

SESSION 2021

**CAPET
CONCOURS EXTERNE
ET CAFEP CORRESPONDANT**

Section : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR

Option : INGÉNIERIE MÉCANIQUE

**ÉTUDE D'UN SYSTÈME, D'UN PROCÉDÉ OU D'UNE
ORGANISATION**

Durée : 4 heures

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

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

Si vous repérez ce qui vous semble être une erreur d'énoncé, vous devez le signaler très lisiblement sur votre copie, en proposer la correction et poursuivre l'épreuve en conséquence. De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, vous devez la (ou les) mentionner explicitement.

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

Tournez la page S.V.P.

A

INFORMATION AUX CANDIDATS

Vous trouverez ci-après les codes nécessaires vous permettant de compléter les rubriques figurant en en-tête de votre copie

Ces codes doivent être reportés sur chacune des copies que vous remettrez.

► **Concours externe du CAPET de l'enseignement public :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EDE	1414E	102	7048

► **Concours externe du CAFEP/CAPET de l'enseignement privé :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EDF	1414E	102	7048

Ce sujet comporte deux parties :

- texte et questionnement pages 2 à 19 ;
- documents annexes, pages 20 à 25.

VÉLO À ASSISTANCE ELECTRIQUE

I. MISE EN SITUATION

1. Contexte

De nos jours, les habitants d'une grande agglomération, ou à proximité, recherchent une solution de remplacement ou de substitution à la voiture. Il s'agit de pouvoir se déplacer rapidement sur le lieu de travail, en respectant l'environnement, sans se mettre en danger et en maintenant une bonne condition physique.

Parmi les solutions existantes, le vélo à assistance électrique est celle de plus en plus prisée des citoyens.

Comme le fait remarquer André Ghestem, directeur général France de Shimano, « Parce que les Français aspirent à des choix de mobilité de plus en plus complémentaires, qualitatifs et adaptés à leurs usages, le marché du cycle ne cesse de se diversifier. Cette tendance représente une opportunité formidable pour les acteurs du secteur, qui doivent répondre à une demande croissante d'articles à forte valeur ajoutée, en particulier en ce qui concerne les accessoires et composants. Autant de belles perspectives pour le marché du cycle. L'année 2019 conforte une tendance positive pour le marché du cycle ». Cela se vérifie dans les chiffres : l'Observatoire du Cycle confirme une progression des ventes de vélos électriques sur l'année 2018 avec plus de 2,7 millions de vélos vendus en France. Le marché du cycle a poursuivi sa progression en 2019, avec 2,33 milliards d'euros de chiffre d'affaires, soit une augmentation de 10,1 % par rapport à 2018.

Le législateur français définit le vélo à assistance électrique, appelé par abus de langage vélo électrique, comme un véhicule dérivé de la bicyclette, équipé d'un moteur électrique auxiliaire et d'une source d'énergie, généralement une batterie rechargeable. Contrairement aux cyclomoteurs ordinaires ou aux trottinettes électriques, il est nécessaire de pédaler pour que le moteur d'un vélo à assistance électrique entre en fonction.

L'article R. 311-1 du code de la route donne une définition du VAE transposée de la directive européenne 92/61/EEC « 6.11 : cycle à pédalage assisté, équipé d'un moteur auxiliaire électrique d'une puissance nominale continue maximale de 0,25 kilowatt dont l'alimentation est réduite progressivement et finalement interrompue lorsque le véhicule atteint une vitesse de 25 km/h, ou plus tôt, si le cycliste arrête de pédaler »

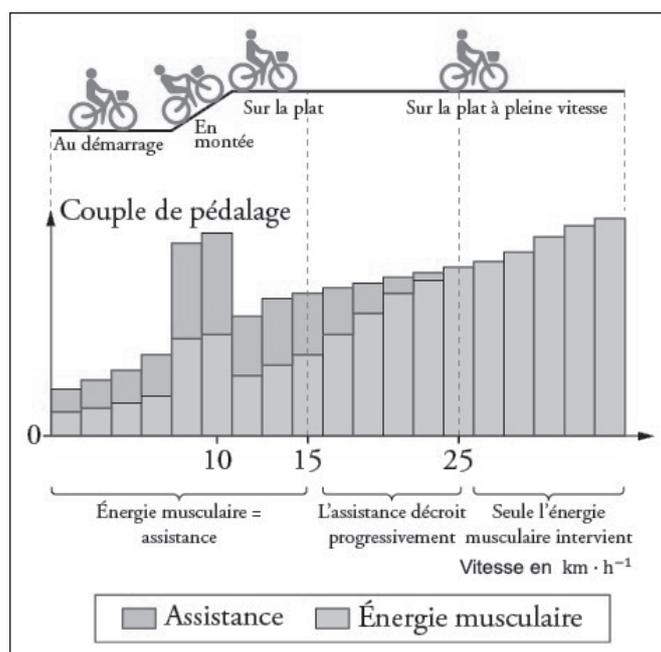


figure 1 : Évolution de l'assistance au pédalage

2. Présentation du système étudié

La société Moustache Bikes, créée en 2010 et implantée dans le département des Vosges (88), propose une certaine vision du vélo à assistance électrique. La volonté de cette société est de proposer des vélos alliant design, confort et ergonomie. Moustache Bikes propose une gamme structurée en 13 familles couvrant les usages suivants : urbain, tout chemin, route, VTT, enfant et tandem. Cette gamme compte près de 65 vélos.

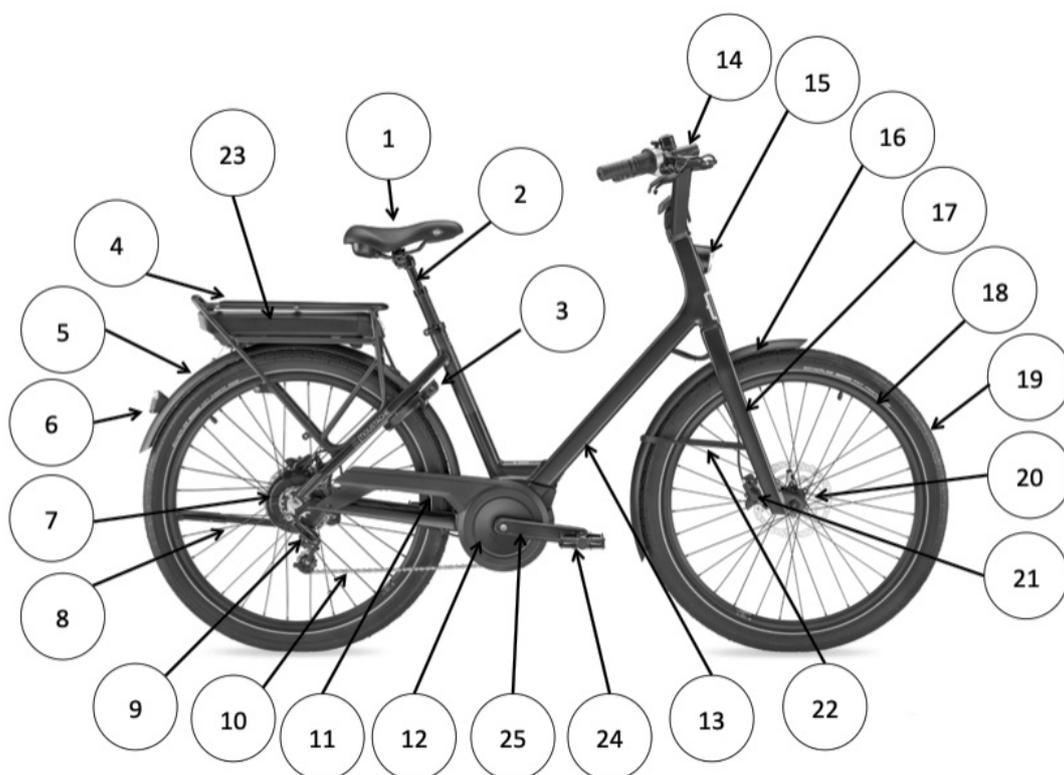
Le système étudié est le modèle urbain « ville pratique » Lundi 26.2, voir figure 2. Ce modèle est le premier né de la famille Moustache Bikes, pour qui ce vélo est l'« Accord parfait moteur/transmission offrant confort et fonctionnalités incroyables, particulièrement adaptées aux villes au relief limité ».

Ce vélo est destiné à une utilisation urbaine, sur routes goudronnées, pavées ou encore pistes cyclables. Ce vélo pourra occasionnellement être utilisé sur des routes gravillonnées ou non revêtues en bon état. Il n'a en revanche pas été conçu pour des sauts et un usage tout-terrain, accidenté et/ou en compétition.

Ce vélo est conforme aux normes :

- EN 14764 « Bicyclettes utilisées sur la voie publique » ;
- EN 15194 « Cycles à assistance électrique » ;
- ISO 4201 « Cycles - Exigences de sécurité des bicyclettes ».

Un diagramme des exigences partiel, un diagramme de cas d'utilisation et un schéma chaîne de puissance – chaîne d'information sont fournis en annexes 1a, 1b et 2.



