

ROBOVOLC : un robot mobile pour l'exploration volcanique

1 Contexte et présentation du système

1.1 Contexte

Les éruptions volcaniques peuvent avoir un impact important sur l'activité humaine, provoquant à la fois des déplacements de population, des dégâts matériels, ainsi que des changements de topographie et de climat. On considère qu'actuellement 10% de la population terrestre vit sous la menace des volcans, et 1500 volcans potentiellement en activité sont répertoriés sur la planète. Par conséquent, une compréhension fine des phénomènes volcaniques et une meilleure maîtrise des risques associés constituent un enjeu scientifique majeur.

Les observations scientifiques réalisées pendant les phases éruptives sont aujourd'hui fondamentales pour l'étude des volcans. En effet, les prélèvements des gaz magmatiques et des échantillons rocheux rejetés lors de ces phases constituent des indicateurs fiables de l'activité interne des volcans; ils sont donc une riche source d'informations pour les volcanologues. Cependant, les phases éruptives sont aussi des phases actives très dangereuses et il est primordial de limiter les risques humains lors d'observations et de prélèvements à proximité des cratères en éruption (??).

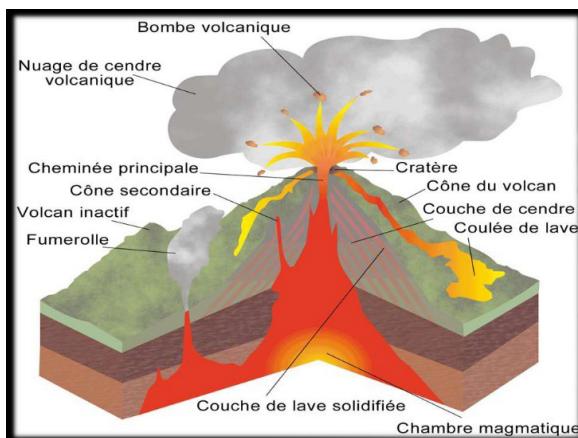


FIGURE 1 – Schématisation d'un volcan en éruption

Avec ce constat, allié aux avancées technologiques dans le domaine de la robotique, la Communauté Européenne a financé le projet ROBOVOLC dont le but était la réalisation d'un robot mobile pour l'exploration volcanique. Ce robot devait être capable de :

- s'approcher d'un cratère actif;
- collecter des échantillons rocheux issus de rejets éruptifs;
- collecter des échantillons gazeux;
- collecter d'autres données physiques et chimiques.

Objectif Le sujet propose d'étudier quelques parties structurelles du système ROBOVOLC et de valider plusieurs performances (liées à la mobilité et au prélèvement) de ce système.

1.2 Présentation du système

Le système ROBOVOLC est représenté sur la ???. Il se divise en plusieurs sous-systèmes (liés à la navigation, au prélèvement et à la communication) qui sont détaillés dans les diagrammes SysML fournis dans l'Annexe 1.

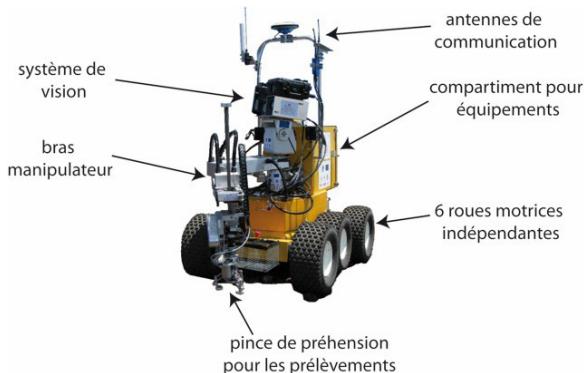


FIGURE 2 – Représentation du système ROBOVOLC

La partie mécanique de ROBOVOLC est constituée de deux parties : (i) la plateforme (châssis, roues) servant à la locomotion ; (ii) l'équipement d'analyse (bras manipulateur, pince, sondes) pour le prélèvement et la mesure.

Une contrainte particulière dans la conception du système ROBOVOLC est qu'il est soumis à des conditions extérieures particulièrement difficiles : terrain volcanique non structuré avec obstacles et fortes pentes, températures très élevées près des zones éruptives (les gaz atteignent 600°C) mais basses ailleurs à cause de l'altitude, présence de poussières de cendre très fines, ambiance corrosive due aux composants acides, etc.

Question 1 Dans la phase de conception de ROBOVOLC, une alternative à un système de locomotion à roues était un système volant. Donner deux inconvénients d'un tel système remettant en cause son utilisation dans l'environnement volcanique considéré.

ROBOVOLC est piloté à distance depuis un poste de contrôle (??). La position géographique du robot est obtenue par un système GPS et est envoyée au poste de contrôle par liaison radio. De plus, l'opérateur peut visualiser en permanence les actions du système grâce aux images transmises par une caméra embarquée.

L'énergie électrique nécessaire au système est apportée par une unité de puissance avec quatre batteries couplées pour constituer deux unités de 24 V. La première est utilisée pour la plateforme, l'autre pour l'équipement d'analyse. Ces batteries sont positionnées sur la partie basse du châssis.

Question 2 Citer un intérêt à mettre les batteries en position basse sur le système.

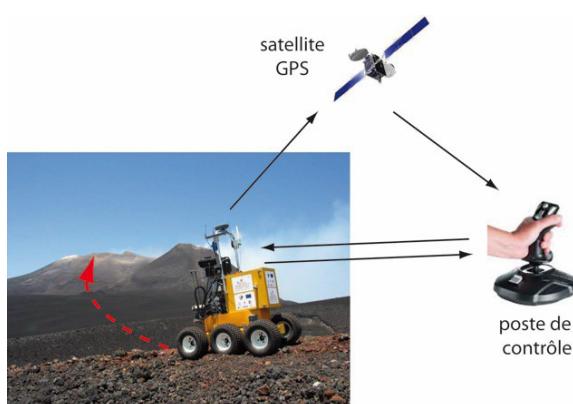


FIGURE 3 – Illustration du pilotage à distance du système ROBOVOLC

Un cahier des charges partiel est donné ci-dessous.

Critère	Valeur
Distance maximale entre ROBOVOLC et le poste de contrôle	2 km
Temps de trajet pour une mission de 24 heures	1,5 h
Vitesse de déplacement atteignable	0,5 m/s
Dimensions du système (longueur/largeur/hauteur)	1900 mm x 1200 mm x 800 mm
Masse maximale des composants modulaires	200 kg
Charge utile maximale (instruments, etc.)	30 kg
Pente maximale du sol	40°
Hauteur maximale d'un obstacle	400 mm
Diamètre des objets à saisir entre	40 mm et 300 mm
Masse maximale des objets à saisir	2,5 kg

Question 3 Citer une phase de vie du système qui constraint sa taille maximale et son poids maximal.

La suite du sujet est composée de quatre parties qui étudient quelques particularités de la structure mécanique du système ROBOVOLC :

- les parties ?? et ?? étudient la phase de déplacement (roulage) du système : la partie ?? vise à valider les performances de mobilité et de suivi de trajectoire du système sur un sol plan tandis que la partie ?? vise à valider les performances de franchissement d'obstacle sur un terrain accidenté;
- les parties ?? et ?? étudient la phase de préhension d'échantillon : la partie ?? vise à valider les performances du bras manipulateur tandis que la partie ?? vise à valider les performances de la pince.

DS 2

2 Étude de la mobilité sur un sol plan

Objectif L'objectif de cette partie est de valider les performances de mobilité, de manœuvrabilité et de contrôle du système de locomotion de ROBOVOLC. On cherche notamment à vérifier le critère suivant du cahier des charges :

Critère	Valeur
Vitesse de déplacement atteignable	0,5 m/s

2.1 Technologie et asservissement en vitesse

Dans cette sous-partie, on étudie l'asservissement en vitesse des roues en analysant la technologie des composants et en déterminant les propriétés de comportement. Chacune des roues dispose d'une motorisation indépendante avec un asservissement en vitesse. Le contrôle de la vitesse de rotation de chaque roue permet de minimiser le glissement longitudinal, notamment en mode automatique lorsque ROBOVOLC doit suivre un cap de manière autonome. Le système d'asservissement qui équipe chaque roue est destiné à contrôler sa vitesse de rotation et doit permettre au système embarqué de détecter un glissement (manque d'adhérence). Ce système est modélisé sur la ??.

