

ETUDES DE CAS : DRONE ARAIGNÉE ET SIMULATION SYSTÈME

Date : 19 décembre 2022

Auteur(s) : Benoît Souyris

Copyright : B. Souyris, université de technologie de Compiègne

Licence : CC 4.0 BY-NC-SA [<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.fr>] + licence commerciale ET-LIOS [<https://et-lios.s-mart.fr/licencecommerciale/>]

Table des matières

| | |
|--|----|
| 1. Etude de cas : conception du système de levée de plateforme | 3 |
| 1.1. Introduction | 3 |
| 1.2. Présentation du système à étudier : le drone araignée | 3 |
| 1.3. Présentation de la chaîne d'énergie d'une patte | 7 |
| 1.4. Profil de mission : phase de montée du drone | 9 |
| 1.5. Etude de cas, drone araignée : documents ressources | 11 |
| 1.5.1. Annexe : Modélisation du mécanisme | 11 |
| 1.5.2. Annexe : Modélisation du convertisseur | 13 |
| 1.5.3. Annexe : Caractéristiques moteur | 14 |
| 1.6. Modélisation du mécanisme d'une patte du drone araignée | 15 |
| 1.7. Ce qu'il faut retenir de cette activité | 17 |
| 2. Etudes de cas : conception du système d'adhérence d'une patte du drone araignée | 18 |
| 2.1. Introduction | 18 |
| 2.2. Présentation du système à étudier : le drone araignée | 18 |
| 2.3. Présentation de la fonction du système d'adhérence du drone araignée | 22 |
| 2.4. Modélisation du système d'adhérence sous forme de schéma blocs, partie 1 | 24 |
| 2.5. Modélisation du système d'adhérence sous forme de schéma blocs, partie 2 | 25 |
| 2.6. Ce qu'il faut retenir de cette activité | 27 |

1. Etude de cas : conception du système de levée de plateforme

1.1. Introduction

Objectifs pédagogiques

Permettre au drone araignée de placer sa plateforme à une hauteur souhaitée.

À partir des données de l'étude mécanique et du diagramme de blocs internes :

- Construire le modèle sous forme de diagramme blocs
- Caractériser ses composants
- Simuler
- Analyser les résultats

1.2. Présentation du système à étudier : le drone araignée

Cas d'étude : le drone araignée

Afin de mieux appréhender les connaissances transmises dans le cadre de ce module et de pouvoir appliquer les compétences acquises, un cas fil rouge a été imaginé. Il s'agit d'un drone araignée hexapode.

Pourquoi le drone araignée ?

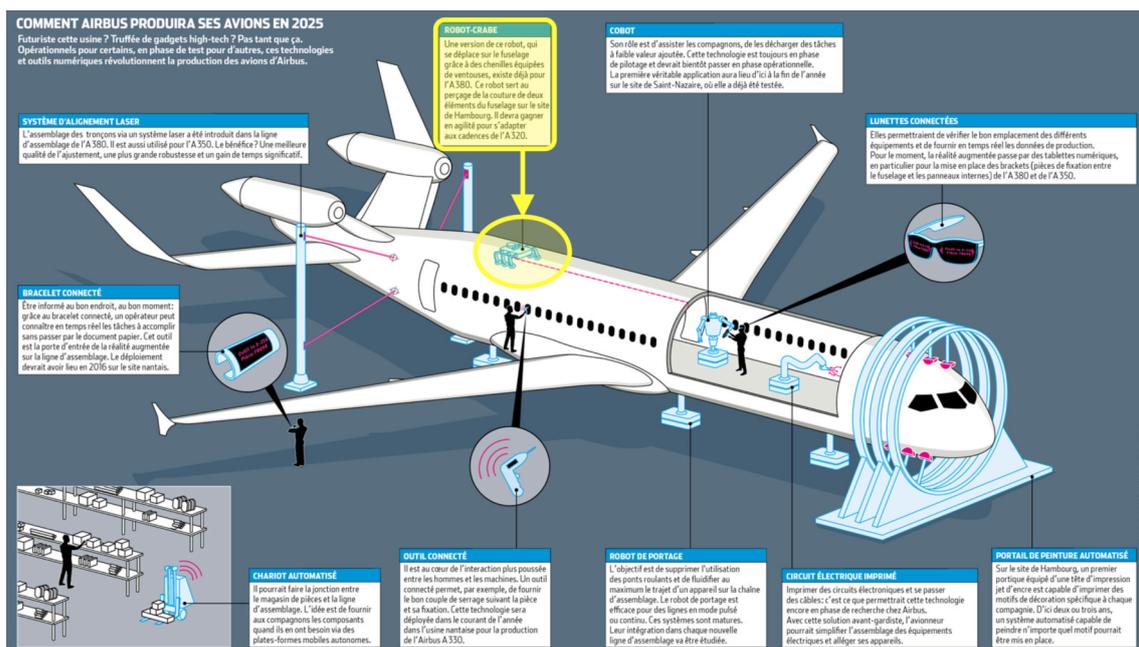
La problématique de l'inspection ou de la maintenance de grandes structures ou de structures 3D complexes réside parfois dans la difficulté d'accès à certains espaces ou encore dans la dangerosité de certaines opérations. Pour faciliter ces inspections, une solution robotisée a été imaginée. Il s'agit d'un drone terrestre grim pant, baptisé « Light Expert Examination Automated Arthropod » - LEEAA. Pour ce faire, une analyse fonctionnelle « traditionnelle » a été réalisée et un premier prototype a été conçu. Il s'agit d'un robot araignée hexapode.



Structure de base du drone araignée

L'objectif de ce drone est de faciliter les inspections et la maintenance de structures telles que des carlingues d'avion ou buildings vitrés.

Une potentielle utilisation du drone araignée est illustrée sur la figure ci-dessous.



Projet d'usine du futur : comment Airbus produira ses avions en 2025

Réglementaire

L'ensemble des travaux s'inspirent, reprennent ou s'appuient sur des réalisations d'étudiants impliqués dans différentes formations :

- aux Arts et Métiers, campus d'Aix en Provence, Mastère Spécialisé® « Créateur de solutions drones : usages innovants et technologies »
- à l'INSA de Lyon, département Génie Mécanique

- à l'IUT de Mantas
- à l'Université de Technologie de Compiègne, département Ingénierie Mécanique
 - module TN29 - « Outils de définition et de développement de systèmes »
 - module TX - « Travaux Expérimentaux »

Un grand merci pour leur implication !

Domaines d'études

L'étude du comportement du drone araignée nécessite de comprendre différents domaines physiques :

- électrique : commande des servomoteurs ;
- mécanique des fluides : pompe à vide ;
- mécanique : mouvements des pattes.

Les cas d'utilisation

Ce diagramme représente les actions effectuées par le drone lors d'un déplacement dans son environnement et les interactions qu'il a avec les acteurs extérieurs durant ce déplacement.

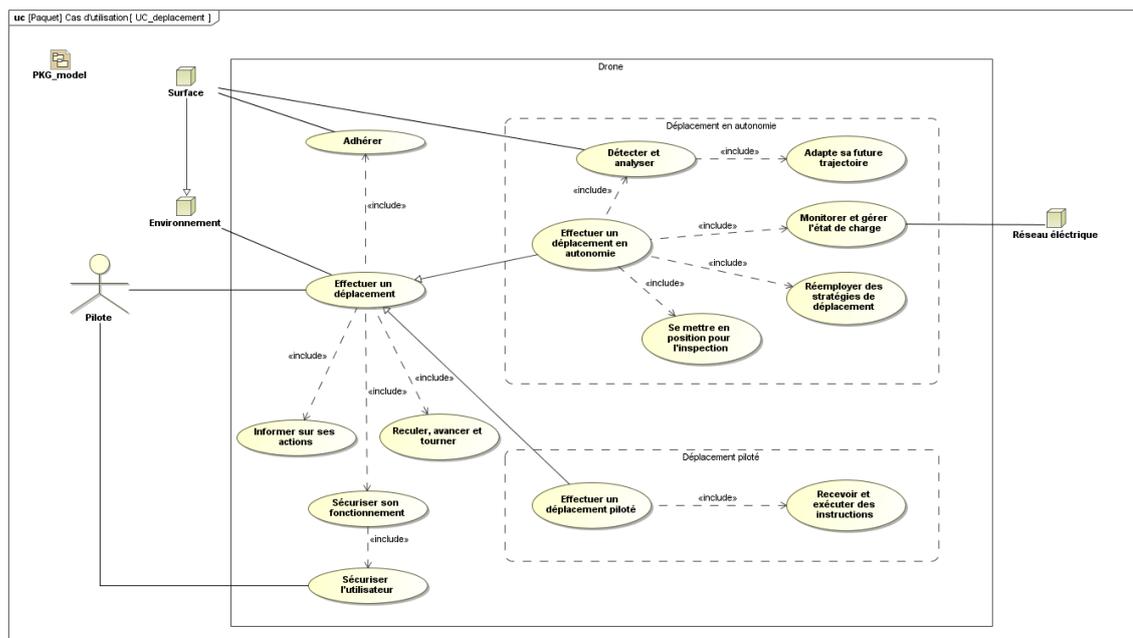


Diagramme de cas d'utilisation de la fonction déplacement du drone araignée, réalisé sous Cameo Systems Modeler

