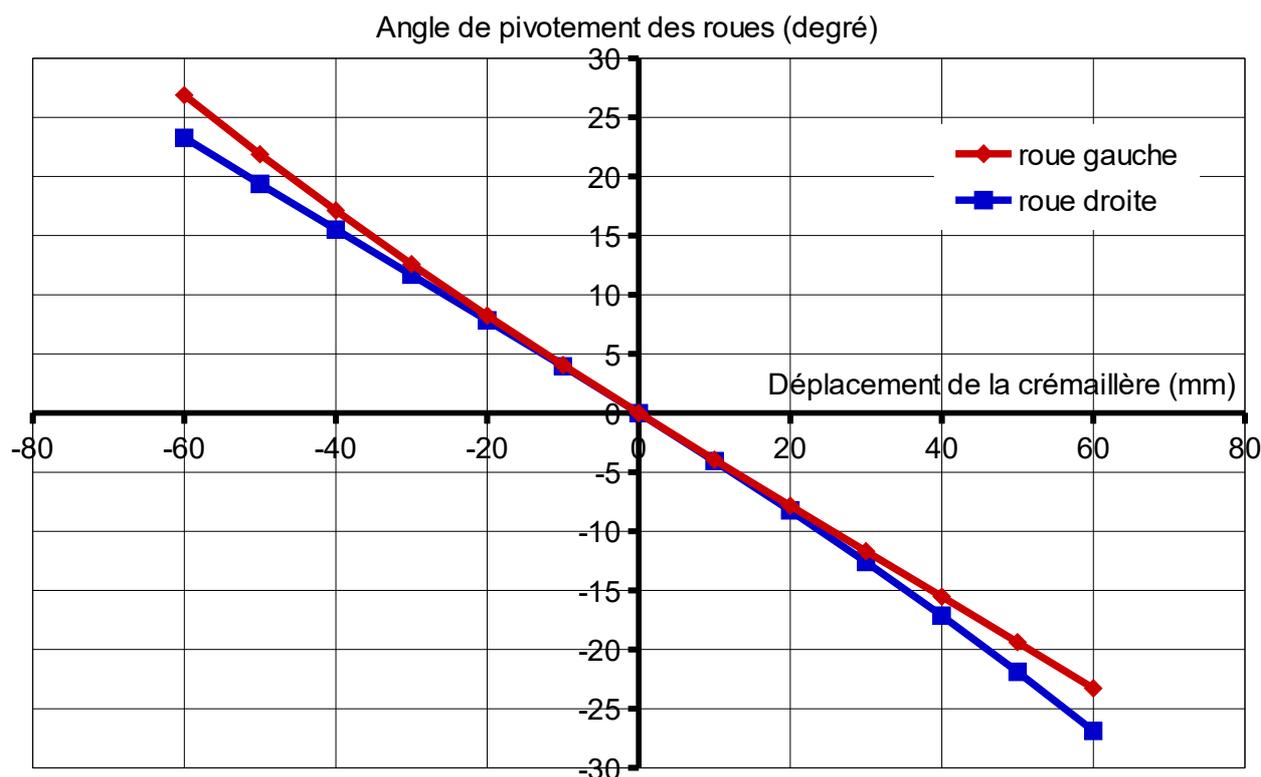


Figure 10 : caractéristiques du système de direction

Q7. Choisir, en justifiant à partir de la figure 10, la configuration de direction (deux ou quatre roues directionnelles) la mieux adaptée à la navette pour suivre la trajectoire imposée.

3. Analyse du comportement de la direction électrique du véhicule

Objectif de cette partie : valider le choix de l'actionneur retenu.

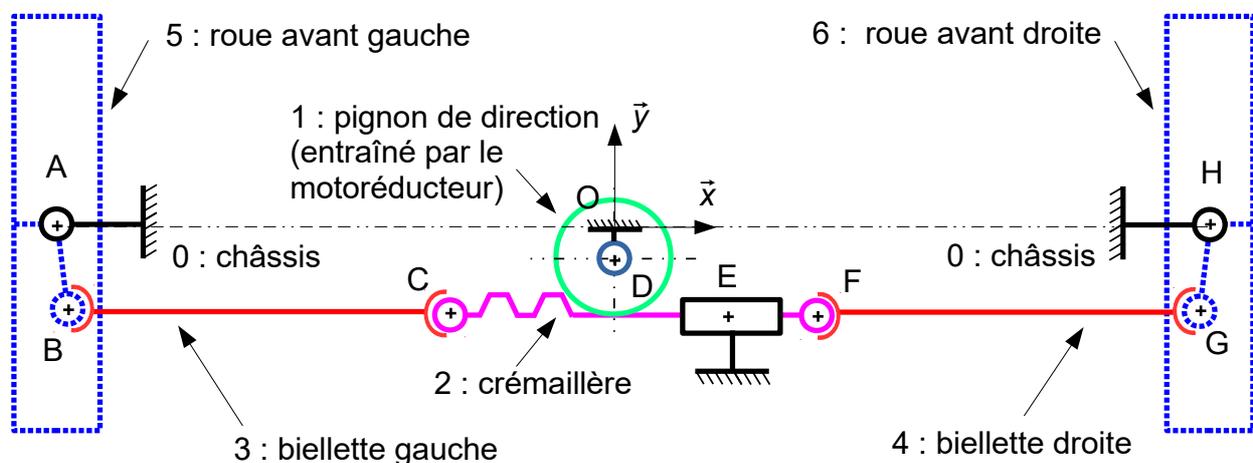
La mise en mouvement du système de direction de la navette Arma est assurée par un motoréducteur électrique entraînant le pignon de direction en liaison avec la crémaillère. La géométrie du mécanisme de transformation de mouvement permettant d'orienter les roues directrices permet d'assurer les conditions de non glissement des pneumatiques lors d'un virage (figure 11).