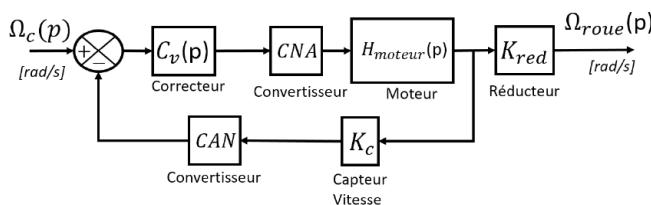


FIGURE 4 – Structure d'asservissement

La fonction K_c représente un capteur de vitesse permettant de mesurer la vitesse de rotation du moteur.

Question 4 Citer un composant permettant de réaliser la fonction K_c . Décrire succinctement son fonctionnement.

Question 5 Un codeur incrémental serait-il adapté? Si oui comment l'utiliser? Donner la résolution d'un codeur incrémental ayant 1000 fentes et 2 voies de mesure.

2.1.1 Étude du convertisseur numérique-analogique (CNA)

La valeur $U(t)$ en entrée du CNA est codée sous forme d'un entier non signé sur 16 bits. Elle est ensuite convertie en grandeur analogique U_{mot} entre $-10V$ et $+10V$ pour $U(t)$ évoluant en hexadécimal de 0000 à sa valeur maximale FFFF. **Question 6** Donner la valeur numérique de $U(t)$ à appliquer pour obtenir une valeur nulle en sortie du

CNA. À quelle consigne correspond la valeur hexadécimale d'entrée $U(t) = A000$?

2.1.2 Étude du convertisseur analogique-numérique (CAN)

Le capteur utilisé pour mesurer la vitesse de rotation est de type dynamo-tachymétrique, ce choix répondant aux exigences de tenue en température et robustesse. Le capteur fournit une tension directement proportionnelle à la vitesse de rotation de la roue, cette tension variant au maximum entre -610 mV et $+650\text{ mV}$. Le CAN employé possède plusieurs canaux de conversion A/N 12 bits d'une linéarité de $+/- 1\text{ bit}$. Le temps de conversion par canal est de 25 micro-secondes.

Question 7 Calculer la résolution en mV du CAN.

Question 8 Dans ces conditions, donner les deux hypothèses principales qu'il faut faire pour pouvoir utiliser un modèle de système linéaire continu invariant.

2.1.3 Asservissement en vitesse

On suppose dans la suite que :

- $C_v(p) = K_v$ (constante);
- $K_c = 1$ (gain de capteur);
- les blocs CAN et CNA sont modélisés par des blocs unitaires.

La ?? représente la réponse mesurée du moteur lorsqu'un échelon unitaire de tension est envoyé en entrée.

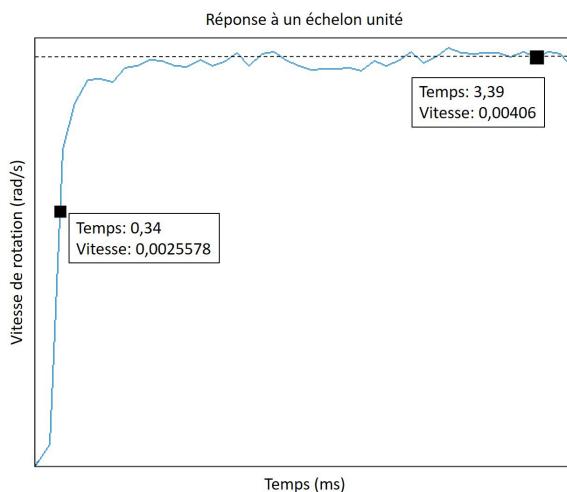


FIGURE 5 – Courbe de réponse du moteur pour un échelon unité

Question 9 Exprimer par un modèle du premier ordre sous forme canonique la fonction de transfert $H_{moteur}(p)$ du moteur, et identifier ses paramètres.

Il manque un gain d'adaptation, en amont du comparateur, pour que le système soit asservi sur la vitesse angulaire de la roue.

Question 10 Déterminer le gain d'adaptation à mettre en amont du comparateur, afin que le système soit asservi sur la vitesse angulaire de la roue.

Question 11 Calculer la fonction de transfert $\frac{\Omega_{roue}(p)}{\Omega_c(p)}$ sous forme canonique.

Question 12 Exprimer les conditions pour avoir des valeurs d'erreur statique en position et en vitesse inférieures à 1%. Proposer un moyen d'obtenir ces erreurs statiques nulles.

3 Étude du comportement sur terrain accidenté

Le terrain volcanique est en pratique très accidenté, avec la présence d'obstacles (roches) et de fortes pentes (??). Par conséquent, le système de locomotion de ROBOVOLC doit être adapté à ce type de terrain.

Objectif L'objectif de cette partie est de valider les performances d'agilité et de franchissement d'obstacle du système sur des terrains non structurés avec difficultés topologiques (pentes, obstacles). On souhaite vérifier les critères suivants du cahier des charges :

Critère	Valeur
Masse maximale des composants modulaires	200 kg
Pente maximale du sol	40°
Hauteur maximale d'un obstacle	400 mm

Dans toute cette partie, les effets dynamiques sont négligés et on se place en statique.



FIGURE 6 – Illustration du comportement de ROBOVOLC sur terrain accidenté

3.1 Modélisation du châssis

Objectif Dans cette sous-partie, on établit un modèle statique du châssis de ROBOVOLC.

La mobilité sur terrain accidenté est obtenue, en plus de par la motorisation indépendante des roues, par l'utilisation d'un châssis articulé. Celui-ci a une structure tubulaire avec des articulations passives (non actionnées) permettant à ROBOVOLC de s'adapter à toute surface non plane. Une illustration des cinq mouvements indépendants permis par les articulations est donnée sur la ??.

