A logo with a bee and a gear

Description automatically generated

**PHS4700**

**Physique pour les applications multimédia**

PAGE COUVERTURE **OBLIGATOIRE** POUR TOUS LES DEVOIRS

**Numéro du groupe : 01**

**Numéro de l’équipe :**

**Numéro de devoir : 02**

|  |
| --- |
| Nom : Diop Prénom : Abdul Hamid Matricule : 2141605  Signature : |
| Nom : Berger Prénom : Javier Matricule : 2206989  Signature : |
| Nom : Ngandjui Tchuente Prénom : Ewald Jordan Matricule : 2029689  Signature : |
| Nom : Jourba Prénom : Alexandra Matricule : 2413451  A black line drawing of a plane  Description automatically generated  Signature : |

Sommaire

[Introduction 3](#_Toc178715738)

[Étapes de résolution 4](#_Toc178715739)

[1. Position du centre de masse du système complet dans son propre référentiel : 4](#_Toc178715740)

[Centre de masse de la navette seule dans le référentiel du système complet 4](#_Toc178715741)

[Centre de masse des propulseurs d’appoint seuls dans le référentiel du système navette + lanceur 5](#_Toc178715742)

[Centre de masse du réservoir seul dans le référentiel du système complet 7](#_Toc178715743)

[Calcul de la position du centre de masse du système complet dans son propre référentiel 8](#_Toc178715744)

[2. Position du centre de masse dans le référentiel du laboratoire 8](#_Toc178715745)

[3. Matrice d’inertie dans le référentiel du système 8](#_Toc178715746)

[Matrice d’inertie de la navette seule 9](#_Toc178715747)

[Matrice d’inertie des propulseurs seuls 10](#_Toc178715748)

[Matrice d’inertie du réservoir seul 10](#_Toc178715749)

[Matrice d’inertie du système complet 10](#_Toc178715750)

[4. Matrice d’inertie dans le référentiel du laboratoire 11](#_Toc178715751)

[5. Accélération angulaire 11](#_Toc178715752)

[Analyse des résultats 13](#_Toc178715753)

[Conclusions 14](#_Toc178715754)

# Introduction

Ce rapport vise à étudier la trajectoire d’une balle de ping-pong soumise à différentes forces physiques.

Lors d’un match de ping-pong, la balle est influencée par plusieurs forces telles que la gravité, la résistance de l’air (frottement visqueux) et la force de Magnus, qui s’applique sur une balle en rotation. Ces forces modifient sa trajectoire et son comportement en vol. L’objectif de cette simulation est de modéliser la trajectoire de la balle et d’analyser comment elle se comporte en fonction des conditions initiales et des forces appliquées.

Pour ce faire, nous avons conçu une fonction sous Matlab permettant de simuler la trajectoire de la balle. La fonction tient compte de différents phénomènes physiques et détermine si la balle touche la table, le filet, ou sort des limites du jeu. Trois scénarios de simulation sont envisagés :

* **Option 1** : La balle est soumise uniquement à la gravité.
* **Option 2** : La balle subit à la fois la gravité et une force de frottement visqueux.
* **Option 3** : En plus de la gravité et du frottement visqueux, la force de Magnus, due à la rotation de la balle, est prise en compte.

Chacun de ces scénarios est testé avec différentes conditions initiales, telles que la position, la vitesse et la vitesse angulaire de la balle. La simulation s'arrête dès que la balle touche la table, le filet ou le sol. La trajectoire de la balle est calculée à partir des équations du mouvement, et les résultats obtenus permettent de visualiser le chemin parcouru par la balle et d’évaluer si le coup est réussi ou non.

La fonction Matlab développée pour cette simulation est appelée de la manière suivante :

|  |
| --- |
| [coup, vbf, ti, x, y, z] = Devoir2(option, rbi, vbi, wbi) |

Les paramètres d’entrée de la fonction sont les suivants :

* **option** : Un entier qui détermine le type de simulation :
* 1 pour une simulation avec seulement la gravité.
* 2 pour une simulation avec la gravité et la résistance de l’air.
* 3 pour inclure la gravité, la résistance de l’air et la force de Magnus.
* **rbi** : Un vecteur contenant les coordonnées initiales de la position du centre de masse de la balle en mètres.
* **vbi** : Un vecteur représentant la vitesse initiale de la balle en m/s.
* **wbi** : Un vecteur indiquant la vitesse angulaire initiale de la balle autour de son centre de masse, exprimée en rad/s.