Les résistances au pivotement du sol sur les pneumatiques imposent de vérifier le bon dimensionnement de l'actionneur pour toute la plage de variation angulaire de l'orientation des roues.

On souhaite vérifier la capacité de l'actionneur à mettre en mouvement le système de direction dans le cas défavorable où le véhicule est à son maximum de charge.

Hypothèses de l'étude :

- le mécanisme est assimilé à un mécanisme plan ;
- le poids des différentes pièces du mécanisme est négligeable devant les autres actions mécaniques ;
- le mécanisme est symétrique par rapport au plan (O, \vec{y}, \vec{z}) .



Coordonnées géométriques des liaisons dans la position de l'étude en mm		
	x	y
O	0	0
F	302	-152
G	932	-152
H	950	0

Figure 11 : schéma cinématique du système de direction en vue de dessus

Smart NMRV40D.907YT02L

Tension nominale :	24 V
Puissance nominale :	320 W
Courant nominal :	13,5 A
Courant maximal :	105 A
Vitesse nominale :	30 tour·min ⁻¹
Couple nominal :	45 N·m
Couple maximal :	350 N·m
Rapport de réduction :	50



Figure 12 : spécifications techniques du moto-réducteur pré-sélectionné pour la direction de la navette

Données :

- moment de résistance au pivotement du sol sur les roues de la navette à l'arrêt en considérant un coefficient de frottement au pivotement de 0,7 entre le pneu et la route $\vec{M}(A, \text{sol} \rightarrow 5) = -365 \cdot \vec{z}$ et $\vec{M}(H, \text{sol} \rightarrow 6) = -365 \cdot \vec{z}$ exprimés en N·m ;

- actions mécaniques des biellettes 3 et 4 sur la crémaillère 2

$$\mathcal{T}(3 \rightarrow 2) = \left\{ \begin{array}{l} \vec{R}(3 \rightarrow 2) = -F_1 \cdot \vec{x} \\ \vec{M}(C, 3 \rightarrow 2) = \vec{0} \end{array} \right\}_C \quad \text{et} \quad \mathcal{T}(4 \rightarrow 2) = \left\{ \begin{array}{l} \vec{R}(4 \rightarrow 2) = -F_2 \cdot \vec{x} \\ \vec{M}(C, 4 \rightarrow 2) = \vec{0} \end{array} \right\}_F$$

Q8. Sur le document réponse DR2 page 21, **compléter** le graphe des liaisons en précisant les caractéristiques de ces liaisons (axes, directions, normales).

Les mouvements du mécanisme étant lents, les effets dynamiques seront donc négligeables par rapport aux actions sur les pièces.

Q9. **Exprimer**, au point H, l'équation des moments issue du principe fondamental de la dynamique appliqué à l'ensemble {4+6}. **En déduire** la valeur F_2 de l'action de résultante de la crémaillère 2 sur la biellette 4.

Compte tenu de la symétrie du mécanisme, les actions mécaniques des biellettes 3 et 4 sur la crémaillère 2 sont identiques. La somme des actions mécaniques F_1 et F_2 est estimée à 4 800 N. Le pignon de direction entraînant la crémaillère a un diamètre primitif de 19 mm.

Q10. **Déterminer** le couple moteur à appliquer au pignon de direction afin d'assurer le mouvement des roues.

Afin d'analyser le comportement du mécanisme de direction de la navette Arma pour tous les angles de braquage, un modèle multi physique figure 13 a été réalisé.

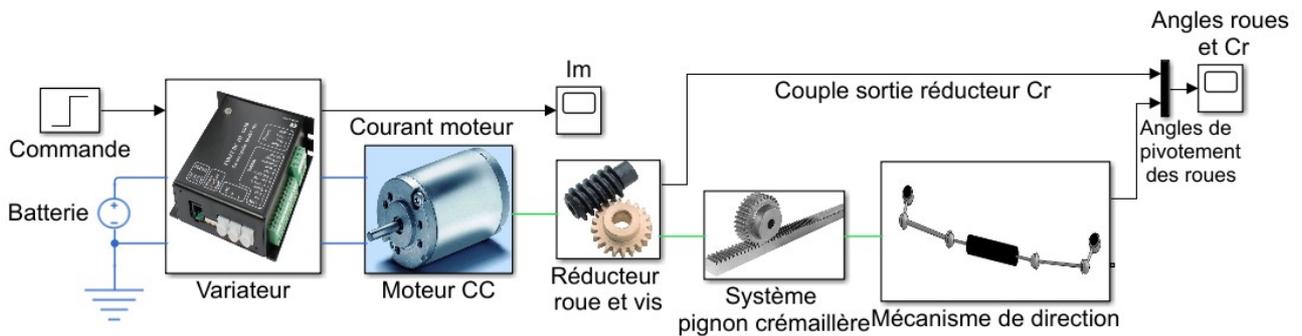


Figure 13 : modèle multi physique du système de direction

L'exploitation de ce modèle permet d'obtenir les courbes représentées sur la figure 14.