Contexte organique

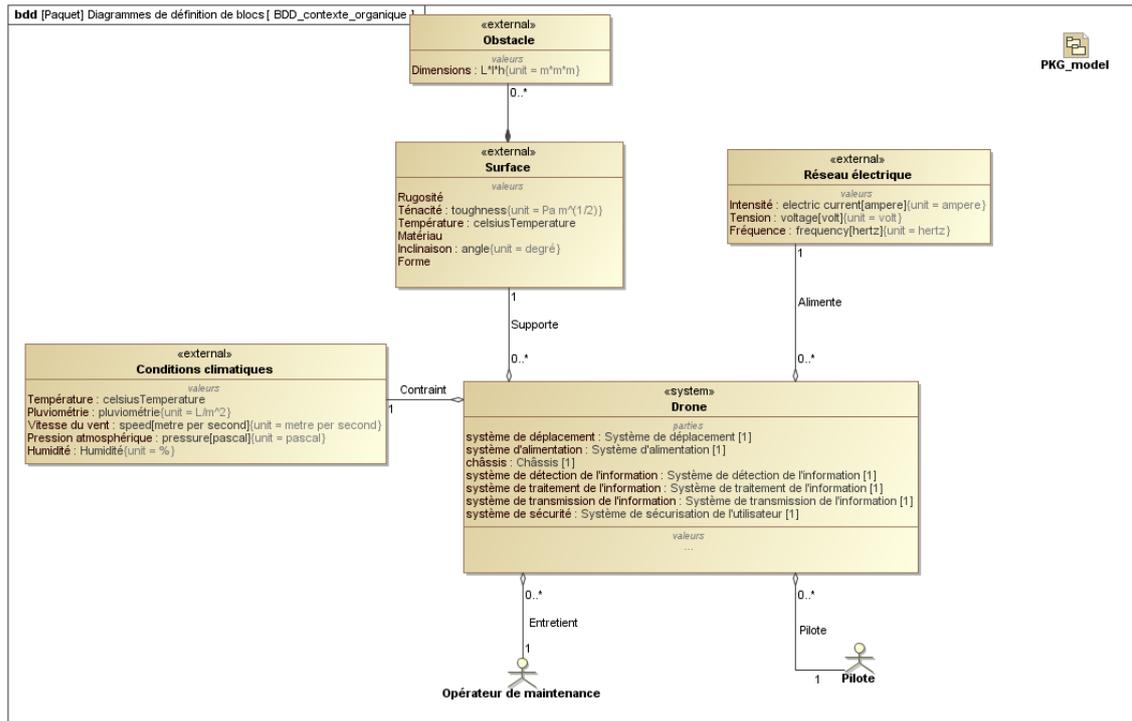
Le drone interagit avec son environnement.

Ce dernier est composé :

- De la surface sur laquelle le drone se déplace, qui peut être composée d'obstacles ;
- D'un réseau électrique qui sert à alimenter la station de recharge du drone et par extension le drone lui-même ;
- De conditions climatiques qui viennent contraindre le drone dans son fonctionnement.

Le drone interagit également avec des acteurs.

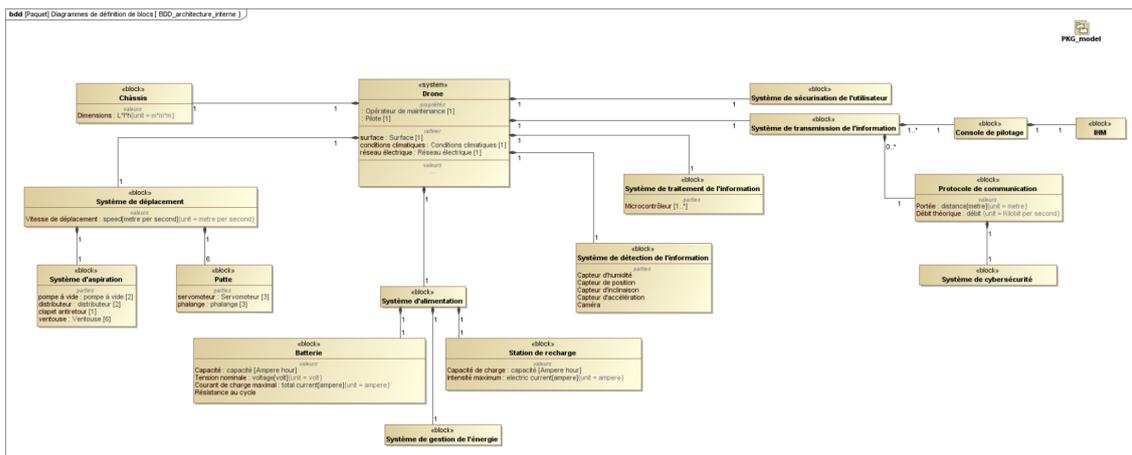
Il y a le pilote qui pilote un ou plusieurs drones et l'opérateur de maintenance qui entretient un ou plusieurs drones.



Contexte organique du drone araignée, réalisé avec Cameo Systems Modeler

Architecture interne du système

Ce diagramme de définition de blocs représente l'ensemble des systèmes contributeurs au système drone. Ainsi, ce dernier est composé d'un châssis, d'un système de déplacement, d'un système d'alimentation, d'un système de détection de l'information, d'un système de traitement de l'information, d'un système de transmission de l'information et d'un système de sécurisation de l'information. Ces systèmes contributeurs peuvent eux-mêmes être décomposés en sous-systèmes.



Architecture interne du drone araignée, réalisé avec Cameo Systems Modeler

Les exigences du cahier des charges

Pour tout type de déplacement le drone doit adhérer à une surface, reculer, avancer et tourner, informer sur ses actions et sécuriser son fonctionnement.

Lorsqu'il se déplace en autonomie, le drone doit être en mesure de détecter et analyser son environnement afin d'y adapter sa trajectoire. Il doit être capable de monitorer son état de charge et de retourner à la station de recharge avant de manquer de batterie. Il doit également mémoriser les stratégies de déplacement qu'il a utilisées pour les réutiliser dans un déplacement futur. Enfin, il doit être capable de se mettre en position pour l'inspection une fois arrivé à sa destination.

1.3. Présentation de la chaine d'énergie d'une patte

Les exigences du cahier des charges

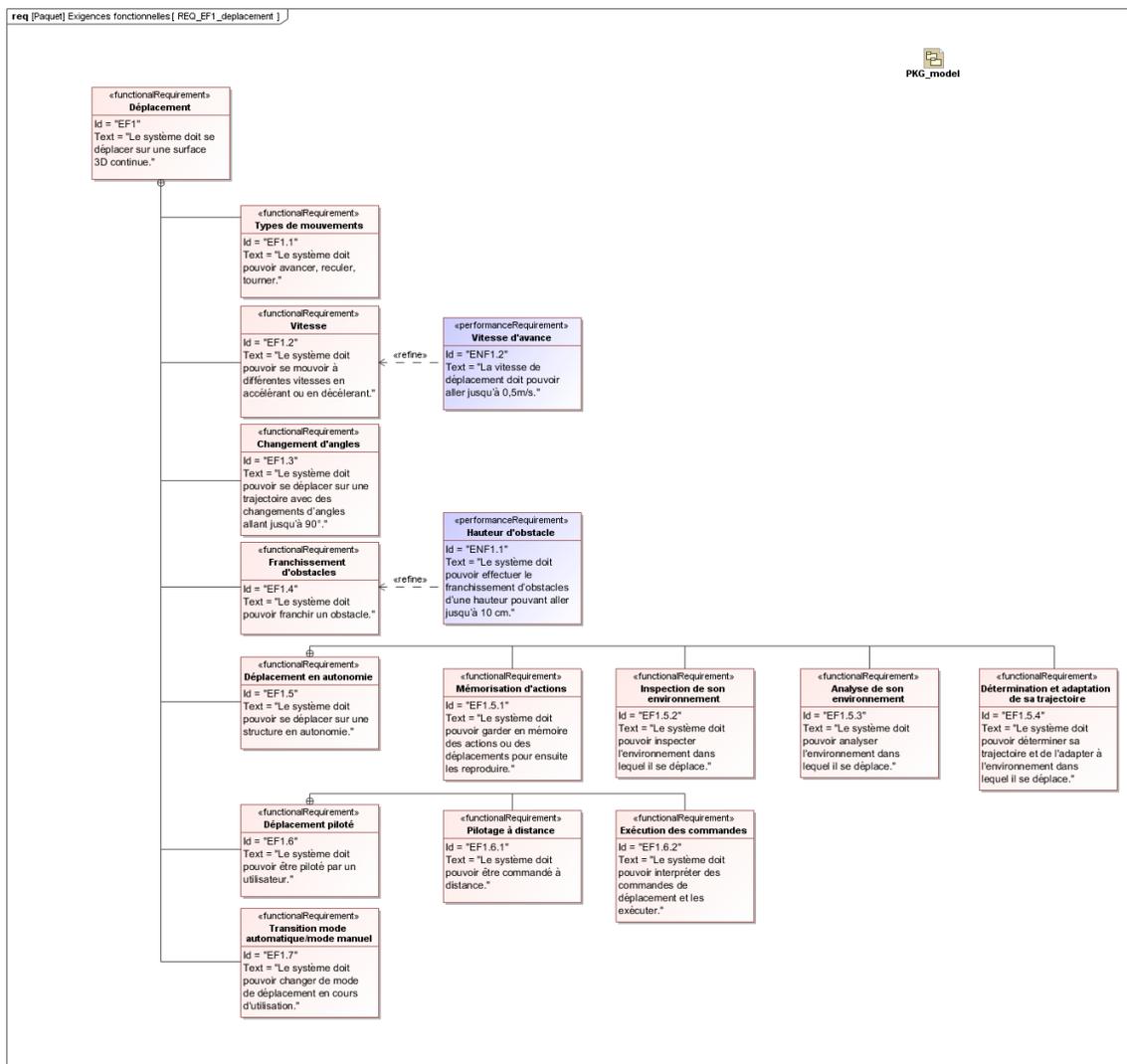


Diagramme d'exigences de l'exigence fonctionnelle de déplacement du drone araignée, réalisé sous Cameo Systems Modeler