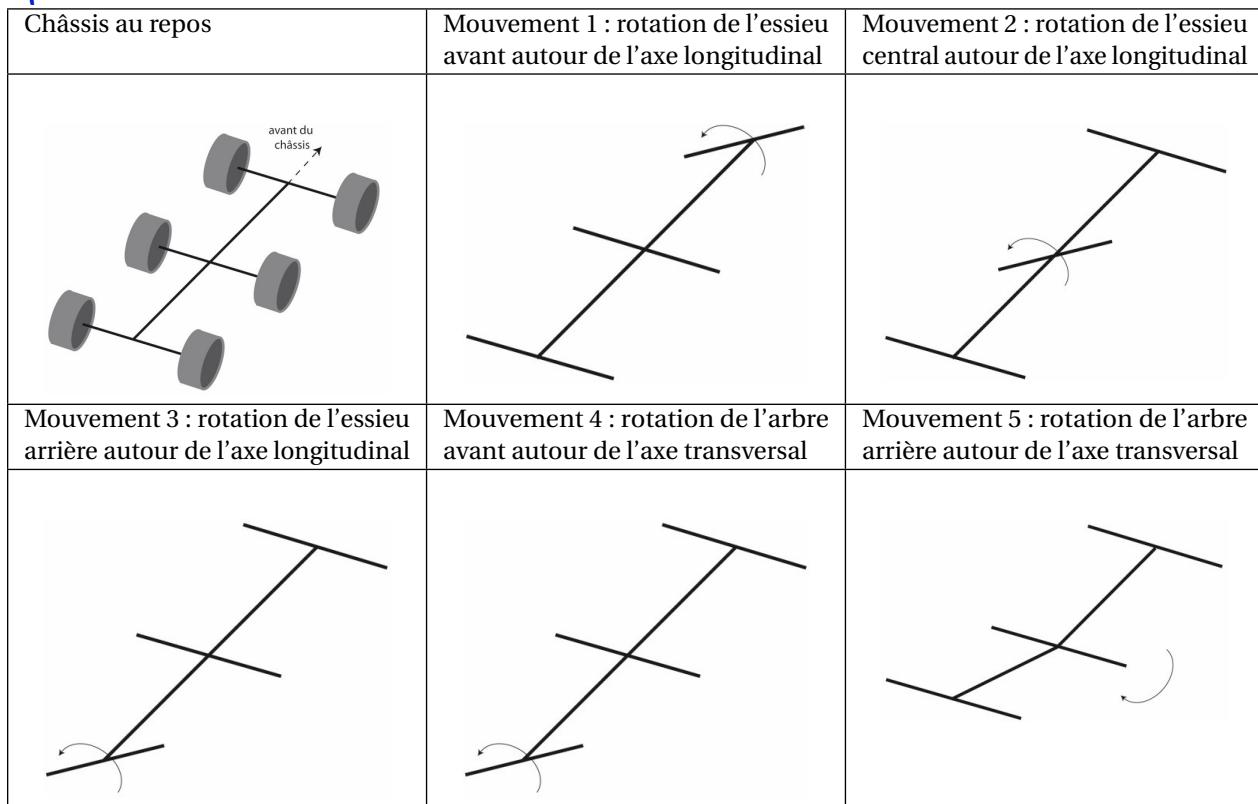


FIGURE 7 – Illustration des mouvements de déformation du châssis

Le châssis est composé de cinq parties orientables les unes par rapport aux autres (??) :

- l'essieu avant, noté EAV, reliant les roues avant 1 et 2;
- l'essieu central, noté EC, reliant les roues centrales 3 et 4;
- l'essieu arrière, noté EAR, reliant les roues arrière 5 et 6;
- l'arbre avant, noté AAV, connectant les essieux EAV et EC;
- l'arbre arrière, noté AAR, connectant les essieux EC et EAR.

On rappelle que l'empattement entre deux essieux successifs est noté a , et que la distance entre deux roues d'un même essieu est notée $2e$. Les différentes parties sont reliées entre elles par des articulations possédant une raideur en rotation imposée. Par la suite, on supposera cette raideur négligeable devant les autres actions mécaniques mises en jeu. Un schéma cinématique de la plateforme (châssis+roues) est présenté sur la ??.

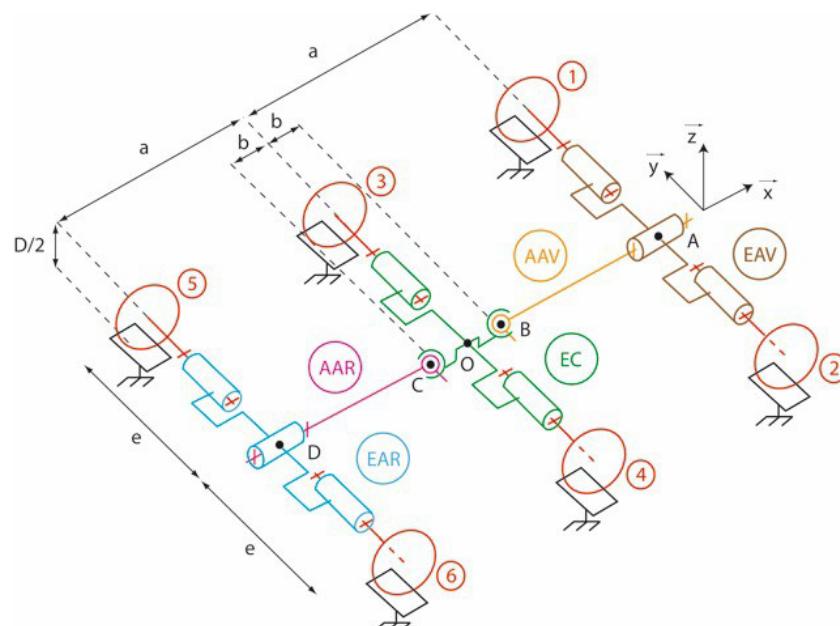


FIGURE 8 – Schéma cinématique de la plateforme

Les deux articulations EC-AAV et EC-AAR, situées à une distance longitudinale $\pm b$ de l'essieu EC, autorisent une rotation selon les directions \vec{x} et \vec{y} ; elles sont modélisées par des liaisons rotule à doigt de centres respectifs B et C . Les deux articulations EAV-AAV et EAR-AAR autorisent une rotation selon la direction \vec{x} seulement; elles sont modélisées par des liaisons pivot d'axe (O, \vec{z}).

D'autre part, les six liaisons essieu-roue sont modélisées par des liaisons pivot d'axe (A, \vec{y}) (roues avant), (O, \vec{y}) (roues centrales) ou (D, \vec{y}) (roues arrière). De plus, le contact de chaque roue i avec le sol est modélisé en première approche par une liaison ponctuelle de normale (P_i, \vec{z}).

On considère dans les questions ?? et ?? que les liaisons sont parfaites sans frottements.

Question 13 Déterminer le nombre de mobilités du modèle du système.

Question 14 Montrer que le modèle est isostatique. Conclure quant à la capacité du châssis à maintenir les roues au contact du sol en toute circonstance.

Question 15 Proposer un modèle de liaison parfaite pour le contact roue-sol qui permet de tenir compte, dans une étude de statique sans glissement, du frottement longitudinal et transversal. Peut-on calculer toutes les inconnues statiques de liaison dans ce cas?

On considère par la suite que le sol est horizontal dans la direction \vec{y} ; on se ramène alors à un problème dans le plan médian (O, \vec{x}, \vec{z}). Dans cette configuration plane, la plateforme est constituée de trois ensembles articulés pour s'adapter au terrain accidenté (??):

- l'ensemble avant (noté ENSAV) constitué des pièces EAV, AAV et des roues 1 et 2;
- l'ensemble central (noté ENSC) constitué de la pièce EC et des roues 3 et 4;
- l'ensemble arrière (noté ENSAR) constitué des pièces EAR, AAR et des roues 5 et 6.

On considère qu'il y a roulement sans glissement au contact roue-sol. Les actions mécaniques du sol sur chaque ensemble sont schématisées sur la ??; elles sont modélisées par un effort normal (N_{AV}, N_C ou N_{AR}) et un effort tangentiel de traction (T_{AV}, T_C ou T_{AR}) appliqués aux points P_{AV} , P_C ou P_{AR} (projections des points de contact roue-sol P_i dans le plan médian (O, \vec{x}, \vec{z})).

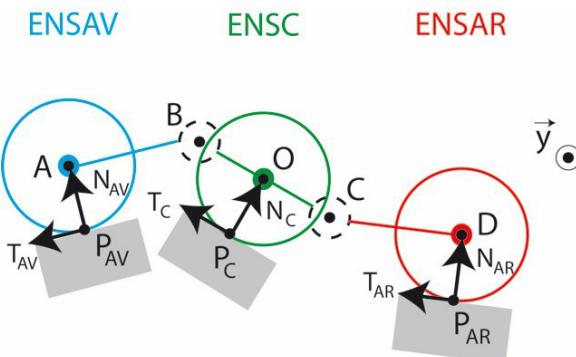


FIGURE 9 – Configuration plane du châssis

Question 16 Indiquer s'il est possible de déterminer, par une analyse statique globale, les différentes actions $N_{AV}, T_{AV}, N_C, T_C, N_{AR}, T_{AR}$. Justifier la réponse.

La modélisation plane de la ?? est considérée dans la suite de cette partie.

3.2 Comportement en pente et stabilité

Objectif Dans cette sous-partie, on analyse le comportement en pente et la stabilité statique de la plateforme.