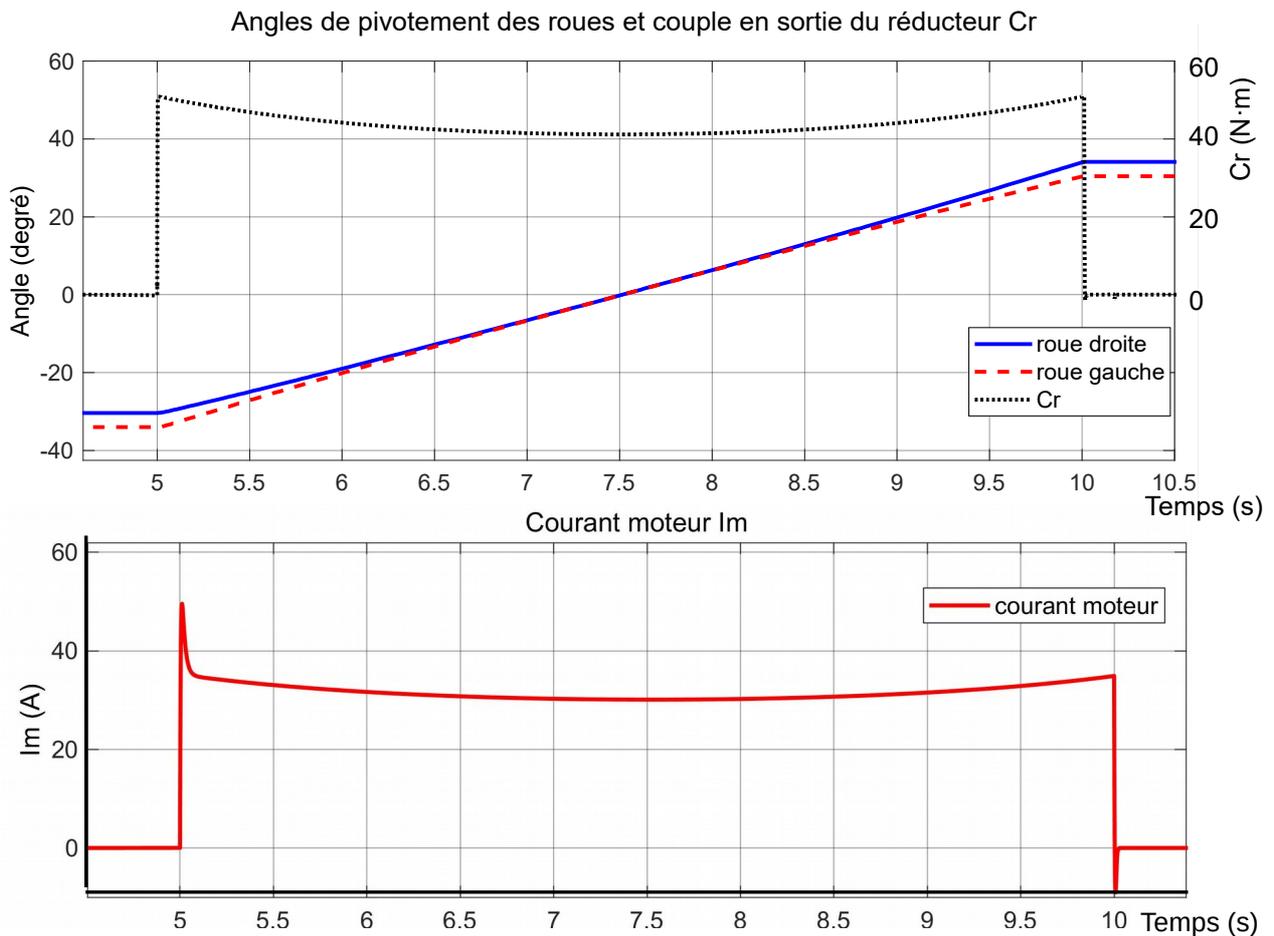


Figure 14 : résultats de la modélisation multi physique du mécanisme de direction de la navette

Les résultats d'essais effectués sur la direction du véhicule sont donnés figure 15.