Schéma fonctionnel global

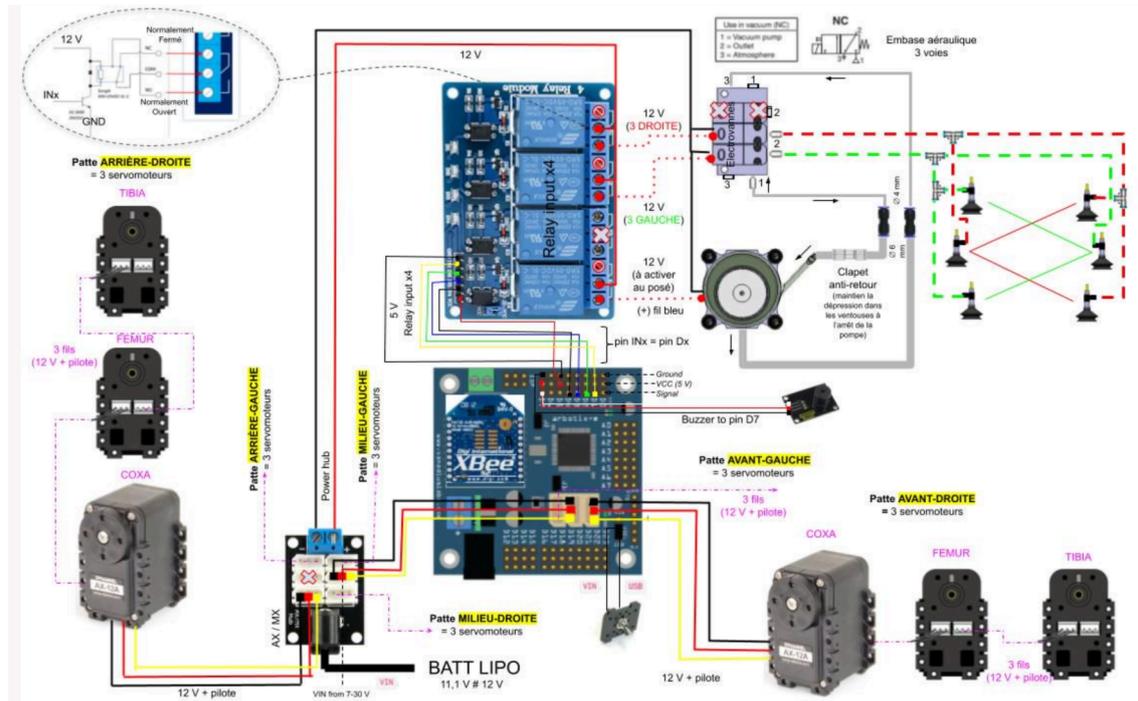


Schéma fonctionnel global du drone araignée avec système pneumatique

Chaîne fonctionnelle pour une patte

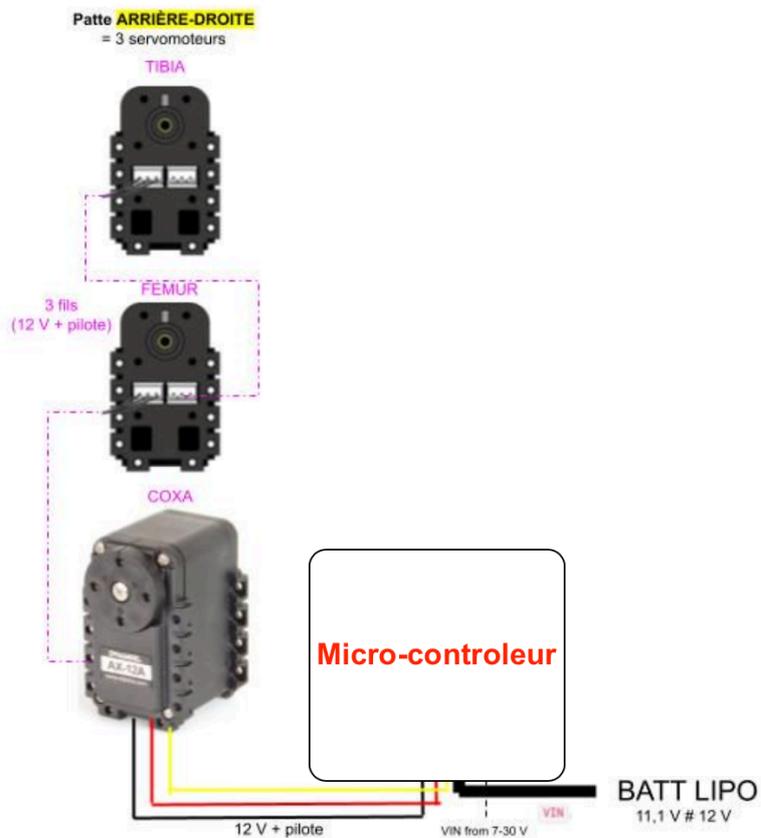
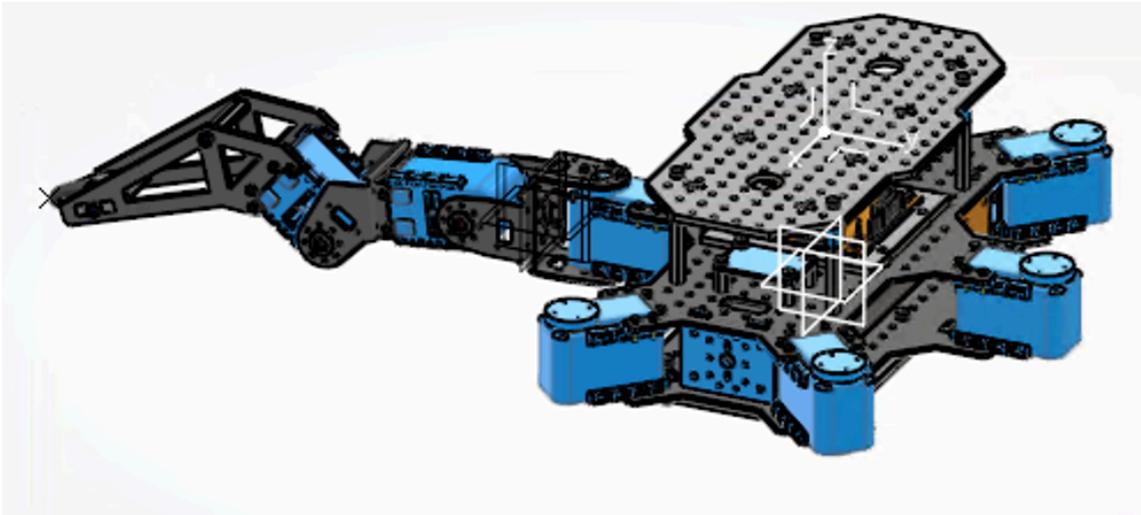


Schéma électrique représentant la chaîne d'énergie d'une patte du drone araignée

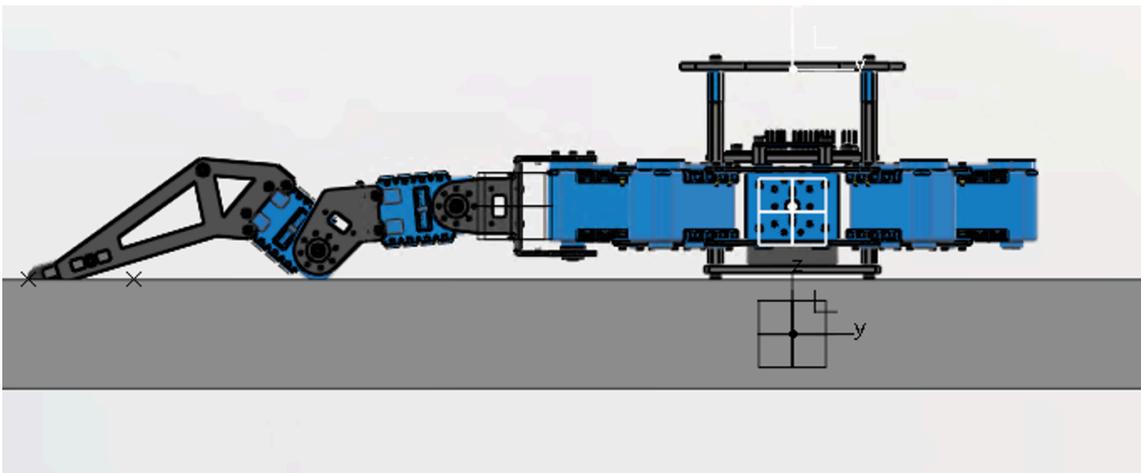
1.4. Profil de mission : phase de montée du drone

Le drone araignée au repos

Au repos la plateforme du drone est posée sur le sol, et ses pattes sont dépliées.



Le drone araignée en position de repos



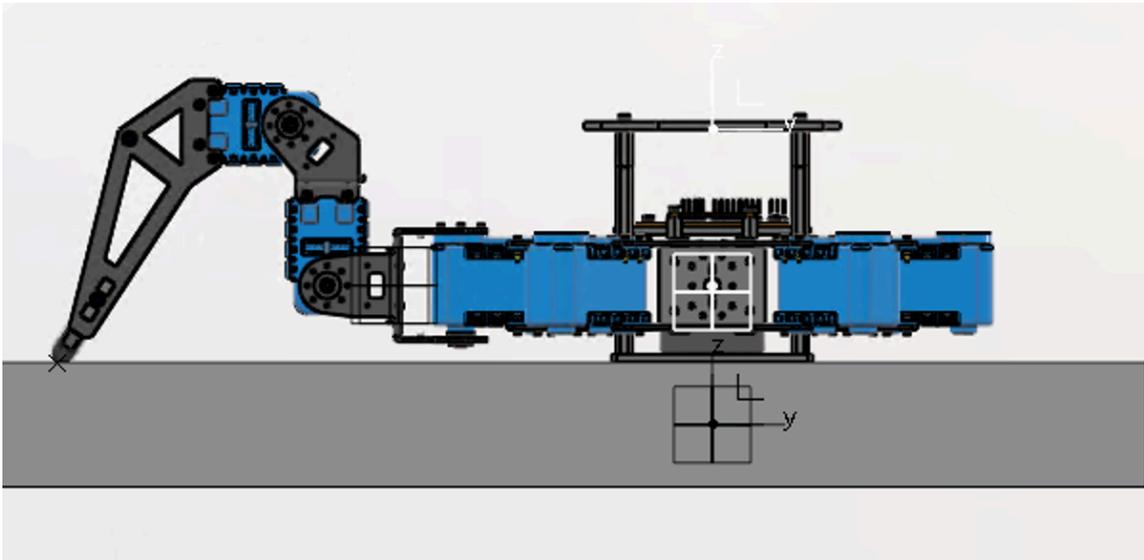
Le drone araignée en position de repos, vue de face

