

# Interface Haptique

---

## Compte Rendu du TP Falcon

---



**Ali El Ghouli**

Identifiant étudiant : 28717628

Master 2 Systèmes Avancés et Robotiques

**Janvier 2025**

# Sommaire

<b>I. Introduction</b>	<b>2</b>
<b>II. Première Partie : découverte du Novint Falcon</b>	<b>2</b>
1. Estimation de la masse et de l'amortissement apparent . . . . .	3
1..1 Axe X . . . . .	4
1..2 Axe Y . . . . .	4
1..3 Axe Z . . . . .	5
1..4 Analyse . . . . .	5
2. Mur virtuelle . . . . .	5
2..1 Modulation de la distance . . . . .	5
2..2 Resultas . . . . .	6
2..3 Discussion . . . . .	9
3. Cube virtuel . . . . .	9
3..1 Tronçage des Forces . . . . .	9
3..2 Résultats . . . . .	10
3..3 Visualisation étendue des forces . . . . .	10
3..4 Améliorations possibles . . . . .	11
4. Sphère virtuelle . . . . .	12
5. Glissière à clic virtuel . . . . .	15
6. Mur virtuel texturisé . . . . .	15
<b>III Seconde Partie : Couplage à un simulateur physique</b>	<b>17</b>
<b>IV. Conclusion</b>	<b>18</b>
<b>V. Auto-évaluation</b>	<b>18</b>

## I. Introduction

L'une des branches de l'haptique est la proprioception, qui inclut la kinesthésie. Cette dernière permet de ressentir des propriétés telles que le poids, la rigidité et l'inertie des objets, ces sensations étant influencées par leur masse. Ces perceptions, souvent associées à des fréquences basses, évoluent peu dans le temps. À cela s'ajoute le tactile, qui permet de percevoir la texture uniquement à travers la peau.

La combinaison de ces deux types de sensations fournit une information riche et complète sur l'objet manipulé. Cependant, il est relativement facile de tromper les sens de la vue ou de l'ouïe, tandis que le toucher est beaucoup plus difficile à simuler. En effet, la peau est bien plus sensible que les yeux en termes de précision. Contrairement aux yeux et aux oreilles, qui sont des capteurs localisés, la peau couvre une grande surface du corps, ce qui rend sa stimulation plus complexe. Pour tromper le toucher, il est nécessaire d'utiliser des techniques comme les vibrations ou la génération de forces.

Pour offrir une sensation transparente, un système haptique doit répondre à des exigences strictes. Il est nécessaire que le système complet, du maître (interface haptique) à l'esclave (objet simulé), soit conçu de manière à minimiser la masse apparente et à maximiser la raideur apparente. Concrètement :

1. Masse apparente = 0
2. Raideur apparente = infinie

Une interface haptique transparente nécessite donc une mécanique parfaite, c'est-à-dire des éléments rigides et très légers. Si cela n'est pas possible, il est envisageable de compenser ces limitations par le contrôle, en réduisant la masse apparente et en augmentant la rigidité. Les robots parallèles sont particulièrement adaptés à cette tâche en raison de leur rigidité élevée, qui leur permet de générer des forces importantes dans des délais très courts.

Le contrôleur haptique reçoit en entrée la force désirée et, à l'aide d'un microcontrôleur, calcule le modèle dynamique inverse pour générer en sortie les forces ou couples articulaires appropriés. Cela impose des contraintes électroniques, notamment un temps de réponse minimal de l'ordre de 1 kHz. Cela implique également l'utilisation de moteurs capables de générer des forces instantanément.

Cependant, le schéma de commande peut provoquer des instabilités, telles que des vibrations. Si la démonstration de la stabilité reste difficile, il est souvent plus simple de prouver la passivité du système.