N°	Composants	N°	Composants
1	Selle	13	Cadre
2	Tige de selle	14	Guidon (Potence+Cintre)
3	Cadenas	15	Éclairage avant
4	Porte-bagages	16	Garde-boue avant
5	Garde-boue arrière	17	Fourche
6	Éclairage arrière	18	Jante
7	Transmission Nuvinci®	19	Pneu
8	Béquille	20	Disque de frein
9	Dérailleur	21	Étrier de frein
10	Chaîne	22	Tringle de garde-boue avant
11	Carter chaîne	23	Batterie
12	Moteur pédalier Bosch® Active Line	24	Pédale
		25	Manivelle

figure 2 : composants du vélo Lundi 26.2

II. POURQUOI CHOISIR UN VÉLO À ASSISTANCE ÉLECTRIQUE ?

Objectif : vérifier la pertinence d'un vélo à assistance électrique pour l'utilisateur défini.

L'utilisateur vient de s'installer en ville et envisage trois moyens de locomotion différents : voiture, bus et vélo à assistance électrique.

	temps de trajet	pluie	coût initial	coût régulier	matériel à transporter	risque de bouchons
voiture	???	++	6000 €	- -	++	- -
bus	???	=	0 €	20 €/ mois	- -	-
VAE	???	- -	3000 €	20 €/ mois	-	++

tableau 1 : critères de comparaison des trois moyens de locomotion

La distance domicile-travail est de 8 km, avec un dénivelé moyen (entre 5 et 10% de pente). Quelle que soit la solution choisie, l'utilisateur ne souhaite pas perdre plus de 10 minutes par jour par rapport au trajet le plus rapide.

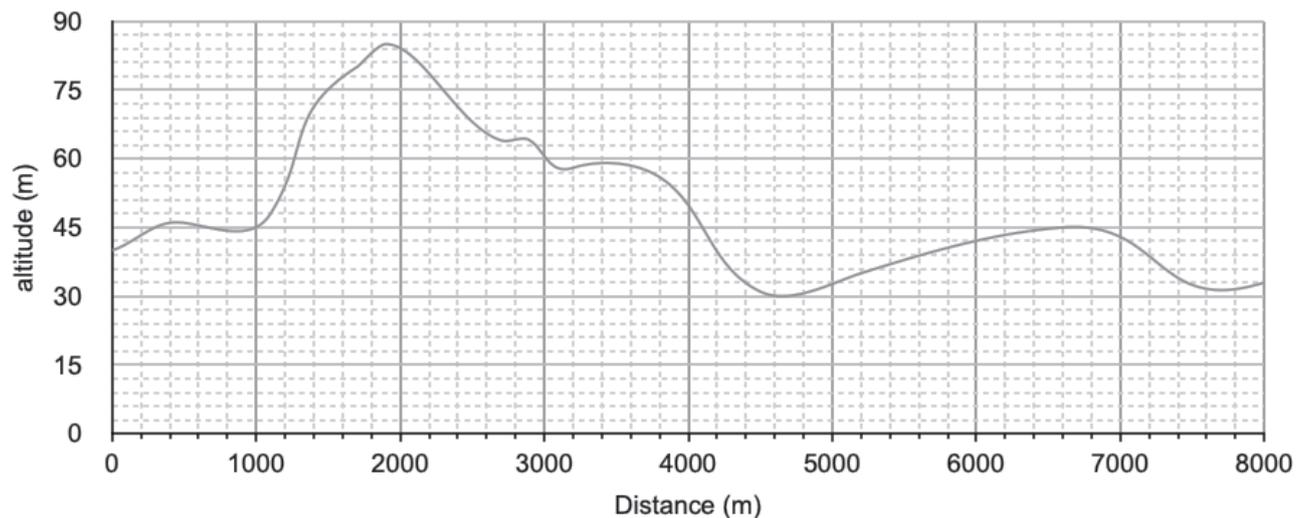


figure 3 : variation de l'altitude depuis le domicile jusqu'au lieu de travail de l'utilisateur

Une estimation des différents paramètres influant sur le temps sont listés ci-après :

- en voiture : $35 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ de moyenne (bouchons non compris) et en moyenne 10 min de bouchons par trajet ;
- en vélo : $22 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ de moyenne, mais 3 min pour se préparer et 3 min pour ranger le matériel en arrivant ;
- en bus : 20 min de trajet de bus, 12 min de trajet à pied : maison/bus puis bus/travail et 5 min d'attente du bus.

Question 1 : calculer les temps de trajet pour chacun des moyens de transport concernés.

Question 2 : à l'aide du tableau 1 et en utilisant la réponse à la question précédente, montrer que le vélo à assistance électrique est un choix pertinent pour l'utilisateur.

III. DE L'IMPORTANCE DES PNEUMATIQUES

Objectifs : déterminer la puissance nécessaire pour déplacer le cycliste afin de dimensionner le moteur d'assistance ; justifier le type de pneumatique pour garantir le confort du cycliste.

Hypothèses :

- la pente est de 5° ;
- la masse du cycliste est de 80 kg ;
- la masse du vélo est de 25 kg ;
- la pente $\alpha = 5^\circ$ correspond à une pente à 8,75 % ;
- la vitesse du cycliste en ligne droite est de $v = 15 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ et supposée constante.

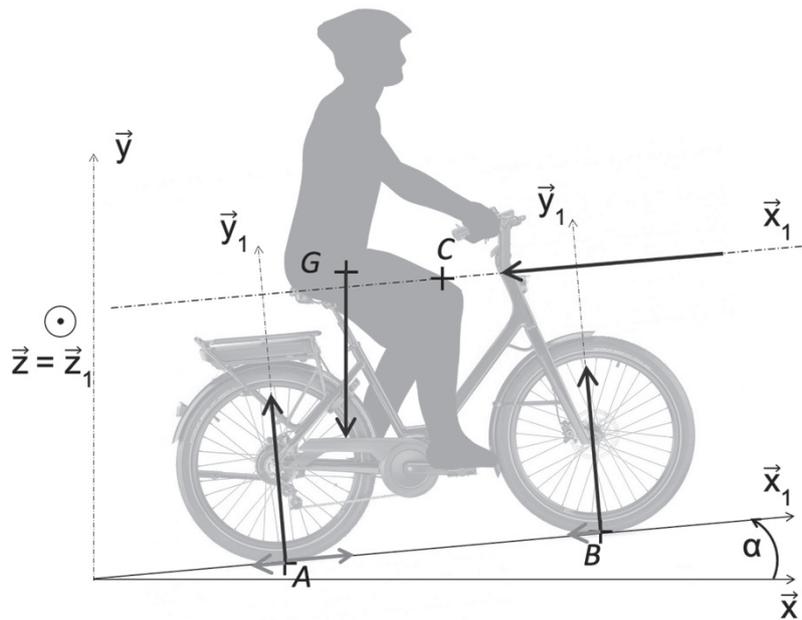


figure 4 : inventaire des actions mécaniques

Les coordonnées des points A, B, C et G ne sont pas utiles à la résolution du problème.

Sans prise en compte de la résistance au roulement, le système $\Sigma = \{\text{cycliste+VAE}\}$ est soumis à 4 actions mécaniques :

- l'action du vent sur Σ :
$$\{T_{\text{aero} \rightarrow \Sigma}\} = \begin{Bmatrix} -F_{\text{aero}} \cdot \vec{x}_1 \\ \vec{0} \end{Bmatrix}_C$$
,
avec $F_{\text{aero}} = 0,5 \cdot \rho \cdot SC_x \cdot v^2$, $\rho = 1,204 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ à 20°C et $SC_x = 0,71$;
- l'action de la pesanteur sur Σ :
$$\{T_{\text{pes} \rightarrow \Sigma}\} = \begin{Bmatrix} -m_\Sigma \cdot g \cdot \vec{y} \\ \vec{0} \end{Bmatrix}_G$$
 ;
- l'action du sol sur la roue arrière :
$$\{T_{\text{sol} \rightarrow \text{arr}}\} = \begin{Bmatrix} T_{\text{arr}} \cdot \vec{x}_1 + N_{\text{arr}} \cdot \vec{y}_1 \\ \vec{0} \end{Bmatrix}_A$$
 ;
- l'action du sol sur la roue avant :
$$\{T_{\text{sol} \rightarrow \text{av}}\} = \begin{Bmatrix} N_{\text{av}} \cdot \vec{y}_1 \\ \vec{0} \end{Bmatrix}_B$$
 ;

3.1 Prise en compte de la résistance au roulement

On notera pour la force de résistance au roulement $F_{roul} = f \cdot N$ avec N l'effort normal et f le coefficient de résistance au roulement. On prendra comme valeur $f = 0,006$.

Question 3 : en prenant en compte la résistance au roulement, **indiquer** quelles actions mécaniques extérieures à Σ sont modifiées et **écrire** la nouvelle forme du ou des torseur(s) associé(s).