Le drone araignée en phase de montée

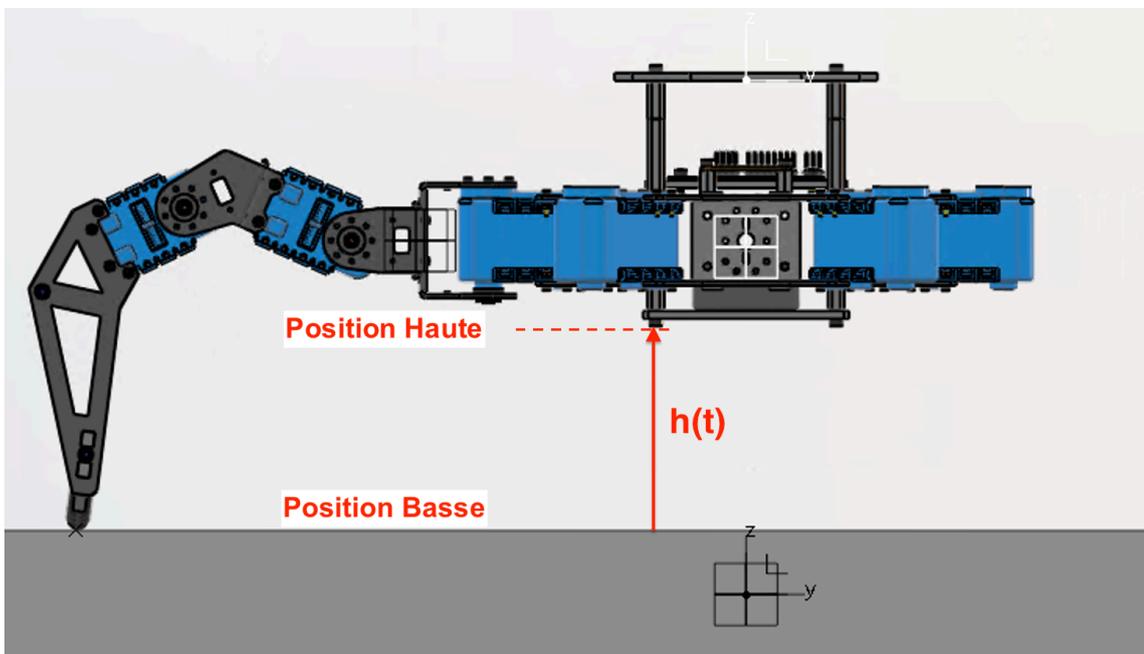
Lorsque le drone est activé, il doit passer de sa position basse (désactivé) à la position haute souhaitée.

Pour éviter de trainer la patte, on réalise la montée en deux phases :

1. Rapprochement du point d'appui

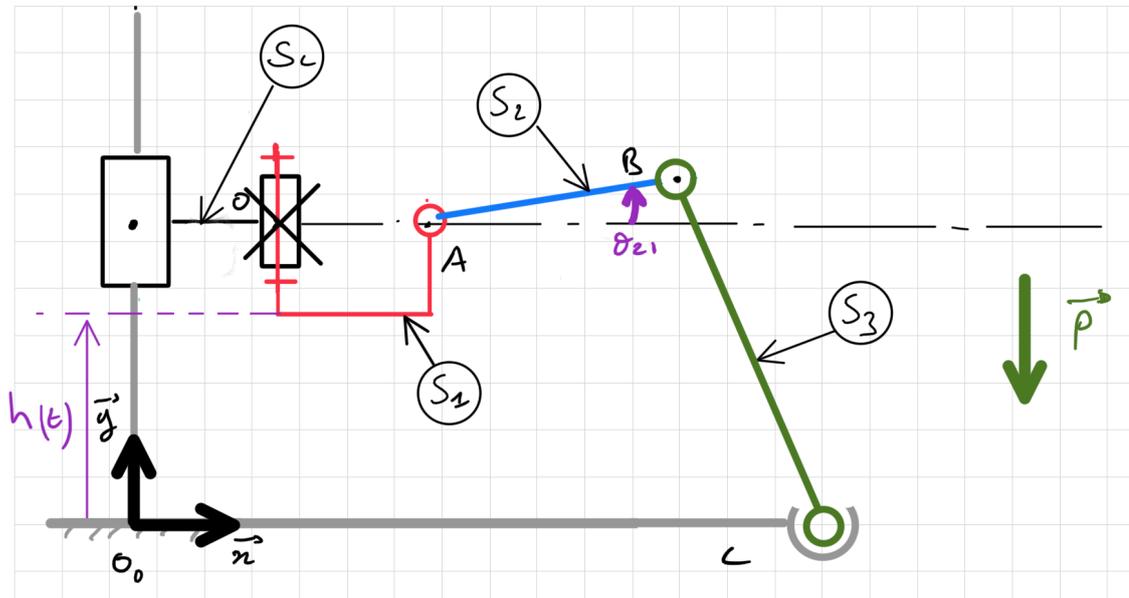


2. Montée à la hauteur $h(t)=H$



Modélisation mécanique choisie

Pour la phase de fonctionnement choisie, on modélise le mécanisme par le schéma cinématique suivant :



Avec les classes d'équivalences suivantes :

- S_c : {Chassis + S1}
- S_2 : {Fémur}
- S_3 : {Tibia}

Les paramètres de fonctionnement (variables observées) :

- $h(t)$: Positionnement selon y de la plate-forme
- θ_{21} : Angle de rotation du servomoteur M21

1.5. Etude de cas, drone araignée : documents ressources

1.5.1. Annexe : Modélisation du mécanisme

Mécanisme réel

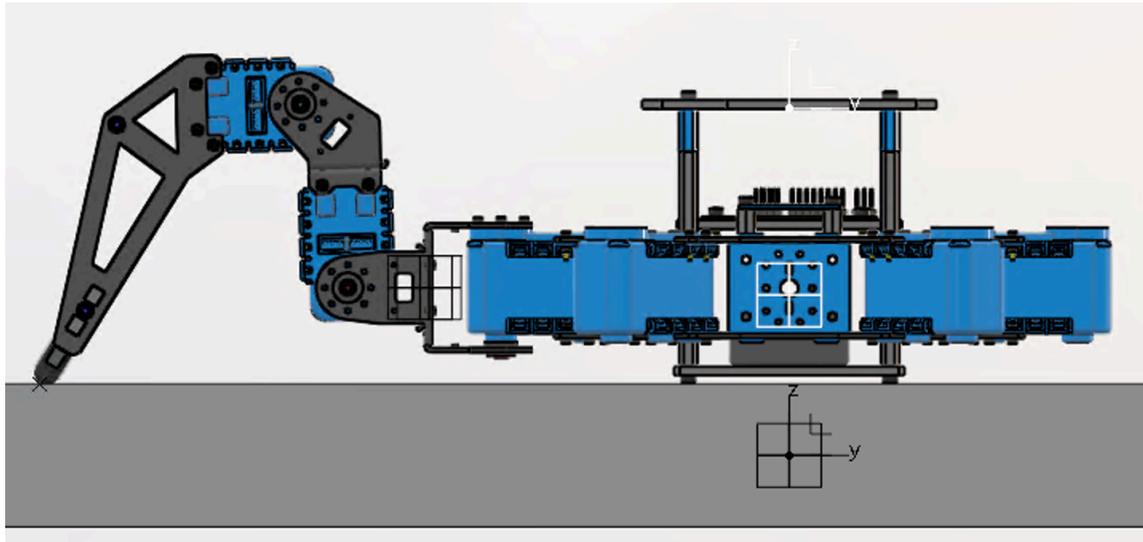
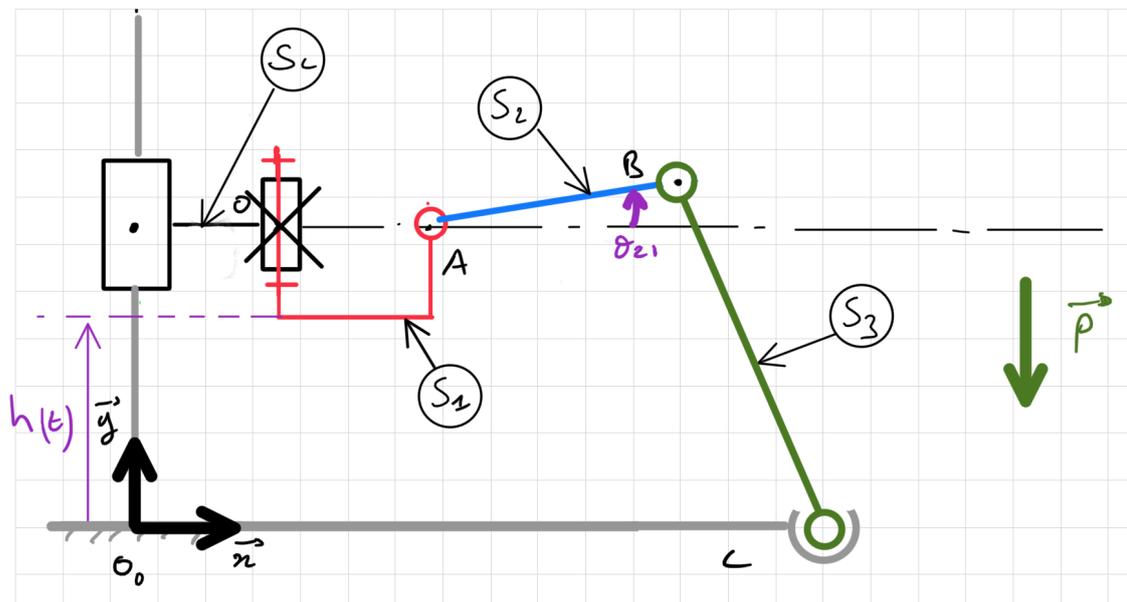
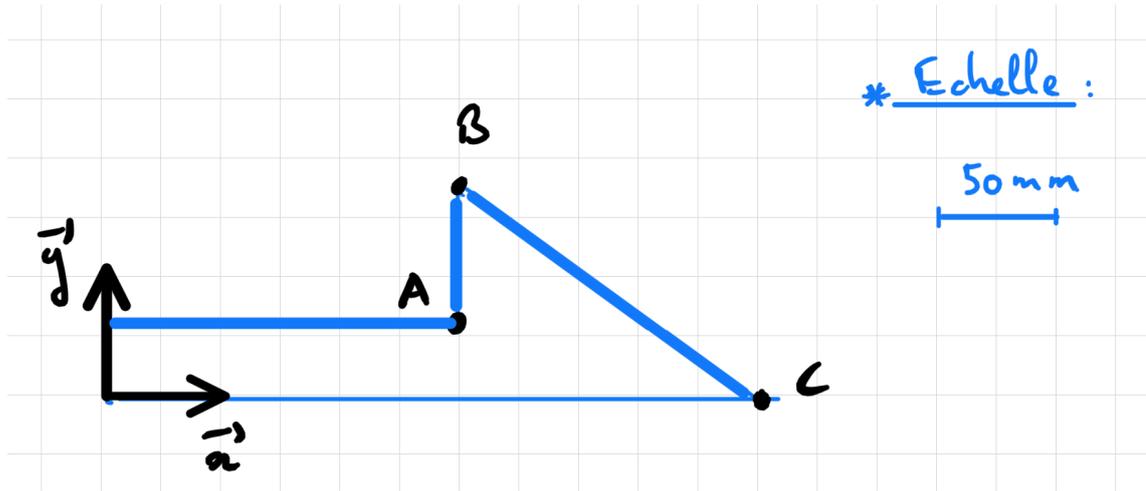