Dans cette étude, nous chercherons à simuler le toucher d'objets à l'aide d'une interface haptique. Dans un premier temps, nous allons créer ou simuler des objets fixes dans l'espace (ex. : mur, cube, cylindre) en envoyant des commandes de force à l'interface haptique. Par la suite, nous tenterons de coupler l'interface haptique à un simulateur physique, afin d'augmenter le réalisme des interactions.

Tous les scripts développés peuvent être trouvés dans le dépôt Git au lien suivant : <https://github.com/P>

## II. Première Partie : découverte du Novint Falcon

Le Novint Falcon, lancé en 2007, est une interface haptique développée pour rendre les interactions avec des environnements virtuels plus réalistes. Conçu par la société Novint Technologies, il se distingue par sa capacité à générer des forces en trois dimensions.

Ses principales caractéristiques techniques incluent :

- Une force maximale générée de 20 N, offrant une précision suffisante pour simuler différents types de textures et de résistances.

- Une plage de travail tridimensionnelle de 10 cm x 10 cm x 10 cm, permettant des mouvements limités mais précis.
- Une fréquence d'échantillonnage pouvant atteindre 1 kHz, assurant une réactivité optimale pour des sensations tactiles fluides.
- Un design mécanique basé sur un robot parallèle, garantissant une rigidité structurelle élevée et une réduction des vibrations parasites.

Initialement conçu pour des applications dans les jeux vidéo, il est désormais utilisé dans des domaines tels que la recherche, la formation médicale et les simulations interactives.

## 1. Estimation de la masse et de l'amortissement apparent

La première étape de notre travail consiste à déterminer la masse apparente du système. Cette étape est essentielle pour caractériser le comportement dynamique de l'interface haptique et comprendre comment elle interagit avec l'utilisateur. La masse apparente reflète l'inertie perçue par l'utilisateur, ce qui influence directement la sensation de réalisme.

Pour ce faire, nous simulons un ressort idéal de longueur nulle et de raideur  $k = 500$  N/m. Les forces générées par ce ressort sont calculées à l'aide de la fonction suivante :

```
def ressort_simple(d, k):
    return -d * k
```

Ces forces sont appliquées sur les trois axes ( $x, y, z$ ) de l'interface haptique pour évaluer la réponse dynamique du système. Cette approche permet d'observer les variations des déplacements en fonction des échantillons.

Les résultats obtenus sont présentés dans la figure suivante, où l'on peut voir les déplacements mesurés sur les axes  $x, y$  et  $z$ , en fonction des échantillons temporels. Chaque graphique correspond à l'une des directions, ce qui permet de comparer les réponses du système sur les trois axes simultanément.

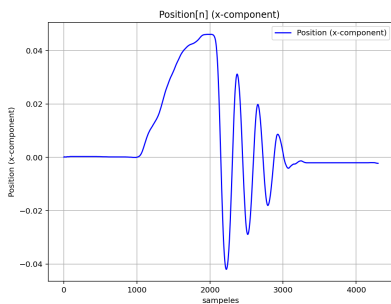


FIGURE 1 –  $x$  (m) en fonction des échantillons.

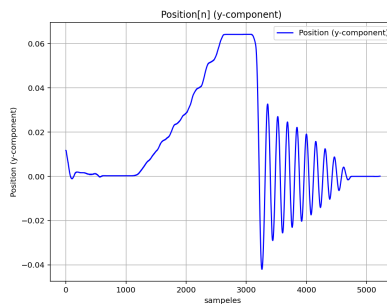


FIGURE 2 –  $y$  (m) en fonction des échantillons.

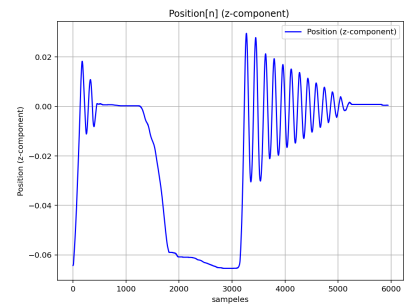


FIGURE 3 –  $z$  (m) en fonction des échantillons.