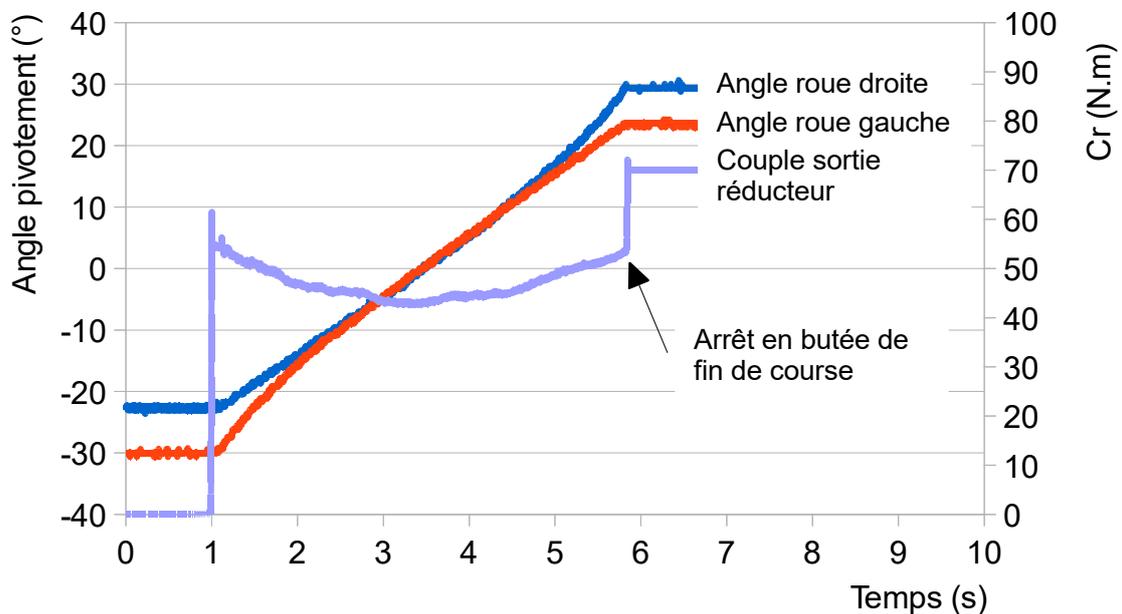


Figure 15 : mesures réalisées sur la navette

On souhaite évaluer la validité du modèle en comparant les évolutions des grandeurs physiques, les décalages temporels au sein d'un essai et les écarts d'amplitudes.

Q11. En comparant les angles de pivotement des roues de la simulation et les résultats (figure 14 page 13) des mesures effectuées sur la navette (figure 15), **analyser** la validité du modèle d'un point de vue cinématique.

Q12. Relever les valeurs extrêmes du couple en sortie de réducteur obtenues expérimentalement et par simulation. **Compléter** la première ligne du tableau du document réponse DR2 page 21.

Q13. Calculer l'écart relatif (en %) entre les valeurs mesurées et simulées. **Compléter** le tableau du document réponse DR2. **Justifier** ces écarts et **analyser** la validité du modèle du point de vue des actions mécaniques.

Q14. À l'aide des figures 14 et 15, **discuter** le choix du constructeur concernant le motoréducteur sélectionné en s'appuyant sur les grandeurs physiques courant et couple.

4. Contrôle du suivi de trajectoire de la navette

Objectif de cette partie : valider la nécessité d'utiliser plusieurs systèmes de positionnement odométrie et GPS.

La technologie sans conducteur nécessite une localisation de la navette très précise. Afin de garantir un positionnement à 2 cm près, le constructeur met en œuvre une architecture de capteurs conçue pour permettre au véhicule d'avoir une perception optimale de son environnement. Parmi les différentes solutions mises en œuvre, l'odométrie permet de connaître les déplacements de la navette par mesure de la rotation des roues.

L'étude porte sur le virage entre les arrêts Passerelle et Salins décrit figures 3 et 6 pages 5 et 7.

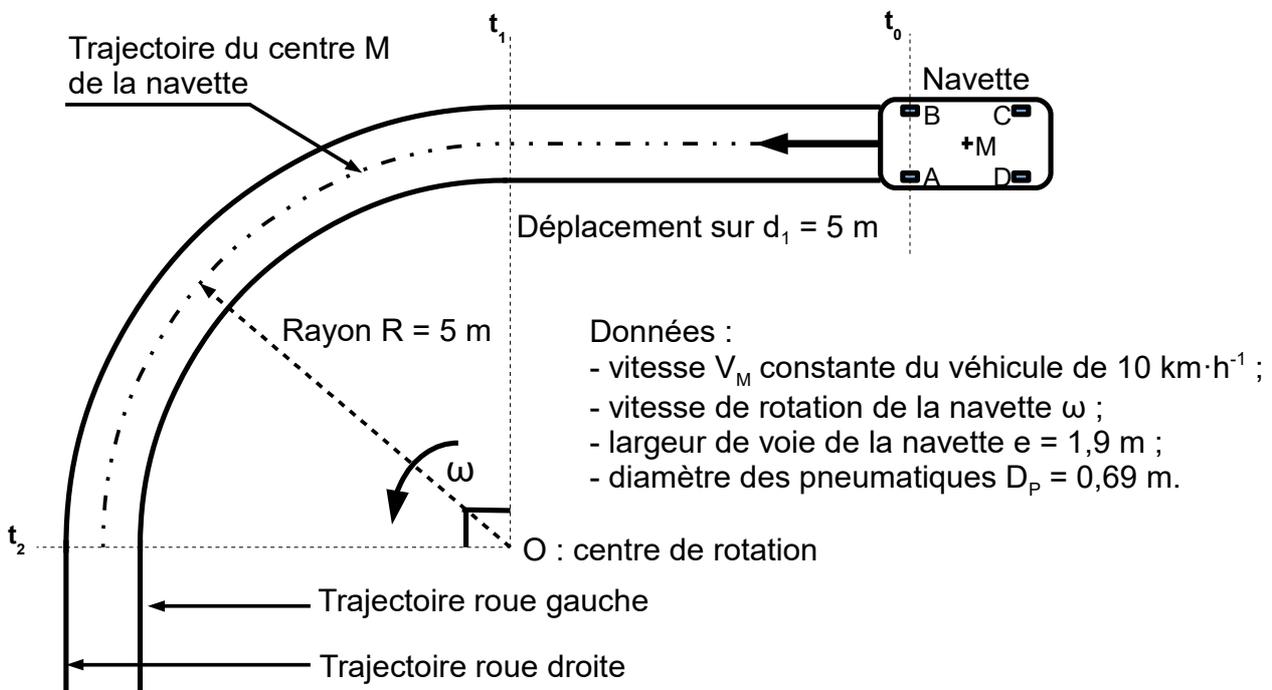


Figure 16 : modélisation de la trajectoire retenue

Q15. À partir des données, **déterminer** les rayons R_A et R_B de la trajectoire de la roue A et de la roue B pendant le virage. **En déduire** les vitesses V_A et V_B en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ des points A et B.