On exprime le torseur cinématique du système Σ par rapport au référentiel galiléen R_g :

$$\left\{ V_{\Sigma/R_g} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} v \cdot \vec{X}_1 \\ \vec{0} \end{array} \right\}_G$$

Question 4 : en citant le théorème utilisé, **établir** l'expression littérale de l'effort T_{arr} nécessaire pour maintenir l'allure du cycliste. **Faire** l'application numérique.

Question 5 : **déterminer** alors la puissance nécessaire pour maintenir l'allure du cycliste à $v = 15 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

Le tableau 2 indique le rapport de la puissance divisée par la masse d'un cycliste, exprimé en $\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$ en fonction de son niveau d'entraînement et de la durée de l'effort.

	sur 5 s d'effort	sur 5 min d'effort	sur 1 h d'effort
Professionnel très haut niveau	22-24	7-7,6	5,7-6,4
Amateur très bon niveau	18,6-20,8	5,6-6,4	4,7-5,3
Amateur moyen	15-17	4,3-5	3,5-4,1
Cycliste occasionnel	12-14	3-3,7	2,4-3,1

tableau 2

Question 6 : à l'aide du tableau 2, en précisant les hypothèses retenues, **estimer** la puissance que peut fournir le cycliste lors de la phase de montée à 8,75% du trajet domicile/bureau/domicile (cf. figure 3).

Question 7 : en précisant les hypothèses retenues, **calculer** la puissance nécessaire que doit fournir le moteur pour déplacer le cycliste.

Question 8 : à l'aide des diagrammes SysML fournis annexes 1a et 1b, **conclure** sur la faisabilité du projet.

3.2 Choix de la taille du pneumatique

Le pneumatique joue un rôle dans le calcul des résistances au roulement et aérodynamique. Par ailleurs, il joue aussi un rôle important dans le confort du cycliste.

En considérant que la forme du pneu n'entre que pour 10 % dans la résistance aérodynamique, la figure 5 permet de comparer la puissance perdue en raison des résistances au roulement et aérodynamique en fonction de la vitesse du cycliste.

Question 9 : pour l'usage prévu, **indiquer** la résistance prépondérante dans le choix du pneumatique.

Des calculs de coefficient de résistance au roulement en fonction de la pression de gonflage des pneus de différentes largeurs (« large » et « standard ») ont permis de réaliser le graphe de la figure 6.

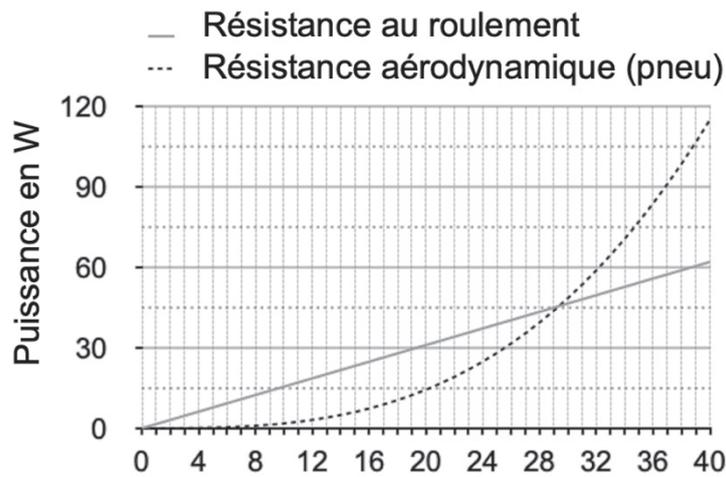


figure 5 : vitesse du vélo en $km \cdot h^{-1}$

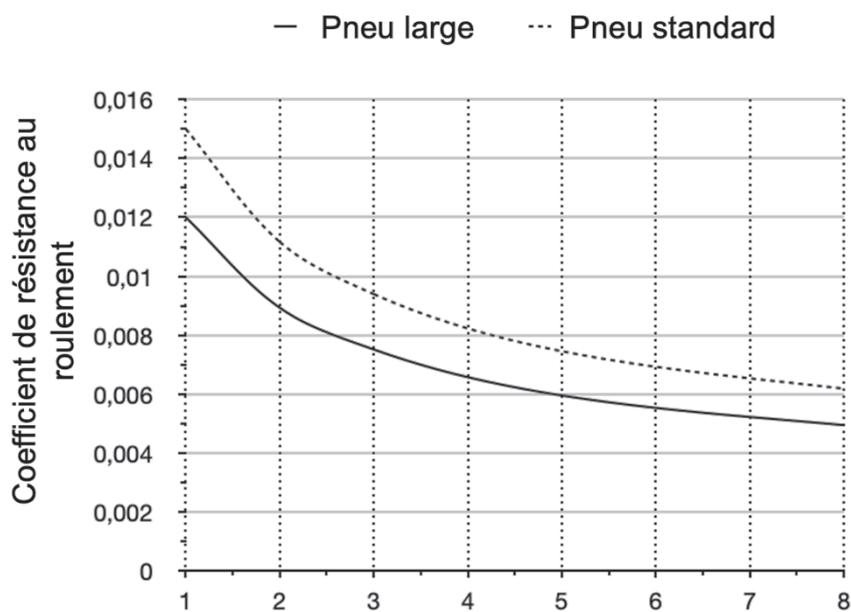


figure 6 : pression de gonflage en bar

Question 10 : justifier qu'un pneu plus large permettra de diminuer l'impact de la résistance au roulement et **montrer** qu'à coefficient de résistance au roulement constant, un pneu large sera gonflé à une pression plus faible.

Afin d'améliorer le confort de conduite, les vibrations ressenties par l'utilisateur doivent être minimales. Les pneumatiques agissent comme un filtre et permettent à l'utilisateur de ne pas être tributaire du type de revêtement de la surface sur laquelle il roule (asphalte, béton de ciment, pavés, revêtement en plastique, chemins, ...).

Sur le site du fabricant Michelin®, on peut lire : « Le confort du pneu désigne sa **capacité à absorber les inégalités du sol pour atténuer les vibrations** au niveau du guidon et de la selle. Un pneu plus confortable procure donc de meilleures sensations sur la route et les chemins mais c'est aussi, à moyen et long termes, une manière de prévenir en partie des problèmes comme le mal de dos, par exemple ».

Question 11 : justifier qu'un pneu plus large permet un meilleur confort.

IV. UNE VARIATION DE VITESSE TOUT EN FLUIDITÉ

La cadence moyenne de pédalage d'un cycliste est estimée à $70 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$. On souhaite conserver cette cadence sur une vitesse de déplacement variant de 12 à $35 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Le pneumatique utilisé sur le Lundi 26.2 a pour rayon $0,33 \text{ m}$ et pour largeur $0,06 \text{ m}$.

Objectif : vérifier que le variateur de vitesse choisi répond à l'exigence Id 6.1.

Paramétrage :

- N_p : cadence (ou fréquence) de pédalage du cycliste, en $\text{tr}\cdot\text{min}^{-1}$;
- R_r : rayon de la roue du vélo électrique en m ;
- $v_{\text{vélo}}$: vitesse du vélo par rapport au référentiel galiléen R_g en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;
- ω_r : vitesse de rotation de la roue par rapport au cadre du vélo, en $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$;
- ω_p : vitesse de rotation du pédalier par rapport au cadre du vélo, en $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$;
- r : rapport de transmission, $r = \frac{\omega_r}{\omega_p}$, sans unité.

Question 12 : déterminer l'expression littérale entre $v_{\text{vélo}}$, r , R_r et N_p .

Question 13 : déterminer le rapport de transmission minimum r_{min} et maximum r_{max} pour permettre au cycliste d'aller de 12 à $35 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ tout en gardant sa cadence de pédalage.

Les systèmes de transmission de vitesse « classiques » présentent des inconvénients pour l'utilisateur :

- lors d'un effort et à l'arrêt, il ne faut pas changer le rapport de vitesse ;
- la variation du rapport de vitesse est discontinue et saccadée ;
- souvent il faut jouer sur 2 manettes pour changer de rapport de vitesse.

L'entreprise Moustache Bikes a choisi pour son vélo Lundi 26.2 une transmission de vitesse permettant de pallier ces inconvénients : la transmission Nuvinci® N330 présente une amplitude de développement de 330%, ce qui correspond à un rapport allant de $0,5$ à $1,65$.

L'inconvénient principal de ce système est sa masse de $2,5 \text{ kg}$, ce qui représente 10% de la masse du vélo. Moustache Bikes vise une clientèle particulière pour qui le confort est primordial : « Changer de vitesse, même en charge, n'a jamais été aussi facile ».



figure 7 : transmission arrière Nuvinci® 330

Le principe du moyeu NuVinci® est le suivant : un disque transfère son mouvement à un autre disque par friction, par l'intermédiaire de sphères ayant leurs axes de rotation commandés par une poignée tournante.

Le mécanisme NuVinci® modifie l'orientation de ces axes faisant en sorte que la vitesse relative des deux disques se modifie.