On considère ici un sol plan dans le plan (O, \vec{x}, \vec{z}) et incliné d'un angle α par rapport à l'horizontale (??). La masse totale du système ROBOVOLC est répartie sur les trois ensembles de la plateforme; les ensembles ENSAV et ENSAR ont la même masse $m_{AV} = m_{AR} = m$ tandis que l'ensemble ENSC a une masse $m_C = M$. Les centres de gravité des trois ensembles sont notés respectivement G_{AV} , G_C et G_{AR} ; ils sont indiqués sur la ??.

On a : $\overrightarrow{AG_{AV}} = \overrightarrow{OG_C} = \overrightarrow{DG_{AR}} = h \vec{z}$. Toutes les roues ont le même diamètre noté D . On donne $D = 300\text{ mm}$, $m = 60\text{ kg}$, $M = 80\text{ kg}$, $a = 800\text{ mm}$, $b = 200\text{ mm}$, $h = 450\text{ mm}$.

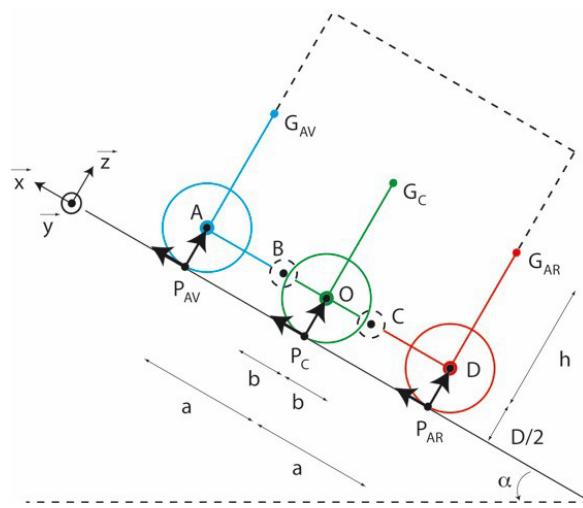


FIGURE 10 – Configuration en pente

Question 17 Dans la configuration $\alpha = 0^\circ$ (pente nulle), justifier la répartition des efforts normaux suivante : $N_{AV} = N_{AR} = mg$, $N_C = Mg$.

Question 18 Déterminer, en fonction des données géométriques, la hauteur h limite des centres de gravité avant basculement du système sur une pente inclinée d'un angle α . En déduire la valeur limite de h à respecter pour satisfaire le cahier des charges, puis faire l'application numérique et conclure. On donne $\tan 50^\circ \approx 1,2$.

Question 19 Montrer que l'hypothèse HYP1 permet de calculer l'ensemble des efforts de contact roue-sol dans la configuration $\alpha \neq 0$ (le calcul n'est pas demandé). Quelle équation permet de démontrer que $N_{AV} \neq N_{AR}$ dans cette configuration ?

3.3 Franchissement d'un obstacle

Objectif Dans cette sous-partie, on étudie le franchissement par ROBOVOLC d'un obstacle en analysant les différentes phases du franchissement en terme d'efforts sur les roues.

L'obstacle est matérialisé par une marche (pente verticale) de hauteur H dans le plan (O, \vec{x}, \vec{z}) , \vec{z} correspondant à la verticale ???. On s'intéresse particulièrement aux trois phases représentées sur la ???, correspondant à la montée de chacun des trois ensembles (respectivement ENSAV pour la phase 1, ENSC pour la phase 2 et ENSAR pour la phase 3) le long de l'obstacle.

Les notations utilisées (géométrie, actions mécaniques) sont similaires à celles de la sous-partie précédente.

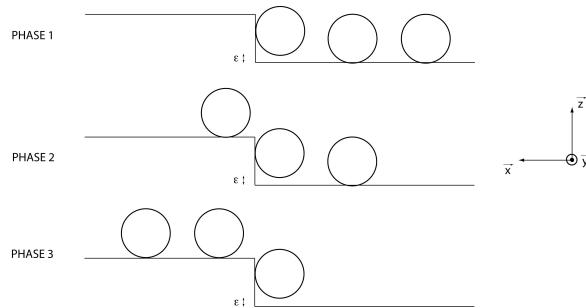


FIGURE 11 – Schématisation de l'obstacle et des phases de son franchissement

Question 20 Pour chacune des trois phases, donner les deux équations obtenues par le théorème de la résultante statique selon \vec{x} et \vec{z} . Les autres équations de statique ne sont pas demandées.

Sous l'hypothèse (notée HYP2) de **limite de glissement pour la paire de roues montant le long de l'obstacle**, l'ensemble des équations de statique donne accès aux valeurs des efforts de contact roue-sol. On représente dans

l'Annexe 2 les diagrammes d'évolution simulée de ces efforts au cours du franchissement de l'obstacle, pour une hauteur de l'obstacle $H = 400$ mm et un coefficient de frottement roue-sol $\mu = 0,5$ ou $\mu = 2$.

Question 21 Identifier les plages temporelles des diagrammes où ont lieu chacune des phases 1, 2 et 3. Indiquer également à quoi correspondent les autres phases des diagrammes, et préciser l'origine des sauts d'effort observés.

Question 22 Expliquer pourquoi, sous l'hypothèse HYP2, il n'est pas possible de franchir l'obstacle avec un coefficient de frottement $\mu = 0,5$.

3.4 Sélection des couples optimaux

Objectif Dans cette sous-partie, on met en place un algorithme de calcul des couples optimaux à appliquer à chaque roue.

Les actions extérieures exercées sur chaque roue (ou chaque paire de roues) sont représentées sur la ?? :

- N est la composante d'effort normale au contact roue-sol;
- T est la composante d'effort tangentielle au contact roue-sol;
- C_m est le couple moteur;
- $M_r = kN$ est le couple résistant de frottement (résistance au roulement) avec k un coefficient constant dépendant de la géométrie de la surface de contact roue-sol et des caractéristiques matériau de la roue et du sol.

Chaque roue est supposée rigide et est assimilée à un cylindre parfait.

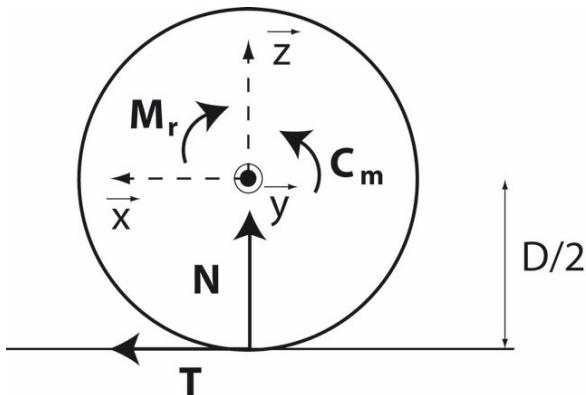


FIGURE 12 – Schématisation des actions extérieures sur une roue

Question 23 Donner la relation entre le couple moteur C_m et les autres actions extérieures.

En lien avec l'évolution des efforts donnée dans l'Annexe 2, on trace sur la?? l'évolution des couples $C_{m,AV}$, $C_{m,C}$ et $C_{m,AR}$ sur chaque paire de roues en fonction du temps lors du franchissement d'un obstacle de hauteur $H = 400$ mm et pour $\mu = 2$.

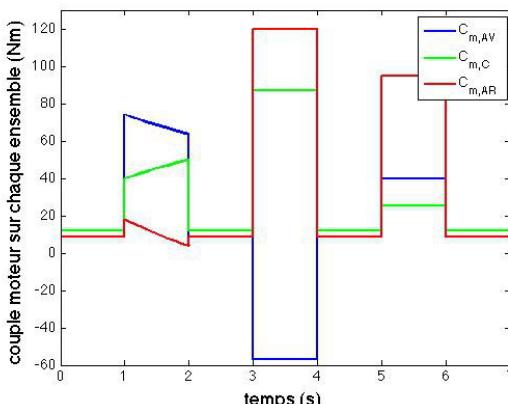


FIGURE 13 – Evolution du couple sur chaque paire de roues

Question 24 Conclure sur la valeur de couple à retenir pour le dimensionnement des moteurs, et remettre en cause l'utilisation de l'hypothèse HYP2 pour ce dimensionnement.