Schéma cinématique de la patte

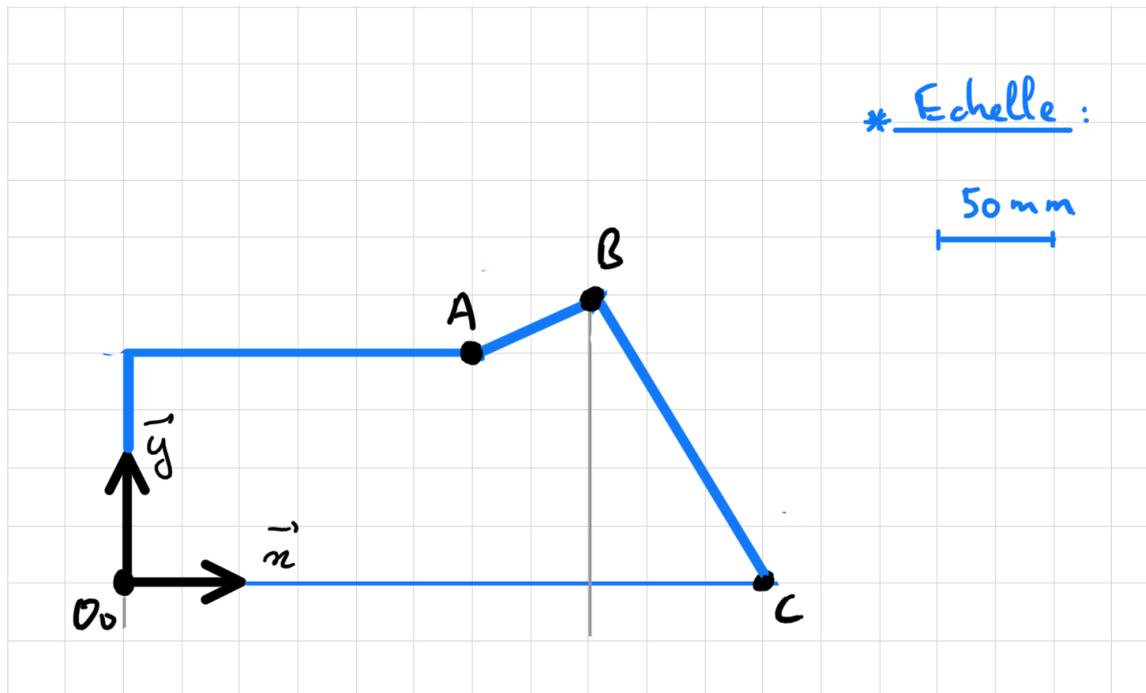


Construction géométrique à l'échelle

- Position initiale :

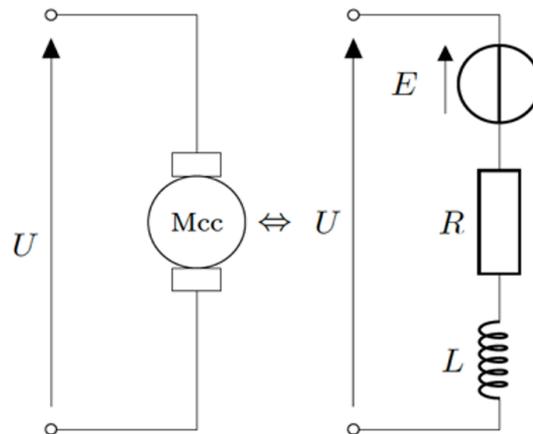


- Position intermédiaire :



1.5.2. Annexe : Modélisation du convertisseur

Schéma moteur courant continu



Equation électrique du servomoteur

$$U(t) = E(t) + RI(t) + L \frac{dI(t)}{dt}$$

Equations électromécaniques du servomoteur

$$\begin{aligned} E(t) &= K\Omega(t) \\ C(t) &= KI(t) \end{aligned}$$

Equation mécanique

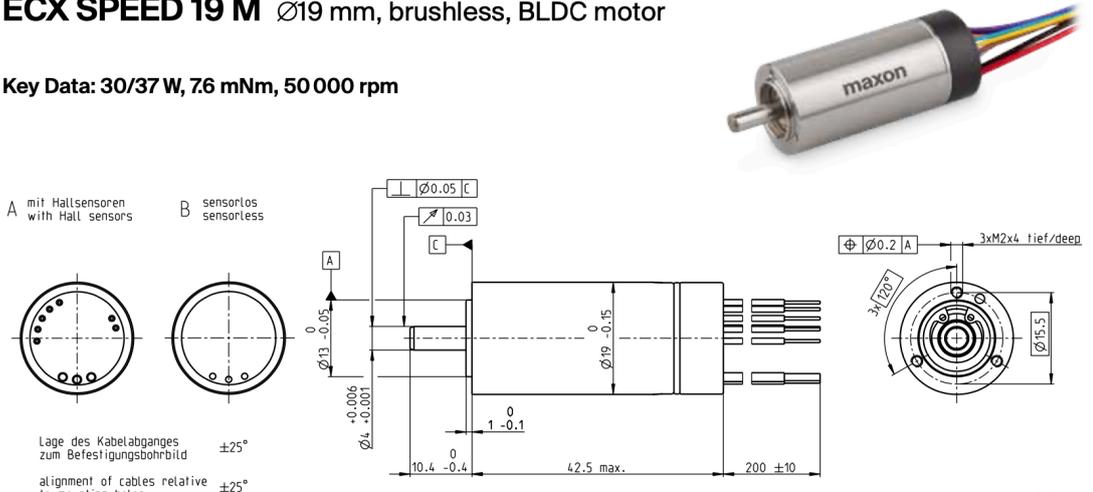
$$C(t) - C_r(t) - f\Omega(t) = J \frac{d\Omega(t)}{dt}$$

1.5.3. Annexe : Caractéristiques moteur

Caractéristiques du moteur choisi

ECX SPEED 19 M Ø19 mm, brushless, BLDC motor

Key Data: 30/37 W, 7.6 mNm, 50 000 rpm



The technical drawing shows two views of the motor: 'A mit Hallsensoren with Hall sensors' and 'B sensorlos sensorless'. It includes dimensions for the motor body, cable exit, and mounting holes. A detail of the mounting holes shows a diameter of Ø0.2 and a depth of 3xM2x4 tief/deep. The motor is shown with a maxon logo and a red FAUCON logo.

Motor Data

| | | 18 | 24 | 36 | 48 |
|--|------------------|--------|--------|-------|-------|
| 1. Nominal voltage | V | 18 | 24 | 36 | 48 |
| 2. No load speed | rpm | 45200 | 47100 | 49000 | 51000 |
| 3. No load current | mA | 250 | 250 | 250 | 250 |
| 4. Nominal speed | rpm | 41000 | 43600 | 41100 | 42900 |
| 5. Nominal torque (max. continuous torque) | mNm | 7.61 | 7.47 | 7.57 | 7.08 |
| 6. Nominal current (max. continuous current) | A | 2.23 | 1.74 | 1.11 | 0.82 |
| 7. Stall torque | mNm | 94.8 | 101 | 96.7 | 91.8 |
| 8. Stall current | A | 25.2 | 21.3 | 12.8 | 9.54 |
| 9. Max. efficiency | % | 82 | 82 | 82 | 81 |
| 10. Terminal resistance | Ω | 0.715 | 1.13 | 2.8 | 5.03 |
| 11. Terminal inductance | mH | 0.0548 | 0.0873 | 0.219 | 0.358 |
| 12. Torque constant | mNm/A | 3.76 | 4.75 | 7.53 | 9.62 |
| 13. Speed constant | rpm/V | 2540 | 2010 | 1270 | 992 |
| 14. Speed/torque gradient | rpm/mNm | 482 | 476 | 473 | 519 |
| 15. Mechanical time constant | ms | 5.81 | 5.74 | 5.69 | 6.25 |
| 16. Rotor inertia | gcm ² | 1.15 | 1.15 | 1.15 | 1.15 |

Catalogue moteurs

<https://www.maxongroup.fr/maxon/view/catalog>

1.6. Modélisation du mécanisme d'une patte du drone araignée

Temps estimé : 3h

Objectif technique de l'exercice

Valider les caractéristique du servo-moteur M21.

Mise en situation

Pour respecter les commandes de l'utilisateur, le drone araignée doit être capable de placer sa plateforme à une distance $h(t)$ précise du support par rapport auquel il évolue avec un temps de réponse t_r défini dans le cahier des charges.