Q16. Le déplacement du véhicule s'effectuant sans glissement, **calculer** les vitesses de rotation n_A et n_B des roues A et B en $\text{tr} \cdot \text{s}^{-1}$.

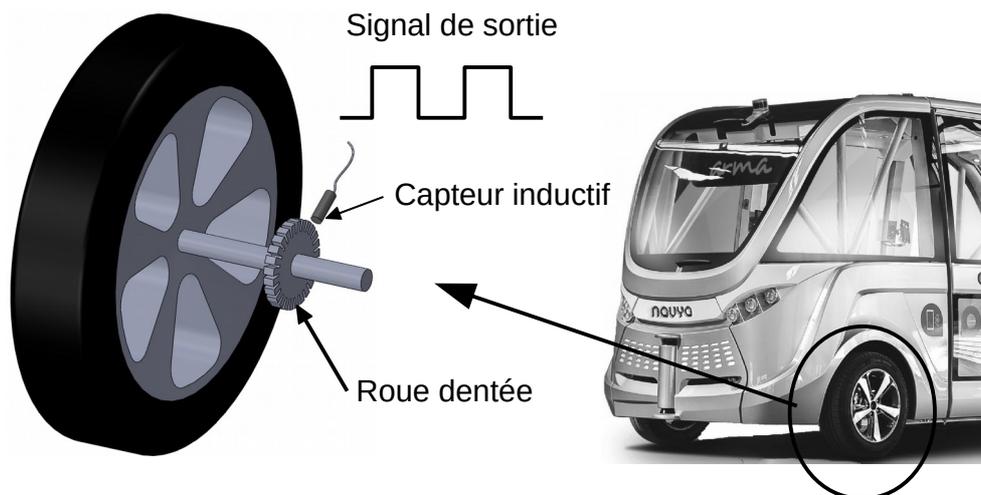


Figure 17 : schéma de principe d'un capteur odométrique d'une roue

L'arbre de transmission de chaque roue du véhicule est équipé d'une roue dentée de 300 dents. Un capteur inductif, placé perpendiculairement à la roue dentée, fournit un signal rectangulaire au passage de chaque dent.

Q17. Exprimer les fréquences f_A et f_B des signaux issus des capteurs roue droite A et roue gauche B, en fonction des caractéristiques de la roue dentée et de la fréquence de rotation des roues. **Calculer** f_A , f_B et le rapport $\frac{f_A}{f_B}$, pour la partie de trajectoire en ligne droite et pour la partie de trajectoire en 1/4 de cercle.

Q18. Indiquer le type de mouvement de la navette en fonction du rapport des fréquences $\frac{f_A}{f_B} > 1, = 1$ ou < 1 .

Les signaux issus des capteurs sont transmis à un ordinateur qui traite les informations.

Le programme retrace la trajectoire réellement suivie et la compare avec celle prévue sur l'itinéraire afin de corriger la direction du véhicule si nécessaire.

Un algorithme retrouve le rayon de courbure R du virage à partir du rapport des fréquences f_A et f_B et de la largeur de la voie par l'équation :
$$R = \frac{e}{2} \cdot \frac{1 + f_A/f_B}{|1 - f_A/f_B|}$$

Un algorithme présenté figure 18 contribue aussi à l'élaboration de la trajectoire suivie.

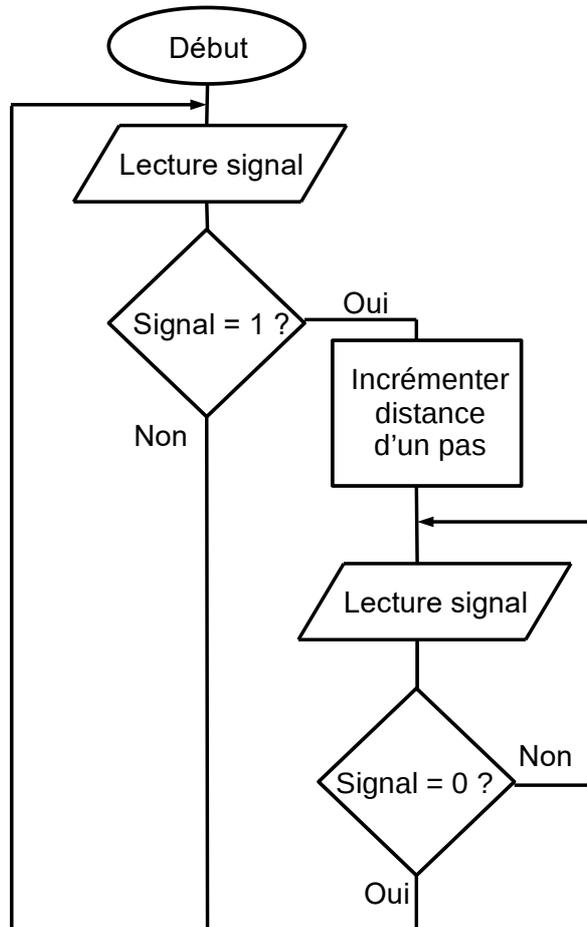


Figure 18 : extrait d'une partie du programme

Q19. Expliquer la fonction réalisée par cette partie du programme (figure 18) et **proposer** un algorithme permettant de doubler la précision sur la mesure de la distance en complétant le document réponse DR3 page 22.