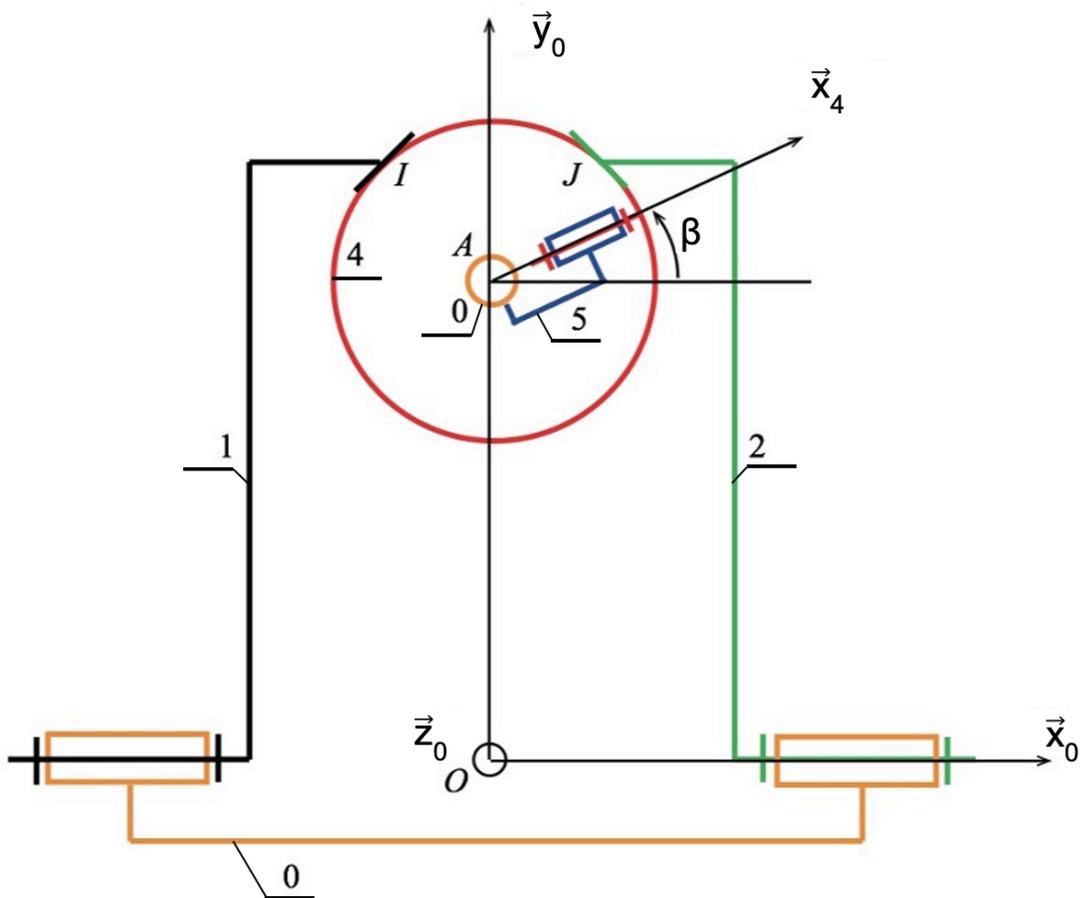


figure 8 : schéma cinématique, modélisation d'une bille du système Nuvinci®

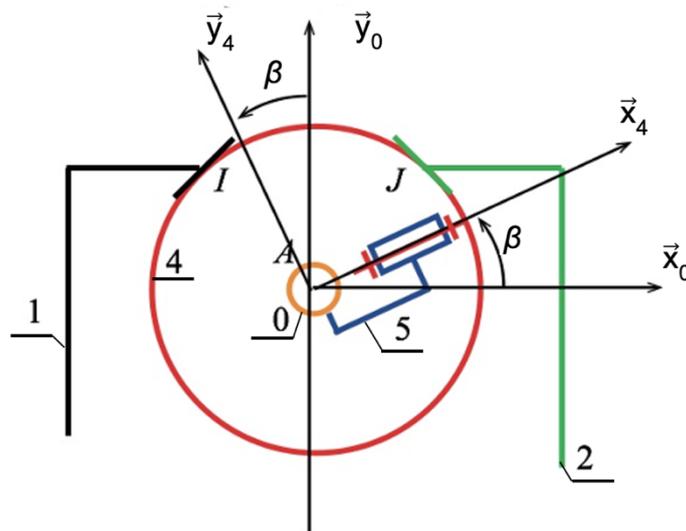


figure 9 : paramétrage de la bille

Nuvinci® repose sur une transmission basée sur un ensemble de billes mobiles en rotation autour d'axes (5) et en inclinaison β . Ces billes (4) sont positionnées entre deux disques (1) et (2) qui constituent l'entrée (1) et la sortie (2) de la transmission. La variation du rapport de réduction est obtenue par la modification de la position des points de contact entre les billes (4) et les disques (1) et (2).

Pour étudier la variation de vitesse, on peut modéliser le mécanisme par le schéma cinématique de la figure 8 ne représentant qu'une seule bille (4) du dispositif. Le système d'orientation de la bille (4) est occulté.

Paramétrage géométrique :

On note respectivement I et J les points de contact entre (1) et (4) et entre (2) et (4). On suppose un roulement sans glissement en ces points entre les solides en contact.

On note $R_0(O, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ le repère lié au cadre 0 du VAE supposé en translation rectiligne uniforme par rapport au référentiel galiléen lié au sol.

Un repère $R_1(O, \vec{x}_0, \vec{y}_1, \vec{z}_1)$ est lié à la poulie motrice (1). Il est tel que $\theta_1 = (\vec{y}_0, \vec{y}_1) = (\vec{z}_0, \vec{z}_1)$.

Un repère $R_2(O, \vec{x}_0, \vec{y}_2, \vec{z}_2)$ est lié à la poulie réceptrice (2). Il est tel que $\theta_2 = (\vec{y}_0, \vec{y}_2) = (\vec{z}_0, \vec{z}_2)$.

On définit le repère intermédiaire $R_5(A, \vec{x}_5, \vec{y}_5, \vec{z}_0)$ tel que $\beta = (\vec{x}_0, \vec{x}_5) = (\vec{y}_0, \vec{y}_5)$. Cet angle β variable permet la variation continue entre la vitesse d'entrée et la vitesse de sortie du mécanisme.

Un repère $R_4(A, \vec{x}_4, \vec{y}_4, \vec{z}_4)$ est lié à la bille (4). Il est tel que $\theta_4 = (\vec{y}_5, \vec{y}_4) = (\vec{z}_0, \vec{z}_4)$ et $\vec{x}_5 = \vec{x}_4$.

On note r_4 le rayon de la bille.

On pose $\overrightarrow{OI} \cdot \vec{y}_0 = \overrightarrow{OJ} \cdot \vec{y}_0 = R$.

On précise également que $(\vec{y}_0, \overrightarrow{AI}) = -(\vec{y}_0, \overrightarrow{AJ}) = \alpha$ avec $\alpha > 0$.

Question 14 : représenter les figures de paramétrage (ou de changement de bases).

Question 15 : montrer que $\vec{V}(I, 1/0) = R\dot{\theta}_1\vec{z}_0$.

Question 16 : exprimer \overrightarrow{AI} dans la base $(\vec{x}_5, \vec{y}_5, \vec{z}_0)$.

Question 17 : montrer que $\vec{V}(A, 4/5) = \vec{0}$.

On considère la pièce (5) fixe par rapport au bâti (0).

Question 18 : en déduire $\vec{V}(I, 4/0)$ en fonction de α , β , r_4 et $\dot{\theta}_4$.

Question 19 : exprimer la condition de roulement sans glissement entre les pièces (1) et (4) au point I, en déduire une relation entre $\dot{\theta}_1$ et $\dot{\theta}_4$.

Question 20 : exprimer la condition de roulement sans glissement entre les pièces (2) et (4) au point J, en déduire une relation entre $\dot{\theta}_2$ et $\dot{\theta}_4$.

Question 21 : déterminer une relation entre $\dot{\theta}_1$ et $\dot{\theta}_2$.

Quels que soient les résultats trouvés précédemment, on donne $r' = \frac{\dot{\theta}_2}{\dot{\theta}_1} = \frac{\cos(\alpha+\beta)}{\cos(\alpha-\beta)}$.

Le système est réglé tel que $\alpha = 35^\circ$ et $-26^\circ < \beta < 23^\circ$.

Question 22 : déterminer les rapports de transmission minimum r'_{min} et maximum r'_{max} permis par le système Nuvinci® N330.

Question 23 : à partir des résultats des questions 13 et 22, et du rapport de transmission du système pignon-chaîne $r_{pc} = 0,4$, justifier le choix de ce variateur vis-à-vis du cahier des charges.

V. EMPLACEMENT ET CHOIX DU MOTEUR

Objectif : justifier le positionnement du moteur électrique.

5.1 Emplacement moteur :

Sur les vélos à assistance électrique, trois dispositions constructives concernant l'implantation du moteur sont possibles :

- au niveau de la roue avant ;
- au niveau de la roue arrière ;
- au niveau du pédalier (position centrale).