Dans cette étude on considère uniquement la phase 2 (entre les positions 2 et 3) de la montée lorsque seul le servomoteur M21 fonctionne pour déplacer la plateforme en translation verticale le long de l'axe y .

Données

Extrait du cahier des charges :

- Hauteur de placement $h=5$ cm
- Temps de réaction $t_r=1$ s

Hypothèses

- Solides rigides indéformables
- Toutes les liaisons sont parfaites
- On néglige les phénomènes thermiques

Question n°1

Identifier les différents domaines à prendre en compte dans ce système

Question n°2

À partir du diagramme de blocs internes, tracer la chaîne d'énergie sur feuille, en plaçant les différents éléments constitutants et les énergies entrantes et sortantes.

Question n°3

En utilisant les équations fournies dans l'annexe : Modélisation du convertisseur, construire le schéma bloc du servomoteur (sur feuille). Veiller à faire apparaître les variables entrantes et sortantes de chaque bloc ainsi que leurs unités.

Question n°4

Construire le schéma bloc obtenu précédemment sur Dymola en utilisant les bibliothèques mathématiques (n'oublier pas de placer les variables et leur unités sur chaque lien).

Question n°5

Vérifier que le servomoteur fonctionne correctement, en lui entrant une consigne de position angulaire.

Question n°6

En utilisant le schéma cinématique paramétré de la patte et la bibliothèque de composant « MultiBody » de Modélica fourni dans l'annexe : Modélisation du mécanisme, construire le schéma mécanique sur Dymola.

Question n°7

En choisissant un signal approprié à la commande souhaitée, piloter le mécanisme avec une source idéale de mouvement (vitesse ou position) afin de respecter le temps de montée de la plateforme, ainsi que sa hauteur de positionnement vertical.

Question n°8

Après avoir connecté les deux schémas (mécanique, et servomoteur), choisir une consigne appropriée pour piloter l'ensemble.

Question n°9

Citer trois problématiques techniques majeures d'un tel système.

1.7. Ce qu'il faut retenir de cette activité

Les étapes importantes de la modélisation en schéma blocs :

- Identification des domaines concernés
- Paramétrage
- Mise en place des équations
- Création des blocs
- Assemblage des blocs
- Caractérisation des blocs
- Simulation
- Analyse des résultats

2. Etudes de cas : conception du système d'adhérence d'une patte du drone araignée

2.1. Introduction

Objectifs pédagogiques

L'étude de cas a pour objectif de **permettre au drone araignée d'adhérer à la surface sur laquelle il évolue.**

On cherche à :

- Construire le modèle
- Caractériser les composants du modèle
- Simuler
- Analyser les résultats

Déroutement Méthodologie de résolution

- Choisir les paramètres localisés
- Mise en équation du système
- Construire le schéma bloc à partir des équations
- Utiliser l'algèbre de blocs pour réduire le schéma bloc
- Identifier les paramètres

2.2. Présentation du système à étudier : le drone araignée

Cas d'étude : le drone araignée

Afin de mieux appréhender les connaissances transmises dans le cadre de ce module et de pouvoir appliquer les compétences acquises, un cas fil rouge a été imaginé. Il s'agit d'un drone araignée hexapode.

Pourquoi le drone araignée ?

La problématique de l'inspection ou de la maintenance de grandes structures ou de structures 3D complexes réside parfois dans la difficulté d'accès à certains espaces ou encore dans la dangerosité de certaines opérations. Pour faciliter ces inspections, une solution robotisée a été imaginée. Il s'agit d'un

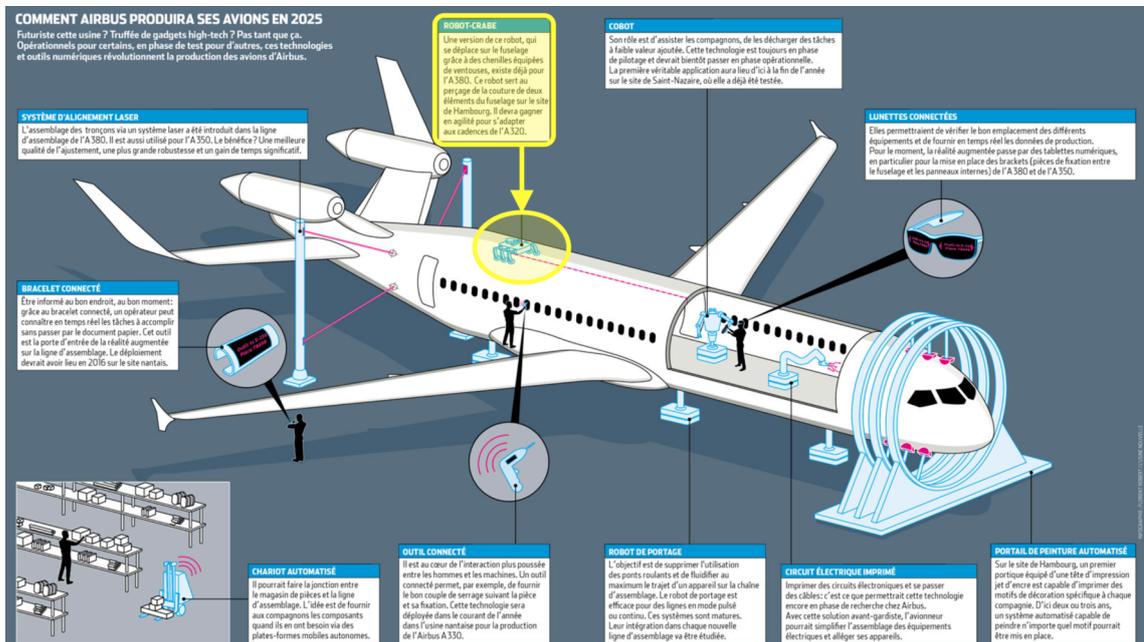
drone terrestre grimpant, baptisé « Light Expert Examination Automated Arthropod » - LEEAA. Pour ce faire, une analyse fonctionnelle « traditionnelle » a été réalisée et un premier prototype a été conçu. Il s'agit d'un robot araignée hexapode.



Structure de base du drone araignée

L'objectif de ce drone est de faciliter les inspections et la maintenance de structures telles que des carlingues d'avion ou buildings vitrés.

Une potentielle utilisation du drone araignée est illustrée sur la figure ci-dessous.



Projet d'usine du futur : comment Airbus produira ses avions en 2025

Réglementaire

L'ensemble des travaux s'inspirent, reprennent ou s'appuient sur des réalisations d'étudiants impliqués dans différentes formations :

- aux Arts et Métiers, campus d'Aix en Provence, Mastère Spécialisé® « Créateur de solutions drones : usages innovants et technologies »
- à l'INSA de Lyon, département Génie Mécanique
- à l'IUT de Mantes
- à l'Université de Technologie de Compiègne, département Ingénierie Mécanique
 - module TN29 - « Outils de définition et de développement de systèmes »
 - module TX - « Travaux Expérimentaux »

Un grand merci pour leur implication !

Domaines d'études

L'étude du comportement du drone araignée nécessite de comprendre différents domaines physiques :

- électrique : commande des servomoteurs ;
- mécanique des fluides : pompe à vide ;
- mécanique : mouvements des pattes.

Les cas d'utilisation

Ce diagramme représente les actions effectuées par le drone lors d'un déplacement dans son environnement et les interactions qu'il a avec les acteurs extérieurs durant ce déplacement.

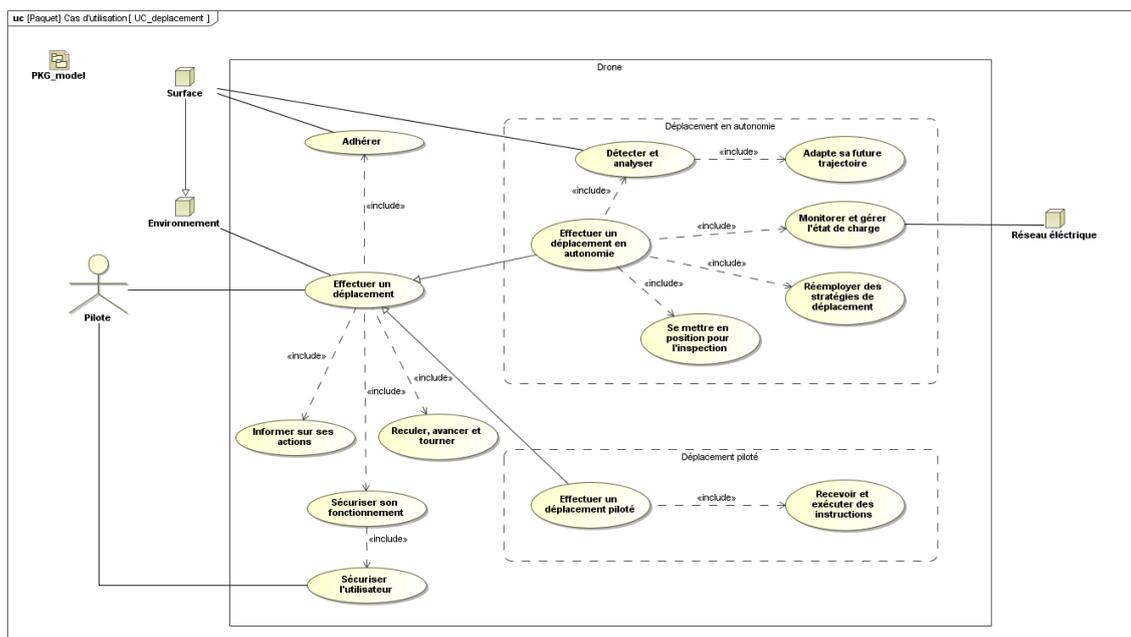


Diagramme de cas d'utilisation de la fonction déplacement du drone araignée, réalisé sous Cameo Systems Modeler

Contexte organique

Le drone interagit avec son environnement.