On cherche à présent la meilleure répartition du couple sur chaque roue, minimisant la puissance motrice tout en évitant le glissement.

Question 25 Proposer un algorithme de répartition du couple sur chaque roue, qui serait une alternative à l'hypothèse HYP2 et permettrait de sélectionner des couples optimaux.

3.5 Asservissement en couple – contrôle de traction

Objectif Dans cette sous-partie, on étudie l'asservissement en couple des moteurs utilisé pour limiter le glissement. Le cahier des charges à respecter est le suivant :

Critère	Valeur
Dépassement autorisé	inférieur à 5 %
Temps de réponse à 5 %	inférieur à 9 ms

La structure d'asservissement proposée est composée de deux correcteurs utilisés simultanément : un correcteur de boucle de retour (nommé $C_{fb}(p)$) et un correcteur de boucle d'anticipation (nommé $C_{ff}(p)$). L'étude menée ici concerne le comportement du système avec cette structure de correction. Le schéma d'asservissement est donné sur la ??.

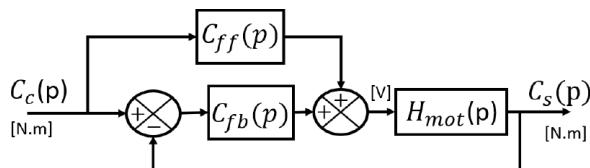


FIGURE 14 – Schématisation de l'asservissement en couple

Le bloc $H_{mot}(p)$ représente un moteur ayant pour fonction de transfert $H_{mot}(p) = \frac{K_c}{K_c K_e + (R + Lp)(f + Jp)}$. Par identification, on trouve $H_{mot} = \frac{0,265}{0,4p + 200}$.

Question 26 Énoncer, en justifiant, les hypothèses permettant de négliger les termes L et f pour cette modélisation du moteur par une fonction de transfert du premier ordre.

On néglige dans un premier temps la boucle d'anticipation ($C_{ff} = 0$) et on prend $C_{fb}(p) = K_{fb} + \frac{I_{fb}}{p}$.

Question 27 Déterminer la fonction de transfert en boucle fermée.

La ?? représente l'évolution du dépassement et du temps de réponse à 5% en fonction du coefficient d'amortissement ζ .

Question 28 En s'aideant de la ??, exprimer les conditions sur les paramètres K_{fb} et I_{fb} permettant de respecter le cahier des charges.

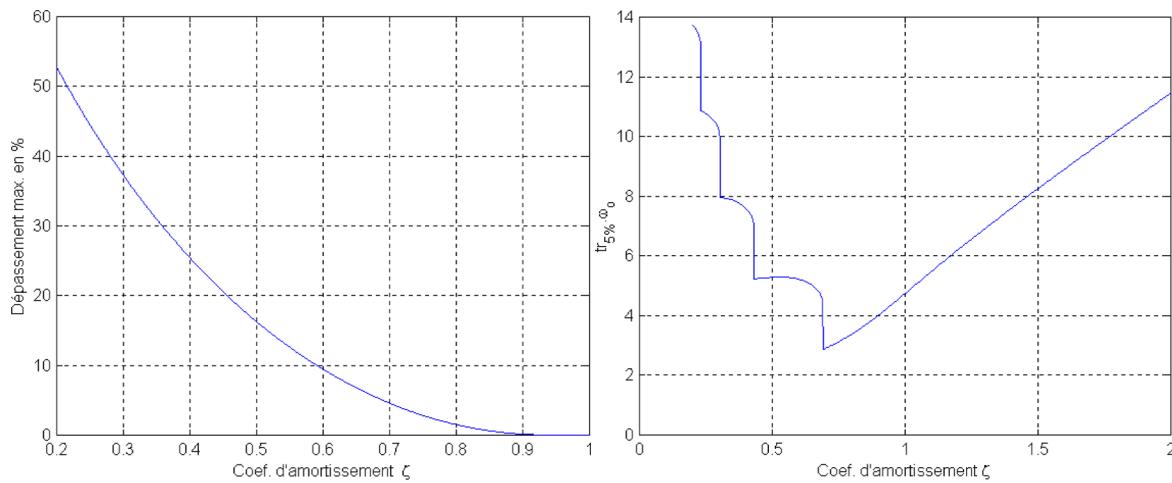


FIGURE 15 – Dépassement et temps de réponse à 5% en fonction de ζ

Par une technique d'optimisation, un bon jeu de paramètres trouvé est : $K_{fb} = 30$ et $I_{fb} = 200 \times 10^3$.

Question 29 Calculer la valeur du dépassement et le temps de réponse.

Question 30 Tracer le diagramme de Bode asymptotique de la fonction de transfert en boucle ouverte. Discuter des marges de gain et de phase.

On considère à présent la structure d'asservissement complète, avec le correcteur $C_{ff}(p)$.

Question 31 Exprimer la fonction de transfert en boucle fermée du système en fonction de $H_{mot}(p)$, $C_{fb}(p)$ et $C_{ff}(p)$.

Question 32 Que se passe-t-il si le correcteur vaut $C_{ff}(p) = \frac{1}{H_{mot}(p)}$? Quel est l'intérêt et le risque?

Pour une fonction de transfert $C_{fb}(p)$ fixée, on considère le correcteur $C_{ff}(p)$ comme un gain proportionnel variable. Les courbes de réponse pour différentes valeurs de ce gain proportionnel sont données dans l'Annexe 3.

Question 33 Quelles conclusions peut-on en tirer sur l'effet du correcteur $C_{ff}(p)$?

4 Étude de l'action de préhension

Objectif L'objectif de cette partie est de valider les performances de serrage de la pince et de vérifier les critères suivants du cahier des charges.

Critère	Valeur
Diamètre des objets à saisir entre	40 mm et 300 mm
Masse maximale des objets à saisir	2,5 kg

4.1 Actions mécaniques dans la pince

Objectif Dans cette sous-partie, on établit la transmission des actions mécaniques entre l'actionneur et l'effecteur et on quantifie les actions à fournir par l'actionneur pour respecter le cahier des charges.

La pince de préhension, servant à collecter les échantillons de roche ou à poser/prendre des instruments sur le sol, est une pince à trois doigts (préhenseur tridigital, voir ??). Par symétrie, on restreint l'étude à un seul doigt. La chaîne cinématique correspondante est schématisée (modélisation plane) sur la ??; elle est constituée :

- du bâti 0 lié au bras manipulateur du système ROBOVOLC, auquel on associe le repère $(P, \vec{x}_P, \vec{y}_P, \vec{z}_P)$ avec \vec{x}_P la verticale descendante;
- d'un vérin 1 en liaison glissière de direction \vec{x}_P avec le bâti 0;
- d'une tige 2 en liaison pivot d'axe (H, \vec{z}_P) avec le vérin 1;
- de deux bielles 3 et 4 parallèles et en liaisons pivot d'axes respectifs (A, \vec{z}_P) et (C, \vec{z}_P) avec le bâti 0. La bielette 3 est également en liaison pivot d'axe (E, \vec{z}_P) avec la tige 2;

- d'un mors 5 en liaisons pivot d'axes $(B, \overrightarrow{z_p})$ et $(D, \overrightarrow{z_p})$ avec les biellettes 3 et 4;
- d'un galet 6 en liaison rotule de centre Q avec le mors 5 et en contact avec l'objet à saisir.

Les points A, B, C, D forment un parallélogramme. On introduit le paramétrage suivant : $d = \overrightarrow{HP} \cdot \overrightarrow{y_p} = \overrightarrow{AP} \cdot \overrightarrow{y_p} = \overrightarrow{CP} \cdot \overrightarrow{y_p}$, $CE = EH = \ell_2$, $AC = BD = \ell_3$, $AB = CD = \ell_4$, $\overrightarrow{DQ} = L_5 \overrightarrow{x_p} + \ell_5 \overrightarrow{y_p}$, $\overrightarrow{QS} = \ell_6 \overrightarrow{y_p}$ ainsi que les angles $\alpha = (\overrightarrow{HC}, \overrightarrow{HE})$ et $\beta = (\overrightarrow{y_p}, \overrightarrow{EC})$.