Q20. Déterminer les distances parcourues en mètres par chacune des roues D_A et D_B pour les différentes portions (entre t_0 et t_1 et entre t_1 et t_2) du parcours proposé.

Déterminer la résolution des capteurs en cm, et en **déduire** le nombre d'impulsions reçues N_A et N_B pour les différentes phases de la trajectoire retenue.

La mesure des signaux délivrés par les capteurs roue gauche et droite lors d'un essai **en ligne droite** à vitesse constante alors qu'un des pneumatiques est dégonflé a donné les oscillogrammes présentés figure 19 page 18.

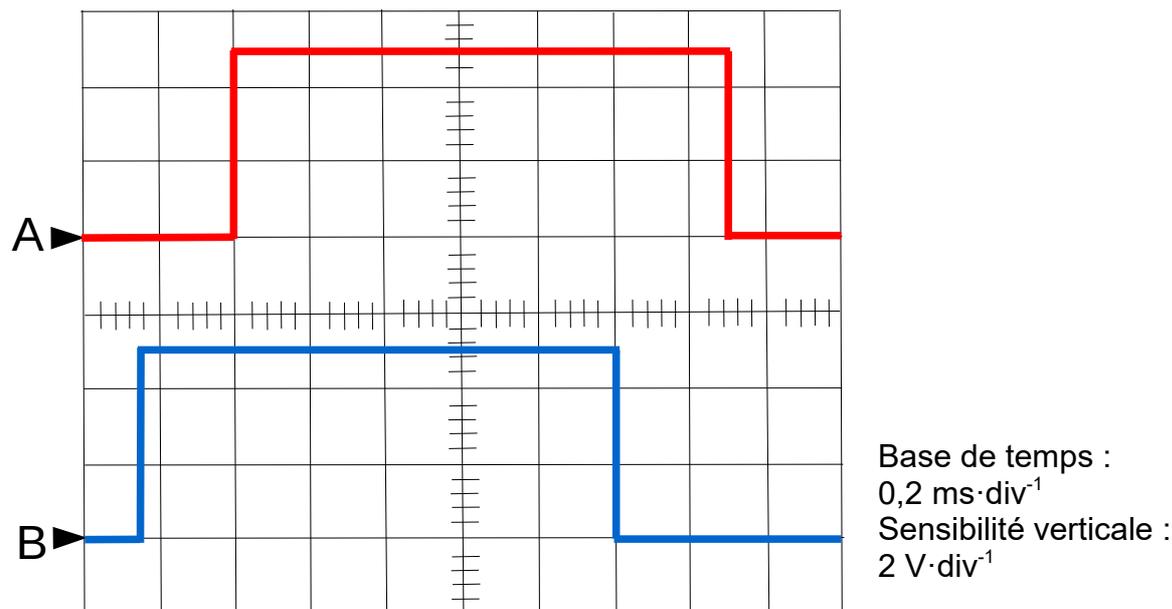


Figure 19 : demi-période des signaux délivrés par les capteurs

Q21. Relever précisément les périodes de chaque signal et **indiquer** quel est le pneu dégonflé. **Citer** trois autres situations pour lesquelles on peut enregistrer des vitesses n_A et n_B des roues A et B différentes.

Q22. Expliquer pourquoi le calculateur peut perdre la trajectoire réelle et **conclure** par rapport aux performances de l'odométrie.

Arma est aussi équipée d'un système de localisation par satellite GPS différentiel dont la particularité est de se référencer à partir d'une balise au sol de position connue. Cela permet de déterminer l'erreur de position du GPS lorsque les signaux émis par les satellites traversent l'atmosphère. Cette balise envoie à la navette Arma la correction à mettre en place, et permet un positionnement au centimètre près.

Q23. Justifier le fait que le constructeur ait mis en œuvre plusieurs solutions pour obtenir les informations concernant le déplacement du véhicule, en indiquant les avantages et inconvénients de chacune des deux solutions (odométrie et GPS différentiel).