La fonction `char_calculator` permet de calculer la masse apparente et l'amortissement d'un système en utilisant les équations de l'oscillation libre amortie. Ces calculs reposent sur les relations suivantes :

- Fréquence naturelle :
- $\alpha$  :

$$\alpha = \frac{\ln(x_0/x_i)}{2\pi i}$$

$$\omega = \frac{2\pi F}{\sqrt{1 - \alpha^2}}$$

— Masse apparente :

$$m = \frac{\text{raideur}}{\omega^2}$$

— Amortissement :

$$c = \frac{2\alpha\omega}{m}$$

Ces équations sont utilisées pour déterminer les paramètres dynamiques du système oscillant sous amortissement.

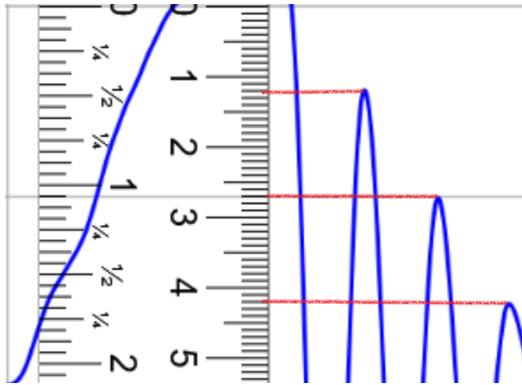


FIGURE 4 – Zoom(1) de  $x$  (m) en fonction des échantillons.

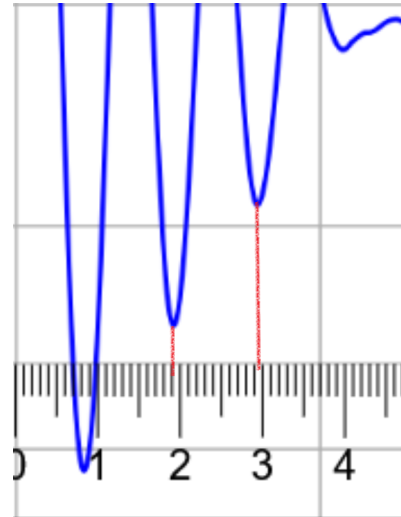


FIGURE 5 – Zoom(2) de  $x$  (m) en fonction des échantillons.

La fréquence d'échantillonnage utilisée est de 1 kHz.

### 1.1 Axe X

- Période (**period**) : 0.283 s
- Raideur (**raideur**) : 500 N/m
- Position initiale ( $x_0$ ) : 0.0812 m
- Position finale ( $x_i$ ) :  $8.8 \times 10^{-3}$  m
- Indice  $i$  : 2

En appliquant la fonction `char_calculator`, les résultats obtenus sont les suivants :

- Masse apparente ( $m$ ) : 0.9826 kg
- Amortissement ( $c$ ) : 8.119 Ns/m

## 1.2 Axe Y

- Période (**period**) : 0.151 s
- Raideur (**raideur**) : 500 N/m
- Position initiale ( $x_0$ ) : 0.033 m
- Position finale ( $x_i$ ) : 0.022 m
- Indice  $i$  : 3

En appliquant la fonction `char_calculator`, les résultats obtenus sont les suivants :

- Masse apparente ( $m$ ) : 0.2886 kg
- Amortissement ( $c$ ) : 6.2033 Ns/m

### 1..3 Axe Z

- Période (`period`) : 0.15 s
- Raideur (`raideur`) : 500 N/m
- Position initiale ( $x_0$ ) : 0.0192 m
- Position finale ( $x_i$ ) :  $9.6 \times 10^{-3}$  m
- Indice  $i$  : 5

En appliquant la fonction `char_calculator`, les résultats obtenus sont les suivants :