On donne $d = 50 \text{ mm}$, $\ell_2 = 100 \text{ mm}$, $\ell_4 = 150 \text{ mm}$, $\ell_5 = 20 \text{ mm}$, $\ell_6 = 15 \text{ mm}$.

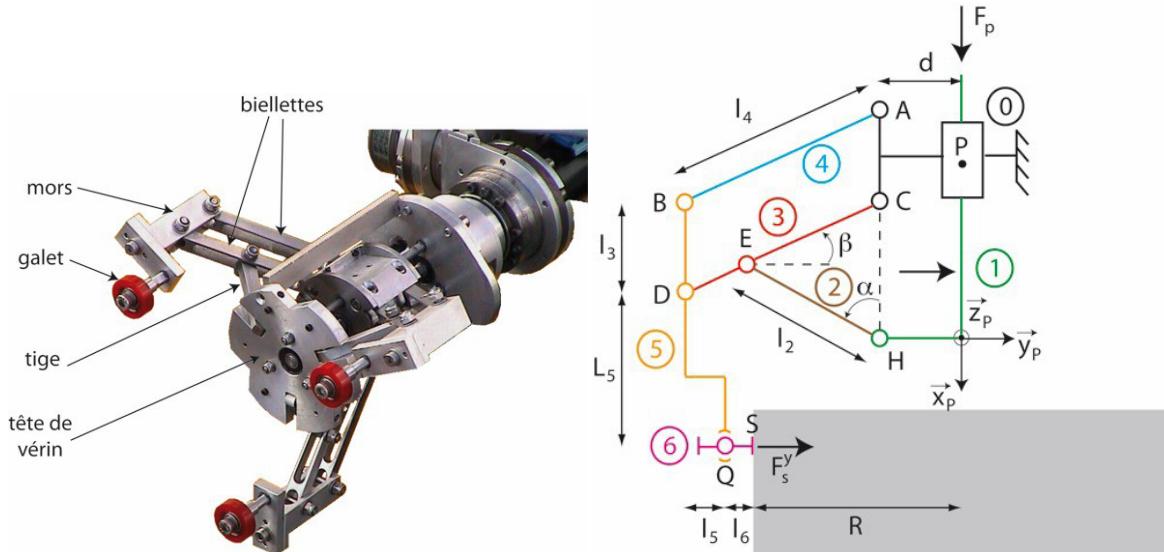


FIGURE 16 – Pince utilisée sur le système ROBOVOLC et schéma cinématique associé

Le contact entre le galet 6 et l'objet est modélisé par une liaison linéaire rectiligne d'axe $(S, \overrightarrow{x_p})$ et de normale $\overrightarrow{y_p}$. Dans une première approche, on considère que toutes les liaisons sont parfaites. De plus, le poids des pièces composant la pince est négligé. L'objet à saisir est modélisé par un cylindre à base circulaire de rayon R .

Question 34 Dans cette question uniquement, on considère le système formé par les pièces 0, 3, 4 et 5. Déterminer degré d'hyperstatisme du modèle. S'il est hyperstatique, proposer une ou plusieurs modifications de liaisons pour le rendre isostatique.

Question 35 Tracer le graphe de liaisons. Déterminer degré d'hyperstatisme du modèle complet.

Question 36 Donner le lien entre les angles α et β , ainsi que l'expression de ces angles en fonction du rayon R de l'objet et des données géométriques.

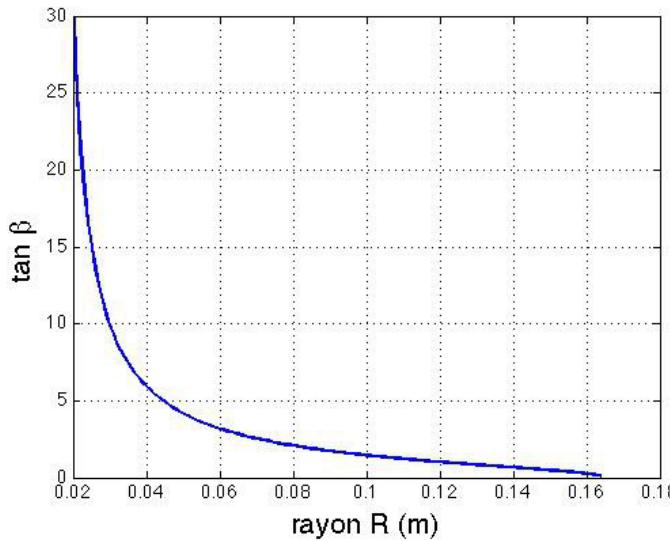
Question 37 Montrer que la liaison équivalente entre le mors 5 et l'objet à saisir est une liaison ponctuelle de normale $(S, \overrightarrow{y_p})$. Cette liaison équivalente sera utilisée dans la suite de cette partie.

Question 38 Donner l'orientation de l'effort dans les liaisons pivot situées en B et en E.

L'ouverture/fermeture de la pince est réalisée par un moteur électrique et un système vis-écrou fournissant un effort de poussée $\overrightarrow{F_p} = F_p \overrightarrow{x_p}$ sur le vérin 1 en amont de la pince. D'autre part, on introduit à présent un modèle de frottement au contact entre le galet 6 et l'objet à saisir. Ce modèle se traduit au niveau de la liaison équivalente entre le mors 5 et l'objet à saisir par un torseur statique de la forme : $\{\mathcal{T}(5 \rightarrow \text{objet})\} = \left\{ \begin{array}{c} -F_S^x \overrightarrow{x_p} + F_S^y \overrightarrow{y_p} \\ 0 \\ \end{array} \right\}$ où F_S^x est l'effort tangentiel et F_S^y est l'effort normal (ou de serrage) au contact.

Question 39 Par une étude statique, on peut montrer que les efforts F_p , F_S^x et F_S^y sont liés par la relation $F_p = K(\tan \beta F_S^y - F_S^x)$ où l'expression la constante K s'exprime en fonction de ℓ_2 et ℓ_4 . Proposer une stratégie (isolement, théorèmes utilisé, point d'application si nécessaire, projection) permettant d'établir cette relation. On s'appuiera sur le graphe de liaison établi précédemment.

On représente sur la ?? l'évolution de $\tan \beta$ en fonction du rayon R de l'objet à saisir sur la plage $R = [20 \text{ mm}, 165 \text{ mm}]$.


 FIGURE 17 – Evolution de $\tan \beta$ en fonction de R

DS 2

Question 40 Commenter ce graphe, en particulier pour les valeurs extrêmes du rayon R .

Question 41 En supposant un modèle de frottement de Coulomb (le coefficient de frottement est noté f), montrer que l'objet peut être saisi et soulevé sans aucune action de poussée F_p du moteur lorsque le rayon de l'objet est tel que $R \geq R_{\min}$. On précisera l'expression de R_{\min} , on donnera sa valeur pour $f = 2$, et on commenterá ce caractère particulier de la pince en donnant un avantage et un inconvénient.

Question 42 Pour $R < R_{\min}$, donner la relation entre l'effort de poussée F_p et la masse m_{objet} de l'objet à saisir, ainsi qu'entre l'effort de poussée F_p et l'effort de serrage F_s^y . En déduire la valeur de l'effort de poussée maximal à fournir pour respecter le cahier des charges avec $f = 2$.

4.2 Asservissement de l'effort

Objectif Dans cette sous-partie, on étudie l'asservissement en effort de la pince. En lien avec la sous-partie précédente, on se place dans la configuration $R < R_{\min}$ et on donne la relation $F_s^y = K_\beta F_p$.

La pince a un capteur d'effort pour mesurer et contrôler la force de serrage. Pour l'asservissement de la pince, une régulation en effort est faite. Le schéma blocs de la ?? présente la structure de contrôle de la pince.