Les résultats retournés par la fonction sont :

* **coup** : Un entier indiquant l’issue de la simulation :
* 0 si le coup est réussi et que la balle atterrit du côté opposé.
* 1 si la balle touche la table du côté du joueur, indiquant un coup raté.
* 2 si la balle frappe le filet.
* 3 si la balle sort du jeu et touche le sol.
* **vbf** : Un vecteur indiquant la vitesse finale de la balle en m/s.
* **ti** : Un vecteur contenant les instants de temps correspondant aux différentes positions de la balle pendant la simulation.
* **x, y, z** : Des vecteurs contenant les coordonnées de la balle pour chaque instant enregistré.

Ce rapport présentera les résultats obtenus pour plusieurs simulations, avec des graphiques illustrant les trajectoires et des tableaux résumant les données clés pour chaque essai.

# Étapes de résolution

## Position du centre de masse du système complet dans son propre référentiel :

La position du centre de masse du système [ navette + lanceur ] dans son propre référentiel est donnée par la relation :

Avec :

Une image contenant dessin, illustration

Description générée automatiquement

Où **i** identifie les différentes composantes du système : la navette, et pour le lanceur les propulseurs gauche, droit ainsi que le réservoir. Pour alléger les notations, on notera les vecteurs de centre de masses des différentes composantes simplement dans toute cette partie, vu qu’on fait dans un premier temps tous les calculs dans le référentiel du système.

Les masses de chacune des composantes du système sont connues, cependant leurs centres de masse ne sont pas connus. Chaque composante ayant une forme constituée d’un cylindre superposé avec un cône, elles ont un centre de masse individuel qui peut être trouvé en calculant séparément le centre de masse de ce cône et de ce cylindre, puis en faisant leur moyenne pondérée.

### Centre de masse de la navette seule dans le référentiel du système complet

Comme expliqué dans le paragraphe précédent, et comme on peut le voir dans le fichier Matlab, la navette est composée d’un cylindre et d’un cône dont les données sont les suivantes :

Sachant que la masse volumique est uniforme, la prochaine étape consiste à trouver le volume des composantes de la navette pour en déduire leurs masses.

]

Avec ces informations, la masse du cylindre et du cône est calculable séparément.

Une fois ceci obtenu, le centre de masse de la navette peut être calculé. Le centre de masse d'un cylindre homogène (solide ou creux) est situé au milieu de sa hauteur, soit à une distance **h cylindre /2** du centre de la base, où **h cylindre**est la hauteur du cylindre. Quant au centre de masse d'un cône droit homogène, il est situé à une distance de **h cône /4** du centre de sa base, où **h cône** est la hauteur du cône. Ainsi les vecteur positions des centres de masse des deux solides composantes de la navette sont les suivants :

Le centre de masse total de la navette s’obtient avec la formule suivante :

### Centre de masse des propulseurs d’appoint seuls dans le référentiel du système navette + lanceur

Une image contenant dessin, illustration

Description générée automatiquementLes mêmes étapes de résolution utilisées pour la navette seront reprises pour les propulseurs d’appoint en les adaptant aux nouvelles données, dont notamment une translation car le centre de la base des propulseurs d’appoint ne se trouve pas à l’origine comme celui de la navette. Voici les données du problème :

Sachant que la masse volumique est uniforme, la prochaine étape consiste à trouver le volume des composantes de la navette pour en déduire leurs masses.

Avec ces informations, la masse du cylindre et du cône est calculable.

Une fois ceci obtenu, les vecteur positions des centres de masse des deux solides composantes des propulseurs sont calculables.

Pour le propulseur droit, les données sont les suivantes :

Le centre de masse total du propulseur droit s’obtient avec la formule suivante :

***La même démarche s’applique pour le propulseur gauche, en veillant bien à changer la valeur du décalage selon l’axe X ( ).***

### Centre de masse du réservoir seul dans le référentiel du système complet

Pour le réservoir, étant donné que la masse volumique n’est pas uniforme partout, le calcul du centre de masse diffèrera de quelques étapes par rapport à celui de la navette et des propulseurs.