- Masse apparente ( $m$ ) : 0.2848 kg
- Amortissement ( $c$ ) : 6.4911 Ns/m

### 1..4 Analyse

- **Masse apparente** : On remarque immédiatement que la masse apparente calculée sur l'axe X est d'environ 1 kg, tandis que celles des axes Y et Z sont proches de 285 g. Ces dernières semblent plus réalistes après manipulation de l'interface, ce qui pourrait indiquer une anomalie ou une particularité dans le comportement dynamique de l'axe X.
- **Amortissement** : De même, l'amortissement apparent présente des valeurs différentes entre les axes. Nous choisissons de retenir les valeurs calculées pour les axes Y et Z, car elles sont cohérentes avec les masses déjà sélectionnées pour ces axes.
- **Conclusion** : Nous formulons l'hypothèse que la différence observée dans les calculs est liée au fait que le mouvement du ressort sur l'axe X (dans la direction vers l'utilisateur) mobilise simultanément les trois bras de l'interface haptique. En revanche, les ressorts des axes Y et Z sollicitent principalement deux bras. Cette différence dans le nombre de bras utilisés pourrait expliquer les écarts observés dans les masses apparentes et les amortissements apparents. Une meilleure estimation pourrait être retrouvée en augmentant la valeur de l'amortissement choisis exemple : 2000 N/m

## 2. Mur virtuelle

Nous cherchons à développer, comme premier objet, un mur virtuel. Pour cela, nous avons conçu une fonction `mur` qui calcule la force exercée par un mur virtuel, en fonction de la position de l'effecteur et des caractéristiques de ce plan.

Dans une première approche, nous calculons la distance entre l'effecteur et le mur virtuel. Si cette distance est négative, une force de rappel est appliquée sur l'effecteur en utilisant la fonction `ressort`, déjà développée. Cependant, cette méthode repose sur l'utilisation d'une condition (instruction `if`), ce qui peut entraîner des instabilités ou des vibrations si la raideur est trop élevée ou si le ressort n'est pas correctement couplé avec un amortisseur.

### 2..1 Modulation de la distance

Pour éviter ces problèmes, nous proposons une alternative où la distance, une fois calculée, est modulée à l'aide de la dérivée d'une gaussienne. Cette approche garantit un comportement plus lisse et réduit les risques d'instabilités tout en conservant une réponse adaptée.

La dérivée de cette fonction par rapport à  $x$  est donnée par :

$$f'(x) = -2b \cdot x \cdot e^{-a \cdot x^2}$$

En effet, nous hypothésons que la dérivée d'une gaussienne est une fonction candidate idéale pour modéliser les interactions avec un solide pour plusieurs raisons :

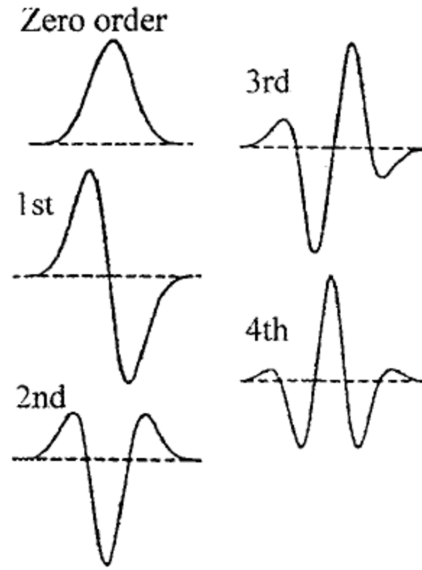


FIGURE 6 – Représentation de la gaussienne et de ces dérivées utilisées pour modéliser la force de rappel.

1. **Variation en fonction de la distance au mur** : La sortie de la fonction dérivée de la gaussienne varie selon la distance au mur. Lorsque l'on s'approche du mur, que ce soit de la droite vers la gauche ou inversement, la valeur absolue de la sortie augmente. Ensuite, en continuant à s'approcher, cette sortie diminue en atteignant la position du mur. Bien que cela puisse sembler une limitation, c'est au contraire un avantage. Appelons cette zone où la sortie commence à diminuer lorsqu'on s'approche du mur une *zone morte*.