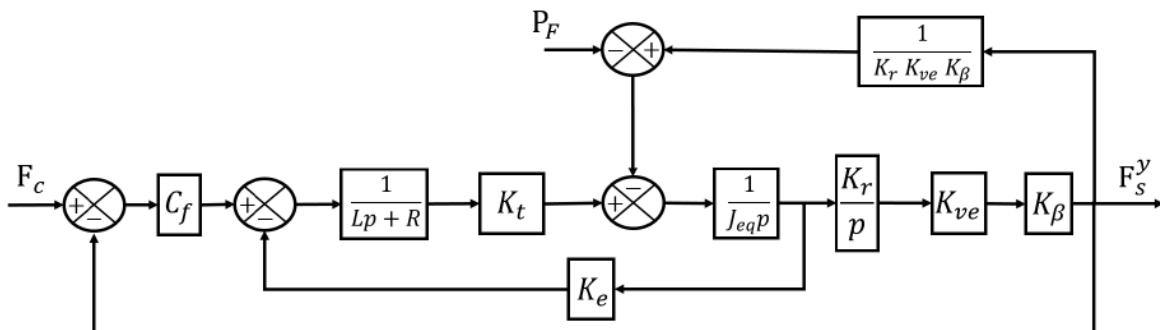


FIGURE 18 – Schéma d'asservissement

Question 43 Quel est l'intérêt pratique de la régulation mise en place?

Pour l'étude en asservissement de la pince, on fixe $K_\beta = 2,2$. On donne les caractéristiques du système suivantes.

R	résistance d'induit	$7,2\Omega$
L	inductance d'induit	$2,56\text{ mH}$
K_t	constante de couple	$0,82\text{ Nm/A}$
K_e	constante de fcem	86 V/1000tr/min
J_{eq}	moment d'inertie	$3,45 \times 10^{-4}\text{ kgm}^2$
K_r	rapport du réducteur	$54/33 = 1,636$
K_{ve}	pas du système vis-écrou	4 mm

Question 44 En considérant $P_F = 0$ (perturbation nulle) et $L = 0$ (inductance nulle), calculer la fonction de transfert $\frac{F_S^y}{F_c}$ et la mettre sous la forme canonique $\frac{K}{1 + Ap + Bp^2}$. Identifier les paramètres K , A et B .

On souhaite une erreur de position inférieure à 1%.

Question 45 Calculer la valeur de C_f permettant de respecter cette contrainte.

Question 46 Bien qu'il y ait un intégrateur dans la chaîne directe, indiquer pourquoi l'erreur statique est non-nulle.

Question 47 En considérant une valeur du correcteur permettant de valider le critère d'erreur de position, ce critère sera-t-il toujours validé si on ne néglige plus les perturbations ? Comment le démontrer ?

Question 48 Le coefficient K_β a-t-il une influence sur l'asservissement ? Pourquoi ne peut-on pas considérer K_β comme une constante ?

Pour des raisons techniques, il n'est pas possible d'utiliser un capteur d'effort en bout de pince.

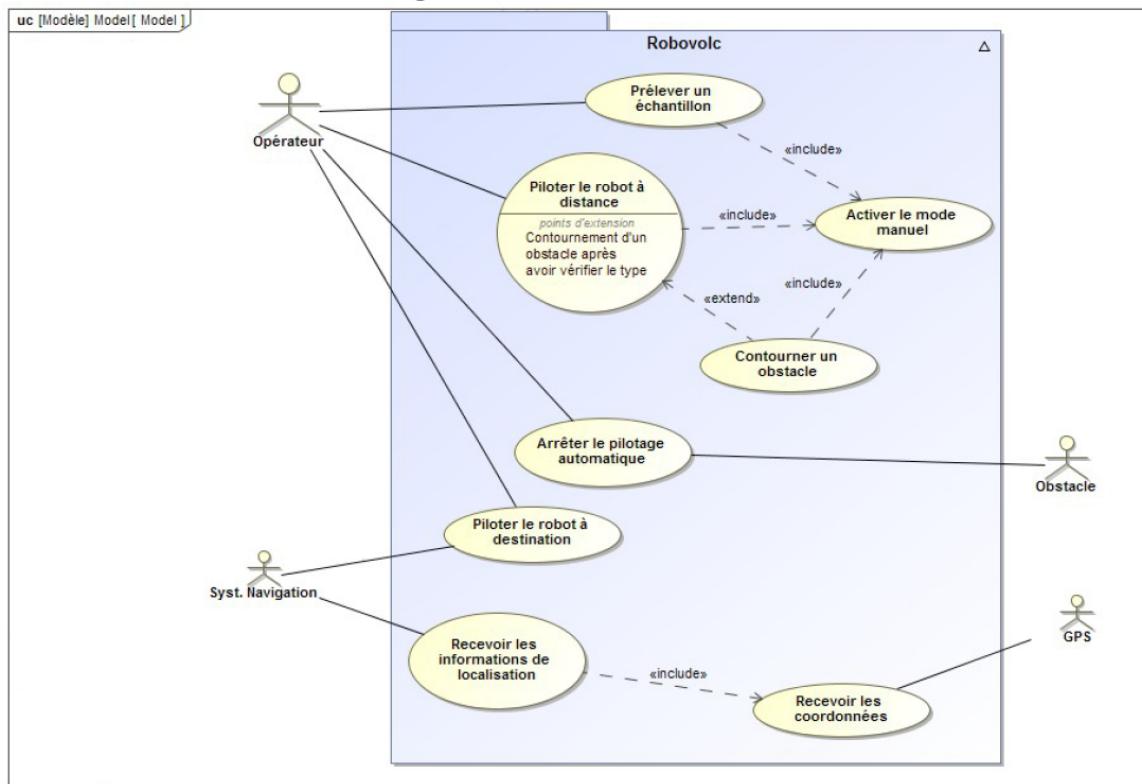
Question 49 Est-il techniquement possible d'asservir le système sans ce capteur d'effort ? Expliquer le raisonnement.

Dans l'étude précédente, la masse de l'objet et le coefficient de frottement entre la pince et l'objet sont supposés connus. Cependant, ce n'est pas le cas en pratique et il peut en résulter un glissement possible de l'objet si ces paramètres sont mal évalués.

Question 50 Quel moyen peut-on imaginer afin de limiter le glissement de l'objet ? Expliquer le raisonnement.