Voici les données initiales connues :

Cylindre rempli de Dihydrogène

Cylindre rempli d’oxygène

*(la masse des parois est négligée)*

A partir de ces informations, le réservoir peut être décomposé en 3 composantes dont les volumes et ensuite les masses peuvent être déduit afin de trouver leur centre de masse de chacun avec les formules ci-dessous. En ce qui concerne les masses, on a uniquement besoin de calculer les masses séparées d’oxygène contenues dans le cône et le cylindre, vu qu’on a accès qu’à la masse totale d’oxygène.

Finalement pour trouver le centre de masse total du réservoir, la formule suivante s’applique :

### Calcul de la position du centre de masse du système complet dans son propre référentiel

## Position du centre de masse dans le référentiel du laboratoire

Pour passer au référentiel du laboratoire, il faut prendre en compte deux données d’entrée :

* la rotation du référentiel local du système [ navette + lanceur ] autour de l’axe X, par rapport à celui du laboratoire ; les rotations autour des autres axes ne sont pas prises en compte.
* la translation de l’origine du référentiel du système dans le référentiel du laboratoire.

Cela se traduit par la formule suivante, qui de fait est une formule de passage des coordonnées du système à celles du laboratoire :

Où est la matrice de rotation d’angle , donnée par :

## Matrice d’inertie dans le référentiel du système

On décompose la matrice d’inertie du système complet par rapport à son centre de masse comme suit :

Dans toute la suite de cette partie, on calculera les matrices d’inerties des cônes et cylindres verticaux constituant les différentes composantes du système par rapport à leurs centres de masses propres, à l’aide de la formule pour un cône plein donnée par l’énoncé et de la formule suivante pour le cylindre plein :

Une fois cela fait, on déplacera les matrices obtenues au centre de masse global des composantes grâce au théorème de Huygens généralisé appliqué à un solide quelconque de masse m :

Avec le vecteur de translation entre un point P quelconque et le centre de masse du solide considéré (avec O l’origine du référentiel commun), et la matrice définie par :

Pour les vecteurs de translations, on se placera systématiquement dans le référentiel local du système [ navette + lanceur ] dans cette sous partie.

### Matrice d’inertie de la navette seule

Comme vu précédemment, la navette peut se décomposer en deux parties, une coiffe conique et un cylindre plein. On calcule ainsi :

* avec calculée précédemment, et
* avec calculée précédemment, et

Puis on obtient la matrice d’inertie de la navette par rapport à son centre de masse en déplaçant ces deux matrices en ce point :

Avec les vecteurs de translations suivants :

### Matrice d’inertie des propulseurs seuls

Les propulseurs se décomposent de manière similaire, et leurs matrices d’inerties dans leurs référentiels propres sont identiques. On calcule ainsi :

* avec calculée précédemment, et
* avec calculée précédemment, et

Puis on déplace les matrices d’inertie pour le propulseur droit :

Avec les vecteurs de translation :

La démarche est similaire pour obtenir , en changeant les vecteurs de translation de manière adéquate pour déplacer les matrices d’inerties au centre de masse du propulseur gauche .

### Matrice d’inertie du réservoir seul

On décompose cette fois le composant en trois parties pour tenir compte de la masse volumique non-homogène du cylindre, et on calcule :

* avec calculée précédemment, et
* avec calculée précédemment, et
* avec , et

On obtient ainsi la matrice d’inertie du réservoir complet par rapport à son centre de masse  :

Avec les vecteurs de translation :

### Matrice d’inertie du système complet

On translate simplement les matrices d’inerties , et obtenues au centre de masse du système complet :

Avec les vecteurs de translation :

## Matrice d’inertie dans le référentiel du laboratoire

Pour refléter la rotation qui s’opère entre le repère local du système et le repère global du laboratoire, on applique la matrice de rotation définie auparavant :

## Accélération angulaire

L'accélération angulaire de la fusée est déterminée en utilisant cette équation :

I⋅α=M−ω×(I⋅ω)

où :

* I est la matrice d'inertie du système navette-lanceur par rapport à son centre de masse dans le référentiel du laboratoire, calculé précédemment.
* α est le vecteur accélération angulaire du système.
* M est le moment total appliqué sur le système.
* ω est le vecteur vitesse angulaire du système.

Pour résoudre l'équation ci-dessus et obtenir α, nous procédons comme suit :

α=I−1⋅(M−ω×(I⋅ω))

Tout d’abord il nous faut calculer le moment appliqué à la fusée.