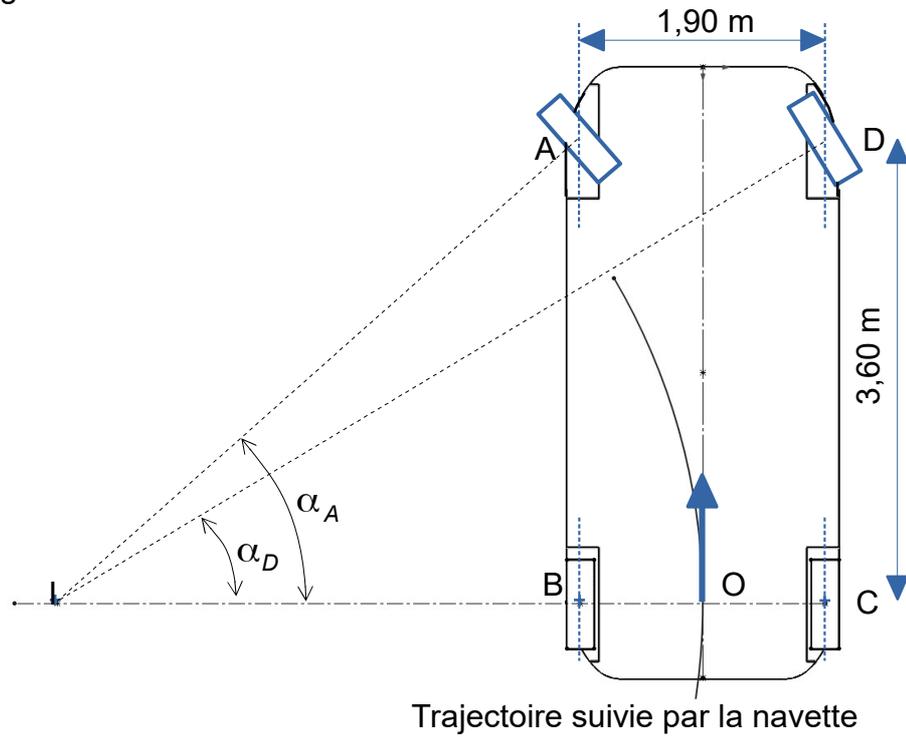
5. Synthèse

Objectif de cette partie : faire un bilan et **vérifier** que l'objectif initial est atteint.

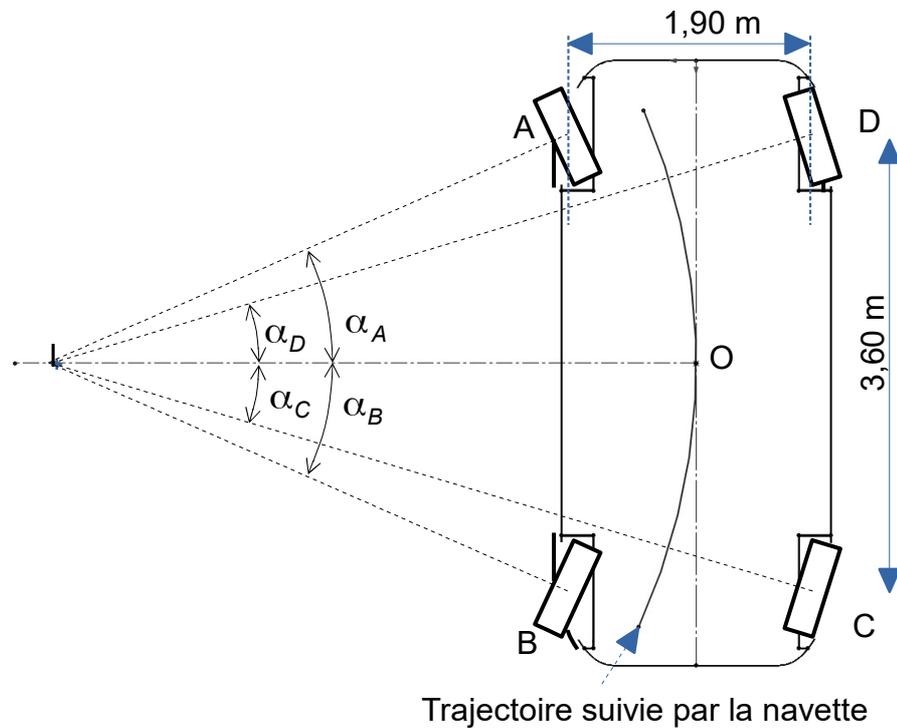
Q24. Compte tenu des résultats et conclusions obtenus dans les parties précédentes, **conclure** sur la capacité de la navette à suivre la trajectoire le long de la Saône et sur la pertinence de son intégration dans l'éco-quartier de la Confluence.