Les moteurs sur la roue délivrent une puissance selon la fréquence de rotation du pédalier.

Les moteurs centraux sont couplés à des capteurs d'effort.

Le moteur et la batterie ont chacun une masse d'environ 3kg, ce qui impacte la position du centre de masse du VAE.

Question 24 : en s'inspirant du formalisme de l'annexe 2, **proposer** une représentation des deux autres dispositions constructives (roue avant et roue arrière).

Question 25 : **justifier** le choix fait par Moustache Bikes pour le *Lundi 26.2* selon les trois critères confort de conduite (fluidité ou à-coup), stabilité/maniabilité et autonomie de la batterie.

5.2 Choix du moteur

Le vélo Lundi 26.2 est équipé d'un bloc moteur Bosch® *Active Line*.

Objectif : valider l'exigence 4.2

Pour vérifier le choix du moteur, les conditions de l'étude sont les suivantes :

- effectuer un démarrage en côte ($\alpha = 5^\circ$), pour atteindre une vitesse de $15 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ en 7 s ;
- le rapport de transmission $r = \frac{\omega_r}{\omega_p}$ varie de 1,25 à 4,125 ;
- la cadence (ou fréquence) de pédalage du cycliste $N_p = 70 \text{ tr}\cdot\text{min}^{-1}$.

Question 26 : **indiquer** le meilleur rapport de transmission au démarrage de la côte. **Indiquer** le meilleur rapport de transmission lorsque la vitesse de $15 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ a été atteinte.

Pour des raisons de simplification de calculs, pour la suite de l'étude nous prendrons $r = \frac{\omega_r}{\omega_p} = 1,25$.

En négligeant les termes dus à la force aérodynamique et à la résistance au roulement, le principe fondamental de la dynamique appliqué au système $\Sigma = \{\text{cycliste} + \text{VAE}\}$ donne l'équation suivante :

$$m \ddot{x} + mg \sin \alpha - (C_c + C_m) \cdot \frac{\eta}{r \cdot R_r} = 0$$

- m : masse du système $\Sigma = \{\text{cycliste} + \text{VAE}\}$, en kg ; $m = 105 \text{ kg}$;
- g : accélération de la pesanteur, $g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$;
- R_r : rayon de la roue du vélo électrique en m ;
- C_c : couple fourni par le cycliste en $\text{N}\cdot\text{m}$, $C_c = 20 \text{ N}\cdot\text{m}$;

- C_m : couple fourni par le moteur en $N \cdot m$;
- η : rendement du transmetteur, sans unité, $\eta = 0,9$.

Question 27 : déterminer le couple moteur permettant de vérifier les conditions de la présente étude.

Le groupe Bosch propose plusieurs moteurs dans sa gamme pour les VAE, présentés dans le tableau 3 :

	Active Line	Active Line plus	Performance Line	Performance Line Cx
$(C_m/C_c)_{\max}$	250 %	270 %	300 %	340 %
$(C_m)_{\max}$	50 $N \cdot m$	50 $N \cdot m$	65 $N \cdot m$	75 $N \cdot m$

tableau 3 : gamme de moteurs Bosch

Question 28 : justifier le choix du moteur pour le vélo Lundi 26.2.

VI. DE L'IMPORTANCE DU CADRE POUR LE CONFORT ET LA SECURITÉ DE L'UTILISATEUR

Extrait d'une plaquette publicitaire de la société Moustache Bikes :

« Chez Moustache Bikes, nous avons toujours souhaité faciliter l'accès à la pratique du VAE, l'outil parfait pour laisser la voiture au garage et goûter au plaisir de rouler en toute liberté ! Nous sommes convaincus qu'il est important de donner la possibilité aux usagers de rouler sur certains modèles encore plus ouverts, et donc encore plus accessibles, permettant un enjambement ultra bas facilitant la vie : quand on doit monter et descendre de sa selle à chaque feu rouge en ville, quand on porte une robe ou bien un costume ajusté, quand on transporte un enfant à l'arrière de son vélo, quand on n'a pas (ou plus) la souplesse d'une gymnaste, ou tout simplement quand on se sent plus à l'aise sans l'entrave d'un tube supérieur. Notre vélo Lundi 26.2 bénéficie d'un enjambement record. Donc facile de monter et descendre du vélo ! Nos tubes triple cavités assurent une excellente rigidité ».

Objectif : vérifier l'exigence Id 5.2.

Le cadre du vélo Lundi 26 est un assemblage mécanosoudé (procédé TIG) composé de différents tubes fabriqués par hydroformage. Le matériau utilisé est un alliage d'aluminium corroyé 6061 T6 (EN AW [Al Mg 1 Si Cu]; T6: état durci par traitement thermique). Il présente une bonne aptitude au soudage et une bonne résistance à la corrosion. Ses caractéristiques sont rassemblées dans un tableau fourni en annexe 3.

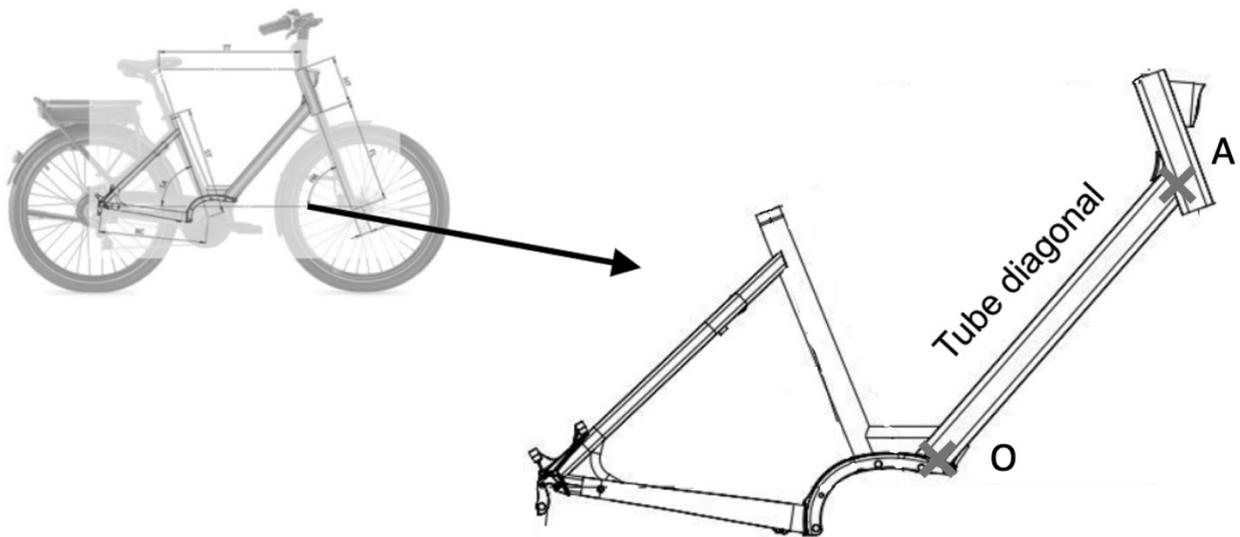


figure 10 : cadre vélo Lundi 26.2

6.1 Étude simplifiée du tube diagonal

Pour valider le critère de rigidité du cadre du vélo Lundi 26.2, on s'intéresse à la partie la plus sollicitée qui est le tube diagonal. *En première approche, on fait une étude statique.*

En tenant compte de l'action du cycliste sur les pédales, de l'action que celui-ci exerce sur le guidon et de l'action de la route qui se répercute sur la potence du vélo, le tube diagonal peut être modélisé comme une poutre de longueur L encastree en O (position sur le cadre, cf. figure 10) et soumise à une action mécanique extérieure en A modélisée par le torseur suivant :

$$\left\{ \mathbf{T}_{\text{ext} \rightarrow \text{poutre}} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \vec{\mathbf{F}}_{\text{ext} \rightarrow \text{poutre}} = F_{Ax} \cdot \vec{\mathbf{x}} + F_{Ay} \cdot \vec{\mathbf{y}} \\ \vec{\mathbf{M}}_{A, \text{ext} \rightarrow \text{poutre}} = M_A \cdot \vec{\mathbf{z}} \end{array} \right\}_A$$

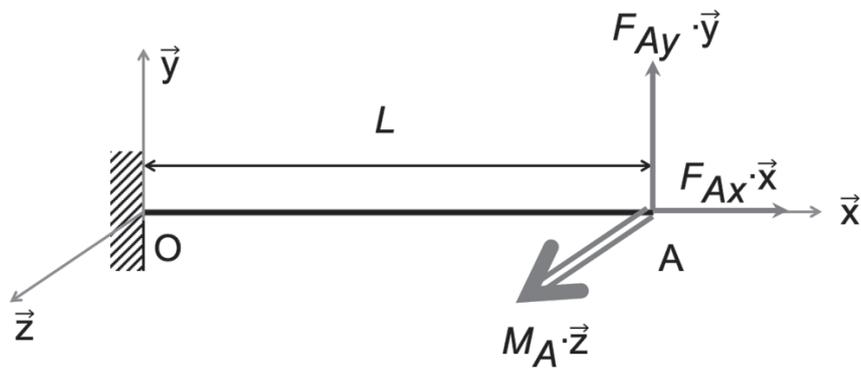


figure 11 : modèle poutre

Question 29 : déterminer le torseur des actions mécaniques de cohésion le long de la poutre, en fonction des paramètres fournis, au point G tel que $\vec{OG} = x \cdot \vec{x}$.