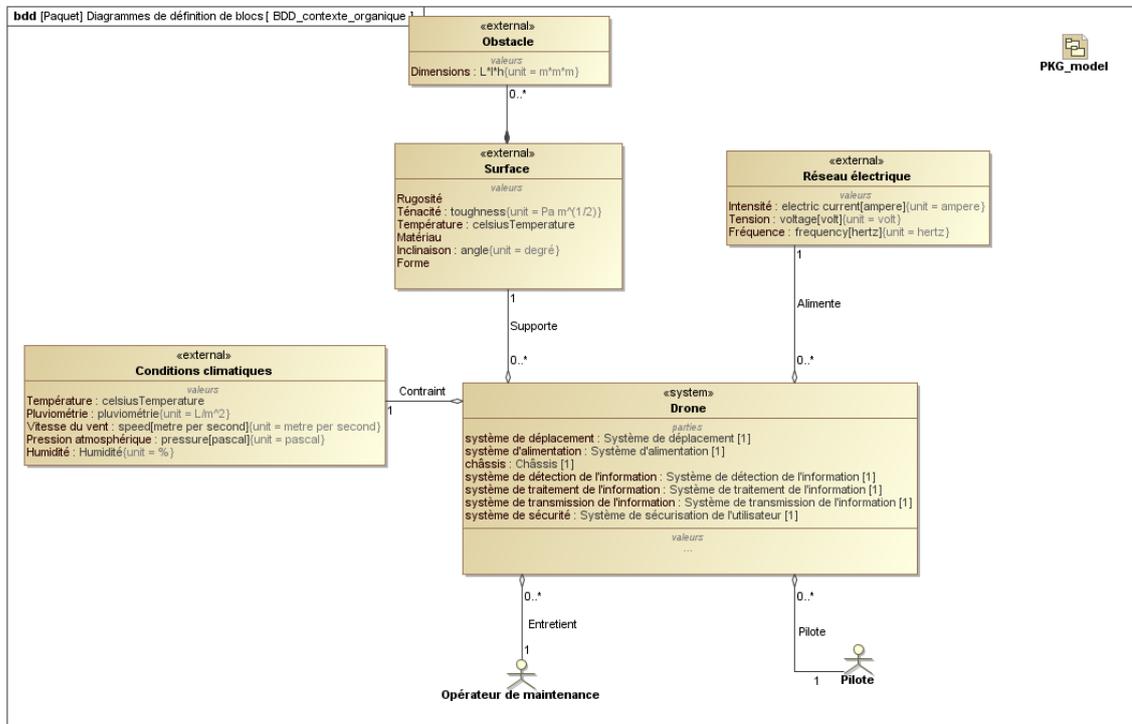
Ce dernier est composé :

- De la surface sur laquelle le drone se déplace, qui peut être composée d'obstacles ;

- D'un réseau électrique qui sert à alimenter la station de recharge du drone et par extension le drone lui-même ;
- De conditions climatiques qui viennent contraindre le drone dans son fonctionnement.

Le drone interagit également avec des acteurs.

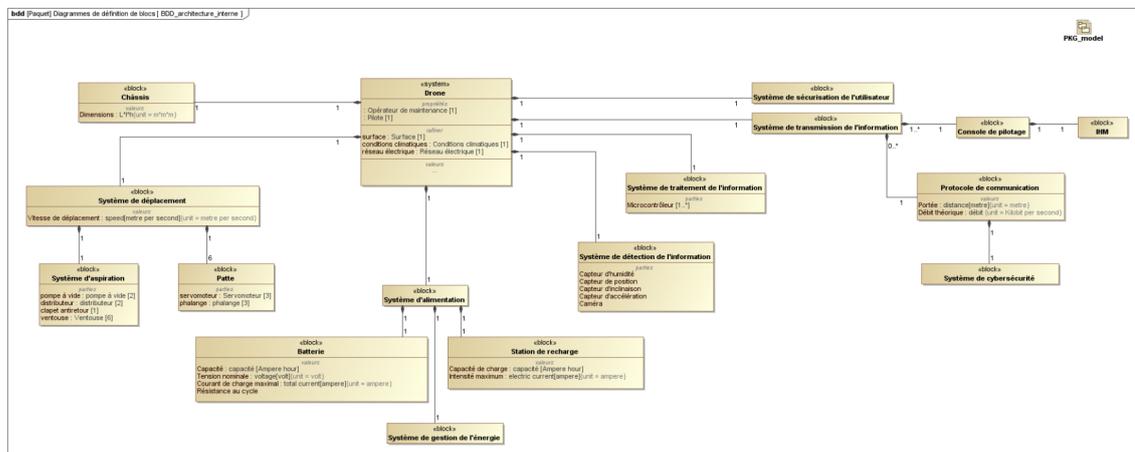
Il y a le pilote qui pilote un ou plusieurs drones et l'opérateur de maintenance qui entretient un ou plusieurs drones.



Contexte organique du drone araignée, réalisé avec Cameo Systems Modeler

Architecture interne du système

Ce diagramme de définition de blocs représente l'ensemble des systèmes contributeurs au système drone. Ainsi, ce dernier est composé d'un châssis, d'un système de déplacement, d'un système d'alimentation, d'un système de détection de l'information, d'un système de traitement de l'information, d'un système de transmission de l'information et d'un système de sécurisation de l'information. Ces systèmes contributeurs peuvent eux-mêmes être décomposés en sous-systèmes.



Architecture interne du drone araignée, réalisé avec Cameo Systems Modeler

Les exigences du cahier des charges

Pour tout type de déplacement le drone doit adhérer à une surface, reculer, avancer et tourner, informer sur ses actions et sécuriser son fonctionnement.

Lorsqu'il se déplace en autonomie, le drone doit être en mesure de détecter et analyser son environnement afin d'y adapter sa trajectoire. Il doit être capable de monitorer son état de charge et de retourner à la station de recharge avant de manquer de batterie. Il doit également mémoriser les stratégies de déplacement qu'il a utilisées pour les réutiliser dans un déplacement futur. Enfin, il doit être capable de se mettre en position pour l'inspection une fois arrivé à sa destination.

2.3. Présentation de la fonction du système d'adhérence du drone araignée

Fonction étudiée

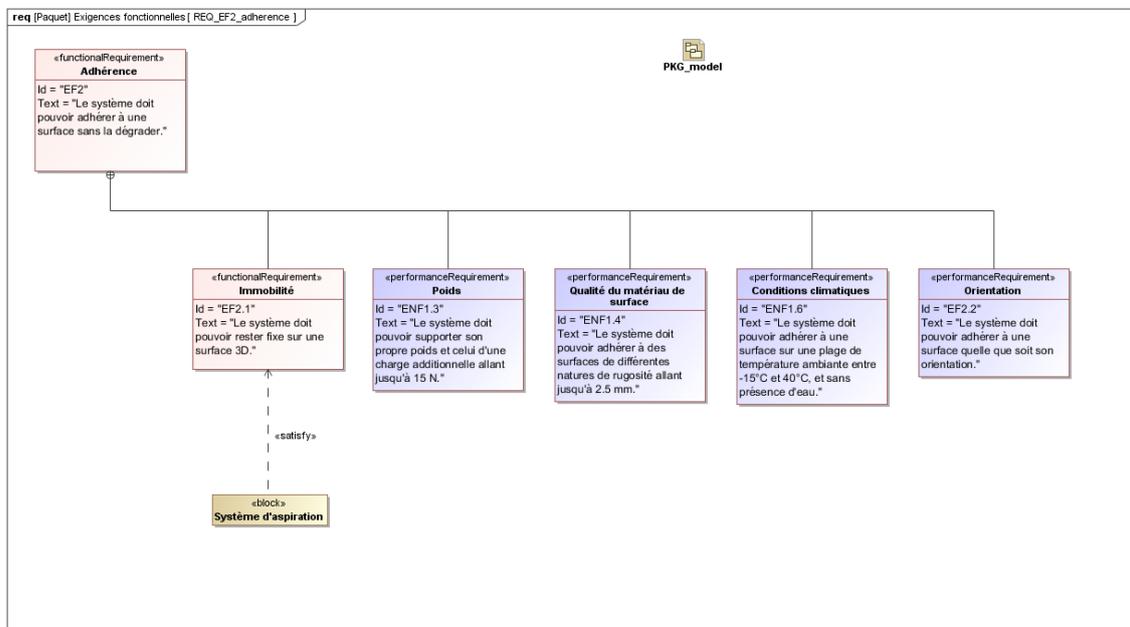


Diagramme d'exigences de l'exigence fonctionnelle d'adhérence du drone araignée, réalisé sous Cameo Systems Modeler

Diagramme de bloc interne de la fonction : SE DEPLACER

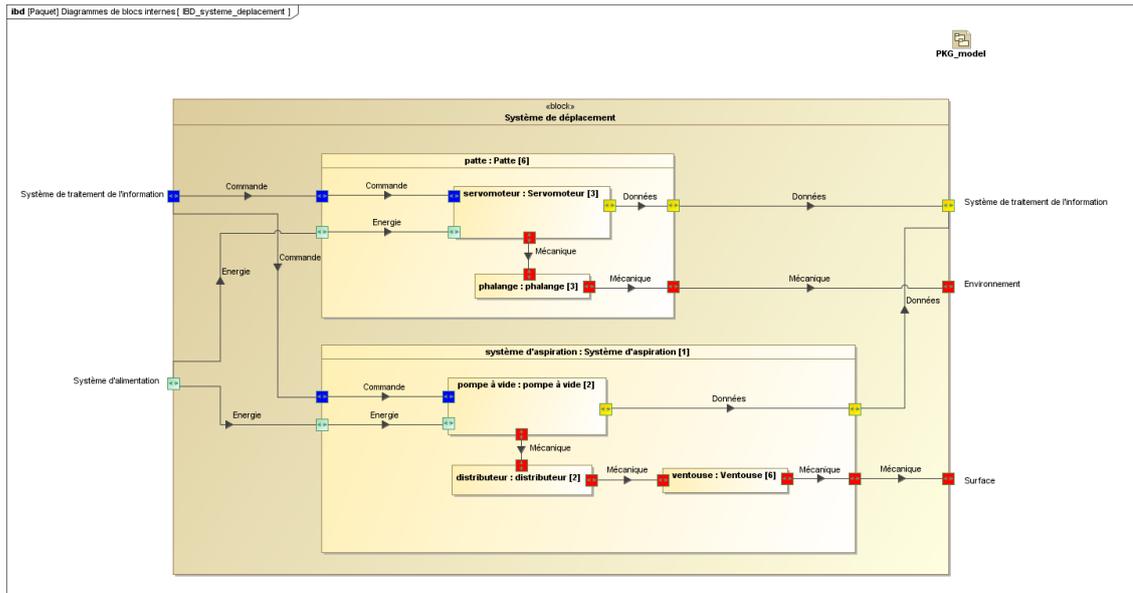


Diagramme de blocs internes du système de déplacement réalisé sous Cameo Systems Modeler