Document technique DT1. Navette en situation de virage

Navette en configuration 2 roues directrices



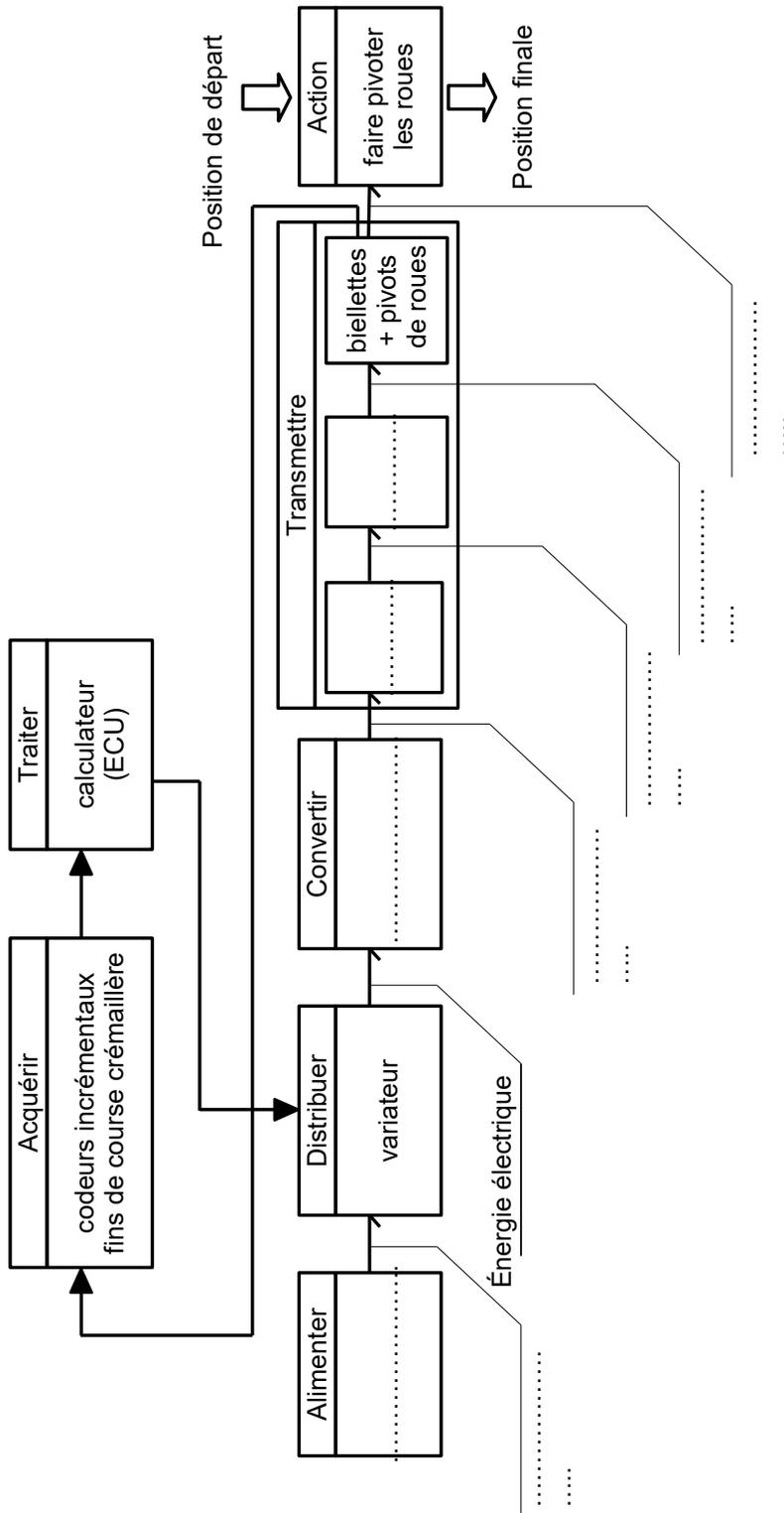
Navette en configuration 4 roues directrices



À rendre avec la copie

Document réponse DR1.

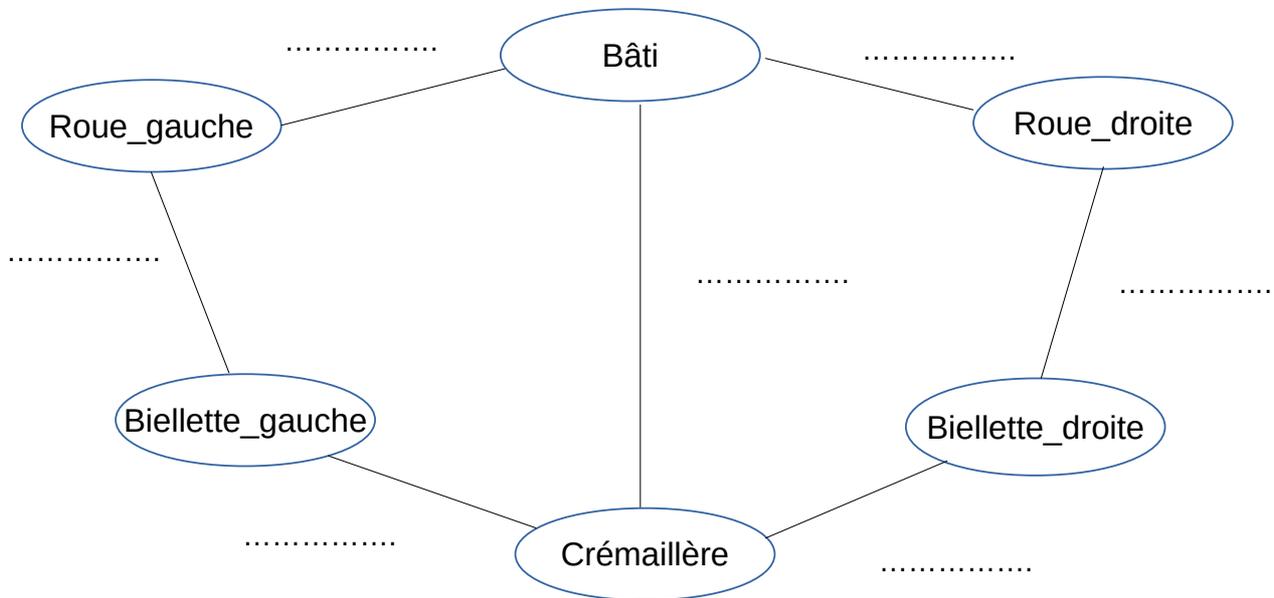
Q5.



À rendre avec la copie

Document réponse DR2.

Q8.



Q12 et Q13 .

	Valeurs minimales		Valeurs maximales	
	mesurée	simulée	mesurée	simulée
Couple réducteur C_r en N·m
Écart relatif en %	

À rendre avec la copie

Document réponse DR3.

Q19.