Question 30 : identifier la nature des sollicitations dans la poutre.

6.2 Modélisation du comportement sous charge du tube diagonal

Dans la suite de notre étude, la sollicitation de traction sera négligée.

Un schéma de la géométrie simplifiée du tube diagonal « triple cavité » est fourni figure 12. On donne la formule générale du moment quadratique d'un tube creux de section rectangulaire $l_{ext} \times h_{ext}$ et d'épaisseur e_i : $I_{Gz i} = \frac{l_{ext} \cdot h_{ext}^3 - (l_{ext} - 2 \cdot e_i) \cdot (h_{ext} - 2 \cdot e_i)^3}{12}$.

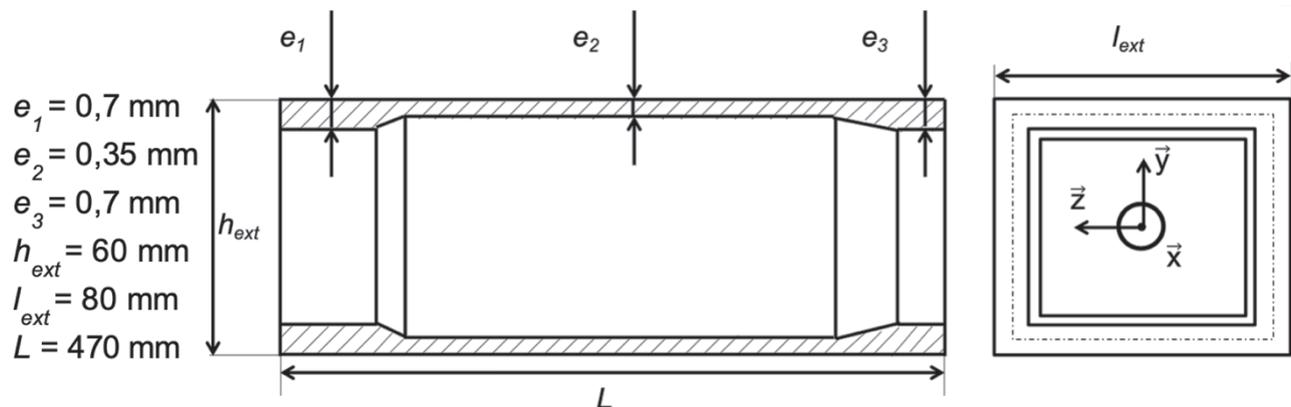


figure 12: géométrie simplifiée du tube diagonal

La rigidité d'un matériau peut être optimisée en maximisant l'indicateur de performance E/ρ .

Question 31 : à partir du diagramme d'Ashby fourni annexe 5, justifier l'utilisation de l'alliage d'aluminium 6061 T6 par rapport à un acier pour valider le critère de rigidité.

Question 32 : à l'aide de l'annexe 3, montrer que cette géométrie du tube permet un assemblage mécanosoudé du cadre.

Question 33 : exprimer la contrainte normale de flexion $\sigma_f(x,y)$ sous forme littérale et déterminer la contrainte maximale $\sigma_{f_{max}}$ pour le tube diagonal sous forme littérale.

La répartition des contraintes dans une section droite du tube diagonal et une étude de la déformée sont fournies annexe 4.

Question 34 : relever les valeurs maximales de la contrainte et de la déformée (annexe 4), et conclure quant au comportement statique du tube diagonal (annexe 3).

Les essais sur le cadre VAE qui sont donnés figure 13, sont des essais dynamiques.

Question 35 : discuter de la pertinence de la vérification du critère de rigidité par une sollicitation statique.

§ 4.8 - Cadres <i>Frames</i>					Conforme	<i>Conform</i>
4.8.1 – Cadre suspendu – Exigences particulières <i>Suspension-frames – Special requirements</i>					Non applicable	<i>Not applicable</i>
4.8.2 – Ensemble cadre–fourche avant - Essai de choc (chute d'une masse) <i>Frame and front fork assembly - Impact test (falling mass)</i>					Conforme	<i>Conform</i>
Masse en kg de l'impacteur <i>Mass in kg of the impactor</i>	22.5		Hauteur de chute de la masse en mm <i>Drop height of the mass in mm</i>		180	
Déformation permanente max admise en mm <i>Max permissible permanent deformation</i>	Fourche bicyclette <i>Bicycle fork</i>	30	Déformation mesurée en mm <i>Measured deformation</i>		5 ± 1	
4.8.3 – Ensemble cadre-fourche Avant - Essai de choc sur un cadre (chute d'un cadre) <i>Frame and front fork assembly - Impact test (falling frame)</i>					Conforme	<i>Conform</i>
Déformation permanente max admise en mm <i>Max permissible permanent deformation</i>	60		Déformation mesurée en mm <i>Measured deformation</i>		4 ± 1	
4.8.5 – Cadre – Essai de fatigue avec des forces horizontales <i>Frame - Fatigue test with horizontal forces</i>	C1	100000 cycles	F2	450N	Conforme	<i>Conform</i>
			F3	450N		
Fréquence utilisée lors de l'essai en Hertz <i>Frequency used during the test in Hertz</i>					2	
Détection des fissures <i>Detectors of fissures</i>					Absence	<i>Absence of</i>
4.8.6 – Cadre – Essai de fatigue avec une force verticale 50 000 cycles <i>Frame - Fatigue test with a vertical force 50 000 cycles</i>			F4	1000N	Conforme	<i>Conform</i>
Fréquence utilisée lors de l'essai en Hertz <i>Frequency used during the test in Hertz</i>					2	
Détection des fissures <i>Detectors of fissures</i>					Absence	<i>Absence of</i>

figure 13 : essais normalisés sur le cadre du VAE

Question 36 : en analysant les résultats des essais sur le cadre du VAE figure 13, conclure sur la conformité du cadre vis à vis de la norme.

VII. FREINER RAPIDEMENT PAR TOUS TEMPS EN TOUTE SECURITÉ

Dans cette étude, les phénomènes de culbute ou de dérapage qui peuvent avoir lieu lors du freinage ne seront pas étudiés.

Le cycliste roulant à une vitesse moyenne de $36 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ doit pouvoir s'arrêter :

- par temps sec : en 30 m ;
- par temps humide : en 50 m.

Objectif : vérifier que le cycliste peut effectuer un freinage conforme au cahier des charges.

Un avantage incontestable des freins à disques est leur grande efficacité par temps humide.

7.1 Calcul du couple de freinage pour ce frein à disque

L'étude porte sur le frein avant.

On modélise le système de freinage selon la figure 14 :

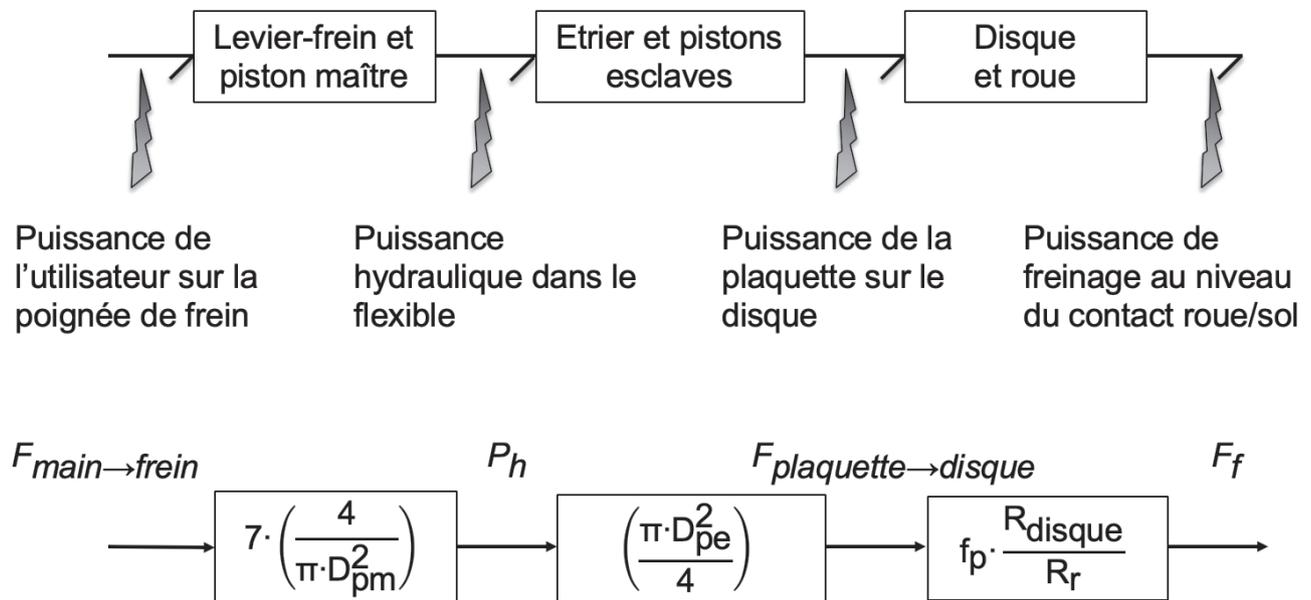


figure 14

Paramétrage :