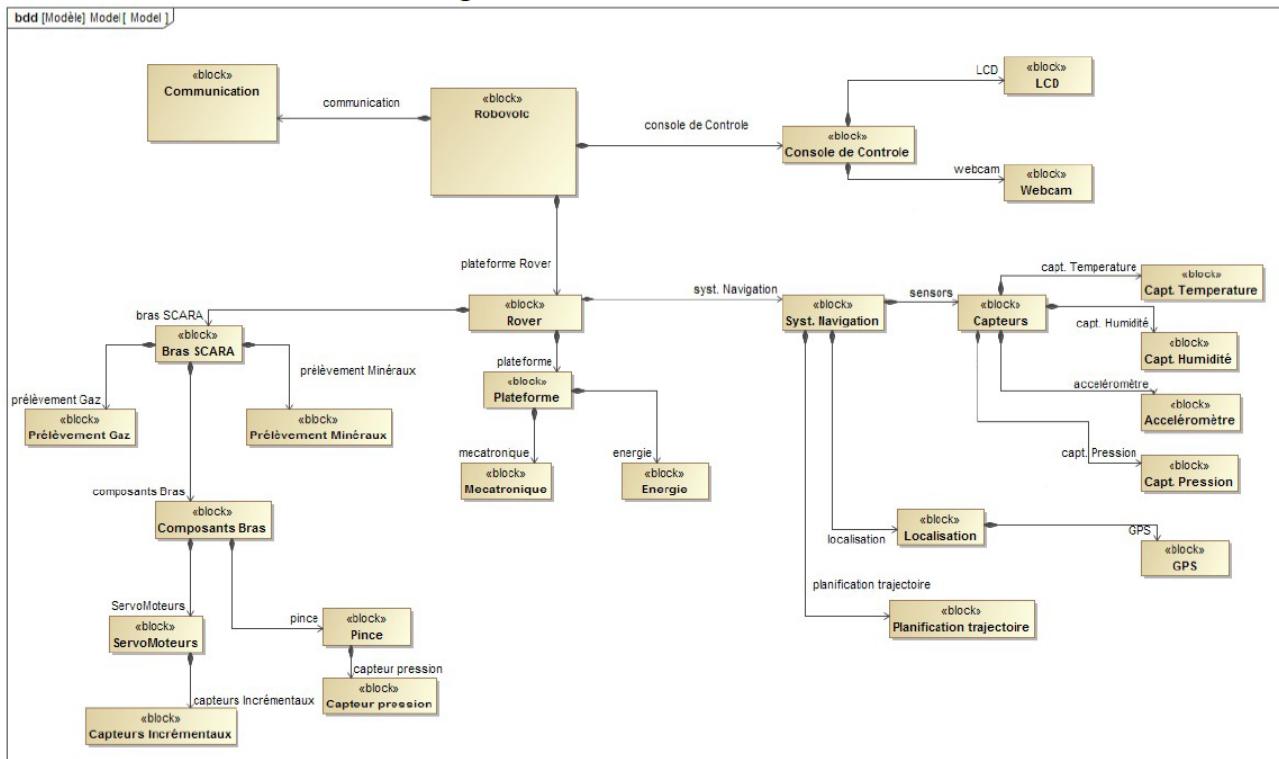
Annexe 1 – Diagrammes SYSML

Diagramme des cas d'utilisation

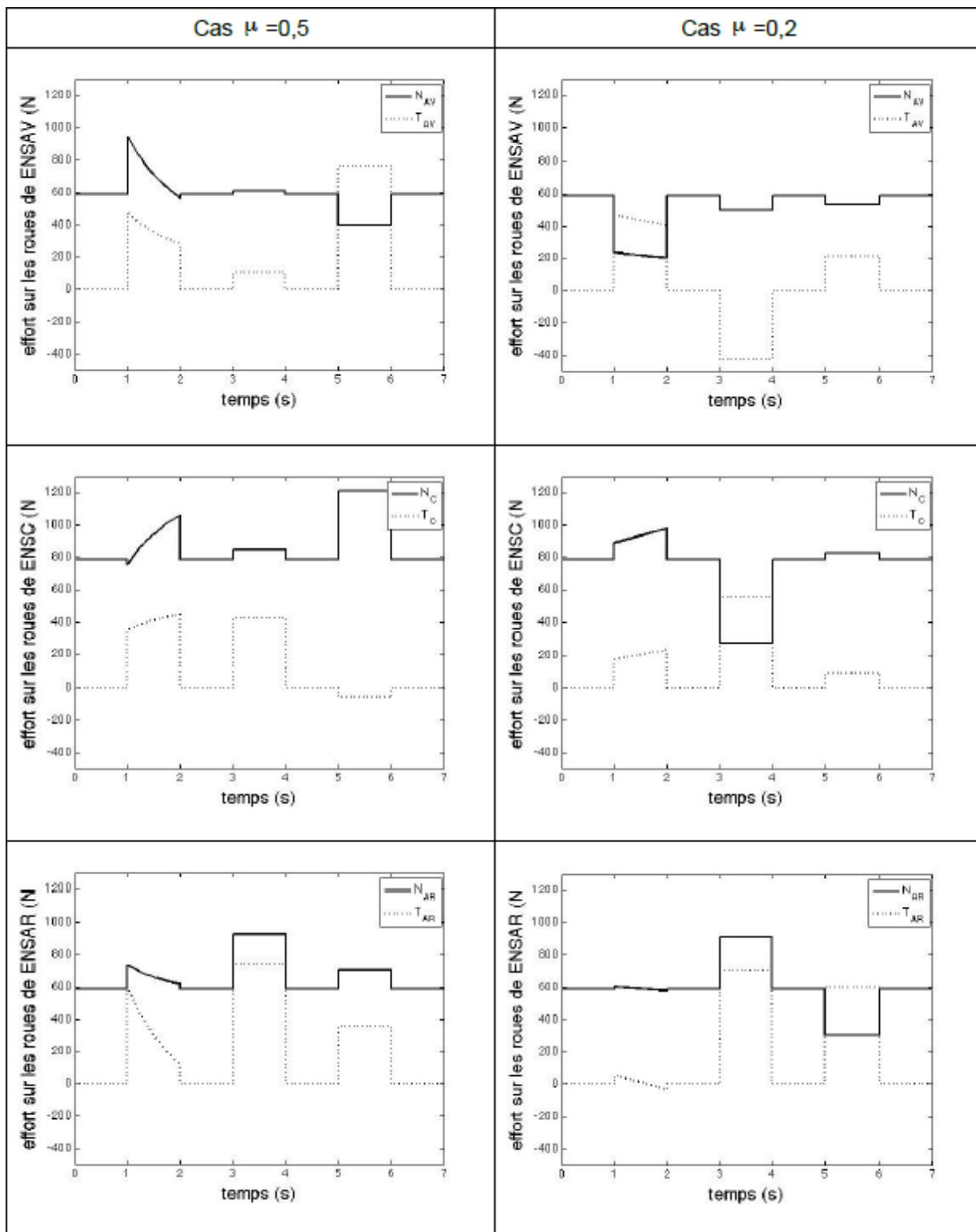


DS 2

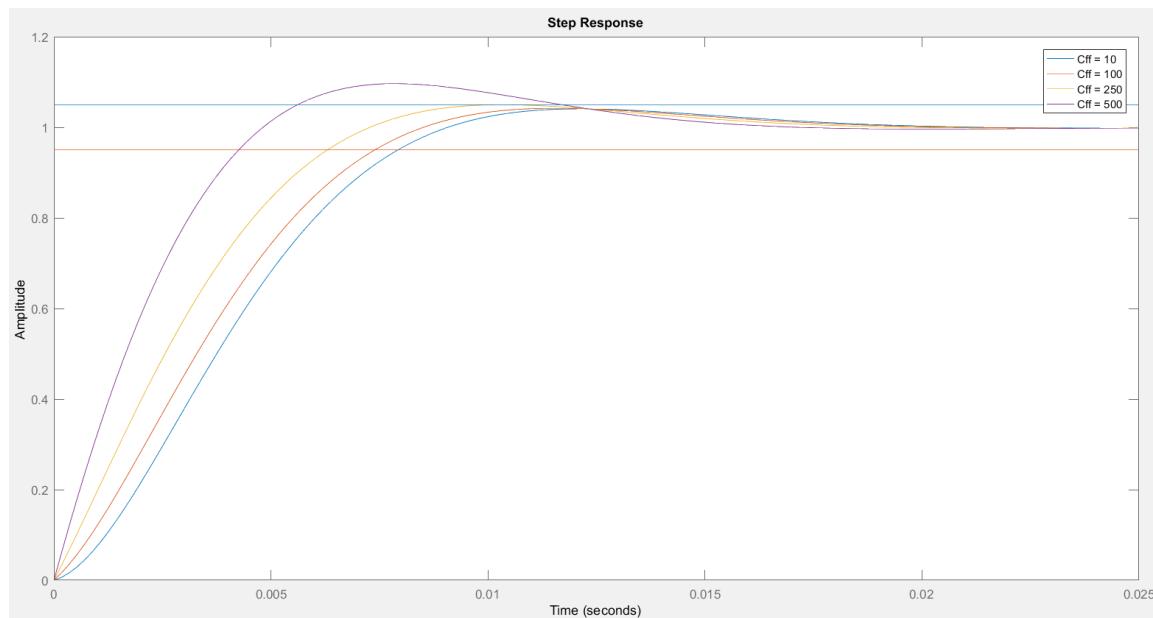
Diagramme de définition de blocs



Annexe 2 – Évolution simulée des efforts sur les roues



Annexe 3 – Évolution simulée de la réponse de l'asservissement



DS 2

Zoom