Architecture fonctionnelle du système global

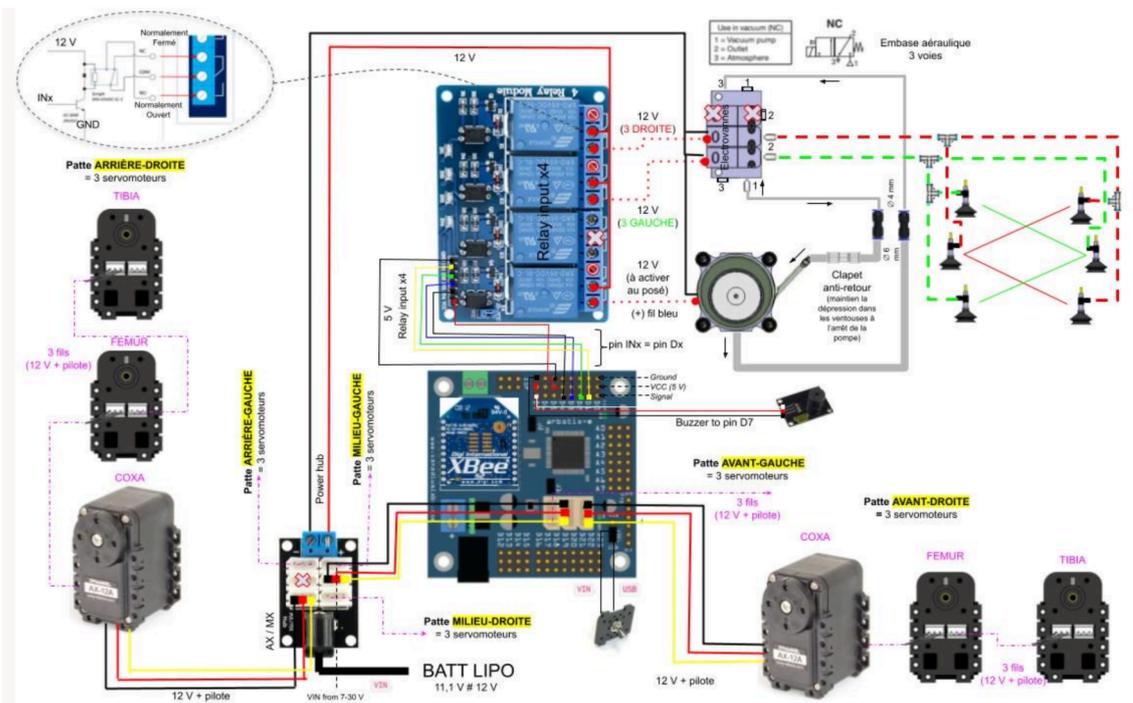
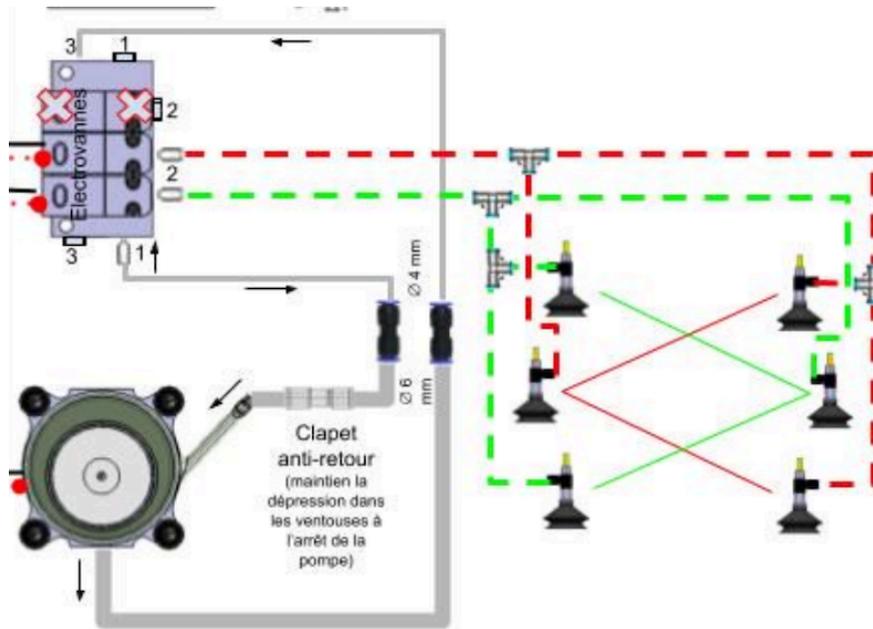


Schéma fonctionnel global du drone araignée avec système pneumatique

Chaine fonctionnelle du système d'adhérence

Description du fonctionnement et légende :



2.4. Modélisation du système d'adhérence sous forme de schéma blocs, partie 1

Temps estimé : 3h

Objectif technique de l'exercice

L'objectif est de déterminer les caractéristiques des composants de la chaîne d'énergie permettant d'assurer l'adhérence du drone araignée sur son support dans n'importe quelle position.

Mise en situation

Pour respecter le cahier des charges, le drone araignée doit être capable de se maintenir à l'équilibre dans n'importe quelle position sur des surfaces planes de matériaux bien définis orienté dans n'importe quelle direction.

Données

Extrait du cahier des charges :

- Type de matériaux : ?
- Orientation du support : ?
- Charge embarquée : $M_e = \dots$
- Charge du drone à vide : $M = \dots$

Hypothèses

- Solides rigides indéformables
- Liaisons parfaites



Question n°1

Identifier les différents types d'éléments utilisés.

Question n°2

Identifier les variables d'effort et de flux pour chaque composant en précisant les unités utilisées.

Question n°3

Ecrire les équations permettant de lier les paramètres entrants et sortants de la ventouse.

Question n°4

Ecrire les équations permettant de lier les paramètres entrants et sortants de la pompe.

Question n°5

Ecrire les équations permettant de lier les paramètres entrants et sortants du réducteur.

Question n°6

Ecrire les équations permettant de lier les paramètres entrants et sortants du moteur.

Question n°7

En déduire la représentation sous forme de blocs de chaque composant.

Question n°8

Relier chaque bloc pour former le schéma bloc du système complet.

Question n°9

Construire ce système sur Dymola, en utilisant uniquement la bibliothèque de blocs.

Question n°10

Choisir le signal d'entrée.

Question n°11

Compléter les paramètres localisés de chaque bloc.

Question n°12

Simuler le fonctionnement après avoir choisi et les conditions de simulation appropriées.

Question n°13

Vérifier la simulation avec les mesures prises sur un banc de test.

Question n°14

La maquette multi-physique est-elle fidèle à la réalité ?

2.5. Modélisation du système d'adhérence sous forme de schéma blocs, partie 2

Temps estimé : 3h

Objectif technique de l'exercice

L'objectif est de déterminer les caractéristiques des composants de la chaîne d'énergie permettant d'assurer l'adhérence du drone araignée sur son support dans n'importe quelle position.

Mise en situation

Pour respecter le cahier des charges, le drone araignée doit être capable de se maintenir à l'équilibre dans n'importe quelle position sur des surfaces planes de matériaux bien définis orienté dans n'importe quelle direction.

Données

Extrait du cahier des charges :

- Type de matériaux : ?
- Orientation du support : ?
- Charge embarquée : $M_e = \dots$
- Charge du drone à vide : $M = \dots$

Hypothèses

- Solides rigides indéformables
- Liaisons parfaites

Question n°1

Compléter la chaîne d'énergie dédiée à la fonction adhérence pour une patte du document réponse DR1.

Question n°2

Identifier les variables d'effort et de flux pour chaque composant en précisant les unités utilisées.

Question n°3

Construire le modèle du moteur électrique à courant continu en utilisant les bibliothèques Modélica (utiliser le document ressource DT1).

Question n°4

Grâce aux caractéristiques du moteur nécessaire, compléter les paramètres des éléments composant votre modèle de moteur.

Question n°5

Choisir le modèle du réducteur mécanique en utilisant les bibliothèques Modélica (utiliser le document ressource DT2) Est-il vraiment nécessaire ? Et le paramétrer.

Question n°6

Choisir le modèle de la pompe à vide en utilisant les bibliothèques Modélica (utiliser le document ressource DT3). Et la paramétrer.

Question n°7

Choisir ou construire le modèle de ventouse en utilisant les bibliothèques Modélica (utiliser le document ressource DT4). Et la paramétrer.

Question n°8

Vérifier que chaque modèle précédemment construit fonctionne correctement, vous préciserez les performances attendues pour chaque bloc ainsi que les conditions initiales. Ne pas oublier les solveurs spécifiques à chaque bibliothèques.

Question n°9

Assembler chaque modèle afin de réaliser le modèle global, et vérifier le modèle ainsi construit fonctionne correctement, vous préciserez les performances attendues pour le système ainsi que les conditions initiales globales.

Question n°10

Vérifier la simulation avec les mesures prises sur un banc de test.

Question n°11

La maquette multi-physique est-elle fidèle à la réalité ?

2.6. Ce qu'il faut retenir de cette activité

Les étapes importantes de la modélisation en schéma blocs :

- Identification des domaines concernés
- Paramétrage
- Mise en place des équations
- Création des blocs
- Assemblage des blocs
- Choix des signaux d'entrée
- Comparer au réel