- D_{pm} : diamètre piston maître (piston levier), $D_{pm} = 7 \text{ mm}$;
- D_{pe} : diamètre piston esclave (piston étrier), $D_{pe} = 18 \text{ mm}$;
- $F_{main \rightarrow frein}$: norme de l'effort de l'utilisateur sur la poignée de frein, $F_{main \rightarrow frein} = 20 \text{ N}$;
- P_h : pression hydraulique dans le flexible (les pertes de freinage dans le circuit hydraulique sont négligées dans ce contexte) ;
- $F_{plaque\grave{t}te \rightarrow disque}$: norme de l'effort de la plaquette sur le disque, en N ;
- F_f : norme de l'effort de freinage au niveau du contact roue/sol, en N ;
- R_{disque} : rayon du disque de frein, $R_{disque} = 8 \text{ cm}$;
- f_p : facteur de frottement plaquette/disque, $f_p = 0,5$;
- R_r : rayon de la roue du vélo électrique, $R_r = 33 \text{ cm}$

Question 37 : exprimer littéralement l'effort de freinage F_f au niveau du contact roue/sol en fonction de $F_{main \rightarrow frein}$. Indiquer la valeur numérique de F_f .

La distance de freinage peut être exprimée par la formule suivante :

$$d_{\text{freinage}} = \frac{m}{2C_x} \ln \left(1 + \frac{C_x v_0^2}{(mg(f_r - p) + F_f)} \right)$$

Avec :

- f_r : coefficient de frottement pneu/sol, sans unités, $f_r = 0,01$;
- p : coefficient de pente, en %, $p = 0$;
- v_0 : vitesse initiale, en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;
- C_x : coefficient de pénétration dans l'air, $C_x = 0,7$.

Lors d'un freinage d'urgence, l'effort de l'utilisateur sur la poignée et donc l'effort de freinage peuvent être plus importants. Cependant, l'effort de freinage F_f réparti sur les deux roues doit être inférieur à :

- 400 N pour ne pas risquer la culbute avec le vélo par temps sec ;
- 100 N pour ne pas dérapier par temps humide.

Question 38 : sachant que le cycliste met 1 s pour réagir et actionner le frein, **déterminer** les distances d'arrêt du cycliste par temps sec et par temps humide.

Question 39 : **conclure** sur le respect du cahier des charges.

7.2 Sensation lors du freinage

Objectif : vérifier que le cycliste est capable de doser son freinage intuitivement.

La transmission de l'effort de freinage peut se faire :

- par câble : les pertes constatées sont dues aux frottements et à l'étirement du câble ;
- par un système hydraulique : les pertes sont négligeables.

Un essai a été réalisé pour la transmission par câble.

Le tableau 4 ci-dessous présente les résultats de mesures effectuées en fonction de l'effort fourni par l'utilisateur.

Effort utilisateur en N	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
Pertes en %	100	80	65	60	55	52	49	46	43	40	39	38	37	36	35

tableau 4 : pertes en % en fonction de l'effort fourni par l'utilisateur.

Question 40 : à partir des résultats de l'expérimentation tableau 4, **indiquer** pourquoi le freinage par un système hydraulique est considéré comme plus réactif et plus progressif.

Question 41 : **conclure** sur le choix d'une transmission de l'effort de freinage par système hydraulique.

VIII. CONCLUSION

Question 42 : en 100 mots maximum, **conclure** sur la pertinence du choix du vélo à assistance électrique Lundi 26.2 pour un utilisateur citadin.