**Détermination des positions des forces**

* Position de la force de la navette :

posForceNavette=posNL

* Position de la force des propulseurs :

Le propulseur gauche est décalé par rapport à la navette en x et y. Son positionnement est obtenu en appliquant une rotation (matrice Rx) et une translation au point de référence.

posForcePropulseurG=posNL+Rx​⋅​(−δx, ​δy,​ 0​​)

Donc pour le propulseur droit on a :

posForcePropulseurG=posNL+Rx​⋅​(δx, ​δy,​ 0​​)

où :

* + δx ​=rRéservoir​+rPropulseur
  + δy​=rNavette​+rRéservoir​

sont les décalages des propulseurs par rapport à l’origine.

**Détermination des directions des forces**

Les forces propulsives agissent le long de l'axe z de la fusée après rotation. Pour obtenir leur direction dans le référentiel du laboratoire, nous appliquons la matrice de rotation Rx​ au vecteur (0, 0, 1)T

directionForce=Rx​⋅​(0, 0, 1)T​​

Ainsi, nous pouvons calculer les vecteurs de forces :

* + FNavette​=FNavette​×directionForce
  + FPropulseurG​=FPropulseurG​×directionForce
  + FPropulseurD​=FPropulseurD​×directionForce

**Calcul du moment**

Le moment (torque) appliqué par chaque force est calculé en effectuant le produit vectoriel entre le bras de levier (distance entre le point d'application de la force et le centre de masse du système) et le vecteur force correspondant.

* MNavette​=(posForceNavette−pcmNL)×FNavette
* MPropulseurG​=(posForcePropulseurG−pcmNL)×FPropulseurG​
* MPropulseurD​=(posForcePropulseurD−pcmNL)×FPropulseurD​

**M=MNavette​+MPropulseurG​+MPropulseurD​**

Nous avons ainsi le Moment appliquée à la fusée et pouvonst utilisée la formule de l’accélération angulaire précedente :

**α=I−1⋅(M−ω×(I⋅ω))**

# Analyse des résultats

On traduit les indcations de l’énoncé en conditions initiales pour les deux cas :

* cas 1 : rad

rad/s

= = 8.75 MN, = 11 MN

m

* cas 2 : rad

rad/s

= = 8.75 MN, = 11 MN

m

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **cas** | **pcmNL (m)** | **INL (kg.m2)** | **alphaNL (rad/s2)** |
| 1 |  |  |  |
| 2 |  |  |  |

Dans le cas 1, les forces de propulsion exercées par la navette et les deux propulseurs d'appoint sont symétriques par rapport à l’axe x mais pas par rapport à l’axe y, et dirigées le long de l'axe z. Il est à noter que le système navette + lanceur présente une symétrie le long de l’axe des x mais pas de celui des y ni des z, ce qui est traduit par la forme de la matrice d’inertie qui n’est pas diagonale.

On remarque que l’accélération angulaire obtenue est non-nulle autour de l’axe X, alors qu’il n’y a pas d’angle de rotation initial : cela s’explique par le fait que la coordonnée du barycentre de tous les points d’application des forces et celle du centre de masse du système ne sont pas confondues le long de l’axe y, le moment résultant en x est donc non nul, et la navette tourne autour de l’axe des x.

Une image contenant dessin, illustration

Description générée automatiquement

Centre de masse du système complet

Isobarycentre des points d’application des forces

Dans le cas 2, l'extinction du propulseur d'appoint droit crée une asymétrie dans la distribution des forces, ce qui est traduit par une forte augmentation en valeur absolue des termes non-diagonaux dans la matrice d’inertie du système.

Le barycentre des points d’application des forces n’est plus appliqué en x = 0 dans le référentiel du système, ce qui génère des moments non nuls supplémentaire. Cette situation conduit notamment à une accélération angulaire supplémentaire du système navette-lanceur autour des axes y et z. Cependant, la contribution à cette accélération due à la variation du moment d'inertie dans le temps reste peu significative en raison de la faible valeur de la vitesse angulaire initiale.

# Conclusions

Le comportement angulaire de la navette est fortement influencé par la relation entre la position de son centre de gravité et le barycentre des forces appliquées. Il est cependant à noter que beaucoup d’hypothèses simplificatrices ont été faites : pas de prise en compte de la gravité, pas de prise en compte de la perte de masse due à la poussée.