FIN DU SUJET

Annexe 1a – Diagramme SysML

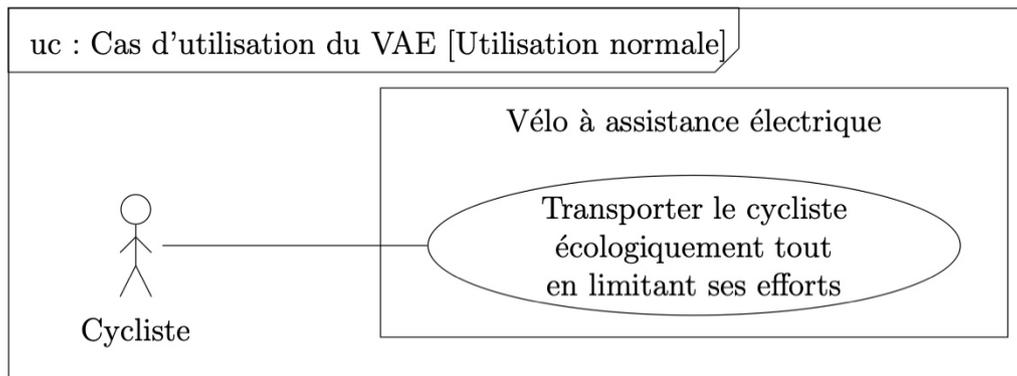


Diagramme de cas d'utilisation du VAE

Annexe 1b – Diagramme SysML

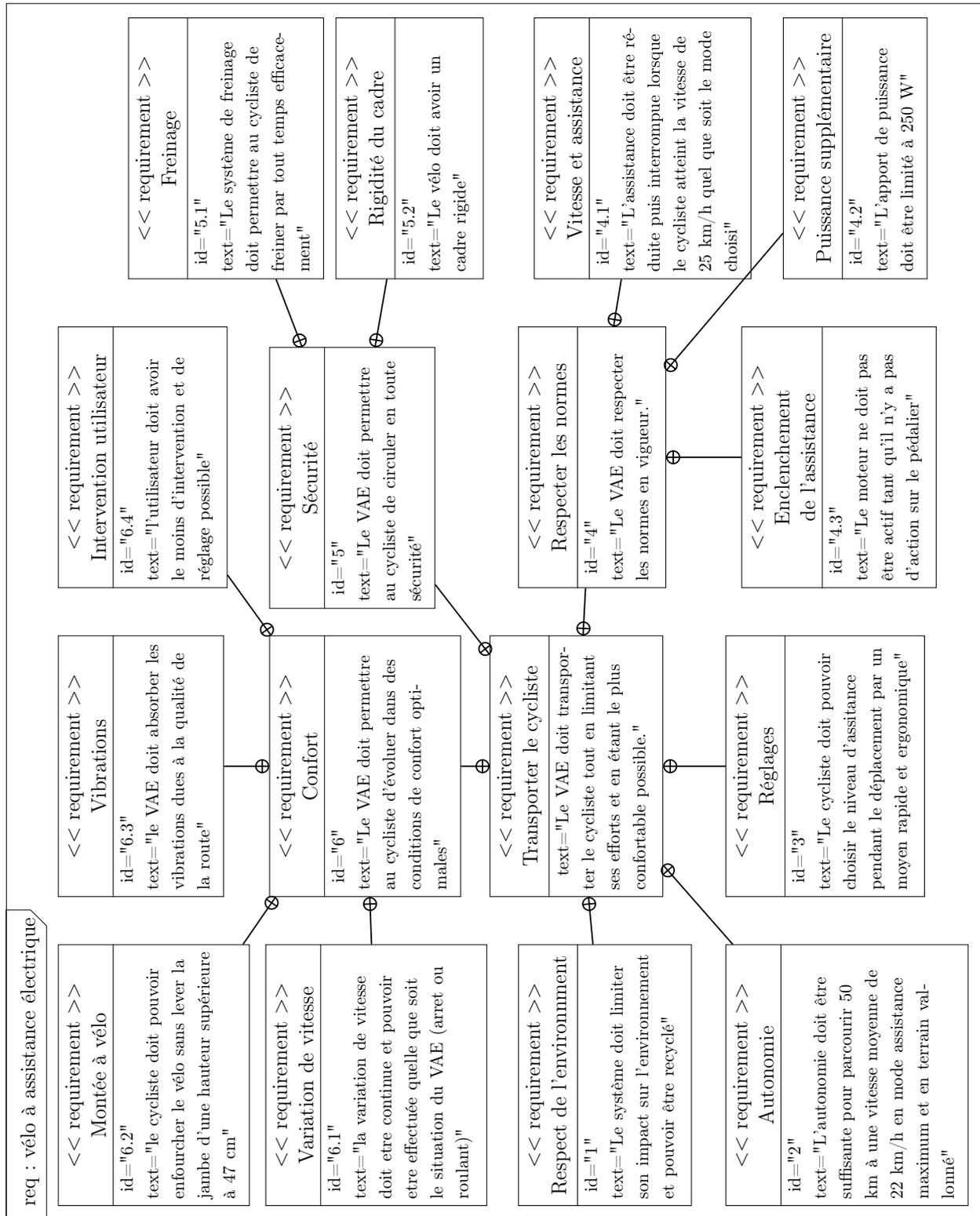
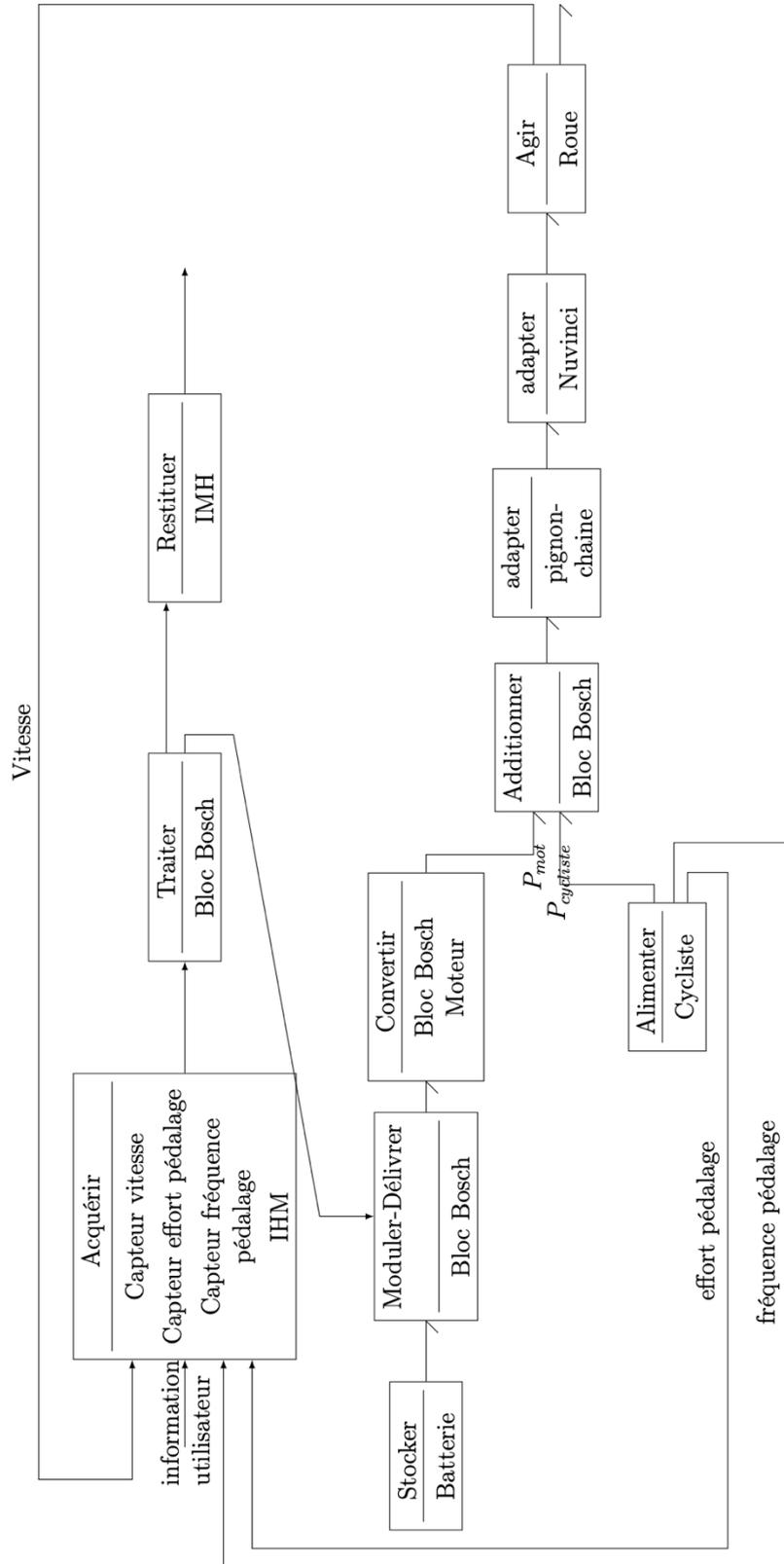


Diagramme des exigences du VAE

Annexe 2 – Schéma chaîne de puissance – chaîne d'information



Annexe 3 – Caractéristiques de l’alliage d’aluminium 6061

Tableau 5 regroupant :

- les caractéristiques mécaniques de traction mesurées sur éprouvettes ;
- la dureté Brinell mesurée sous 500 kg avec une bille de 10 mm de diamètre ;
- la résistance au cisaillement ;
- la limite de fatigue à 10^8 cycles de flexion alternée rotative ;
- le module d’élasticité, moyenne des modules en traction et en compression (le module en compression étant environ 2 % plus élevé que le module de traction).

État	Traction			Dureté Brinell	Cisaillement (MPa)	Fatigue (MPa)	Module d’élasticité (GPa)
	Rp0,2 (MPa)	Rm (MPa)	A (%)				
6061 0	55	125	25	30	83	60	69
6061 T6	270	305	13	95	205	98	69

tableau 5

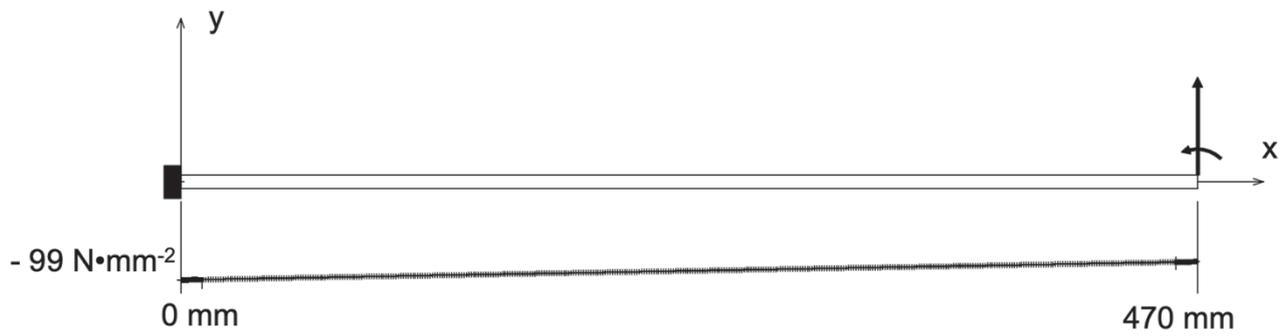
Corrosion sous contrainte : l’expérience montre qu’une structure peut se rompre brutalement sous l’effet conjugué d’une contrainte (flexion, traction et contrainte interne résiduelle due à la trempe, par exemple...) et d’un milieu corrosif (ambiance humide plus ou moins chargée de chlorures). La propagation des fissures est toujours inter cristalline. Les alliages 6000 sont sensibles à la corrosion inter cristalline sans pour autant être sensibles à la corrosion sous contrainte.

Les épaisseurs soudables sont environ comprises entre 0,5 et 0,8 mm pour le procédé TIG. Les alliages de la série 6000 ont une bonne soudabilité mais une perte de caractéristiques mécaniques dans la zone soudée.

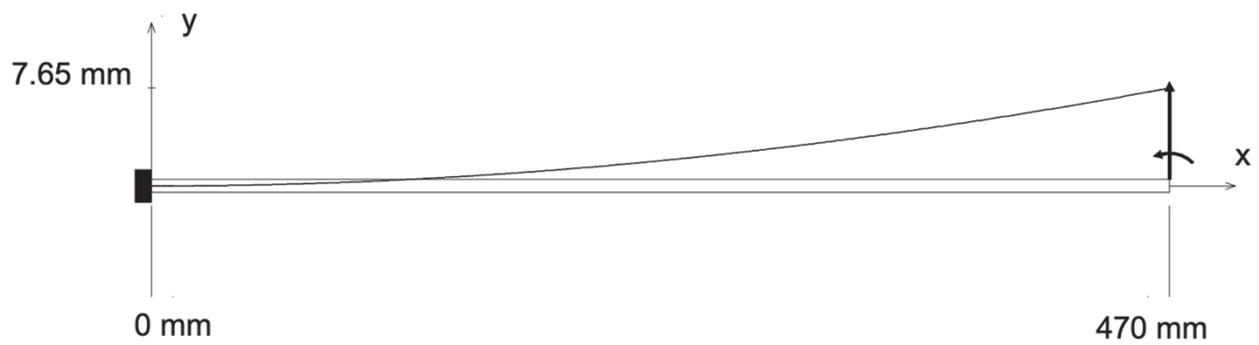
Annexe 4 – modélisation des contraintes et de la déformée du tube diagonal

($F_{ay} = 77 \text{ N}$ – $M_A = 159 \text{ Nm}$ – $L = 470 \text{ mm}$)

Contrainte normale en $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$



Flèche en mm



Annexe 5 – Diagramme d'Ashby $E = f(\rho)$