— **Avantages de la zone morte** :

- (a) Cette structure permet de modéliser un mur avec deux faces en même temps.
- (b) La zone morte peut être considérée comme une caractéristique supplémentaire du mur : son épaisseur. Cette épaisseur est facilement ajustable.

Lorsqu'on se trouve dans cette zone (au sein de l'épaisseur du mur), il est impossible d'y rester longtemps. Le centre du mur, correspondant à la valeur zéro, est une position d'équilibre instable. Ainsi, lorsque l'on pénètre cette zone, la fonction nous repousse vers l'extérieur, modélisant ainsi un mur avec deux faces, une épaisseur, et une pénétrabilité limitée, tout en empêchant de s'y stabiliser.

2. **Continuité de la fonction** : La dérivée de la distribution normale est une fonction continue. Cette continuité garantit une transition fluide entre l'application et l'absence de force sur l'effecteur, réduisant ainsi significativement les vibrations. Cela nous permet également d'utiliser une raideur plus élevée, ce qui renforce la sensation de rigidité.

Cependant, malgré ses avantages, il est crucial de prêter attention au choix des paramètres (raideur et coefficients de la dérivée de la distribution normale). Un choix inapproprié peut rapidement mener à un comportement instable.

## 2.2 Resultas

Les paramètres utilisés pour simuler le mur sont les suivants :

$$f'(x) = -2b \cdot x \cdot e^{-a \cdot x^2}$$

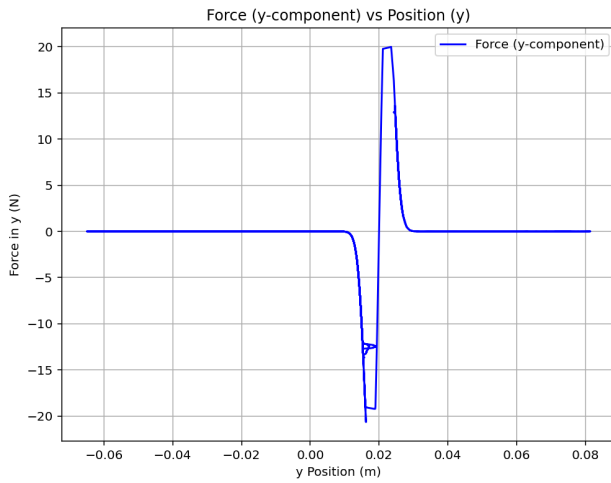
où :

- $x$  : distance entre l'effecteur et le mur,
- $b = \frac{1}{2} \cdot 90000$ ,
- $a = 90000$ .

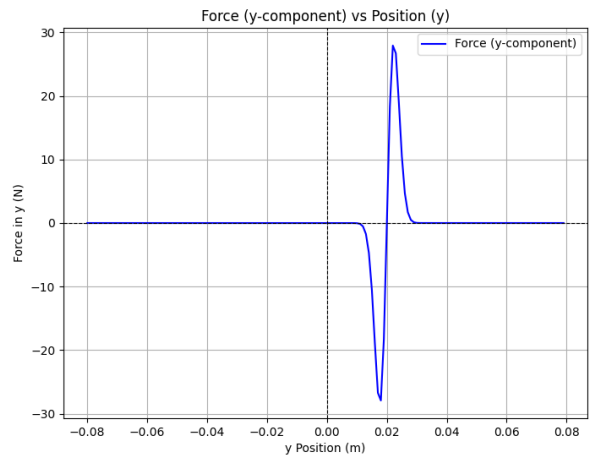
Les caractéristiques du mur virtuel simulé sont :

- Position du mur : `Vecteur3d(0.0, 0.02, 0)`,
- Normale au mur : `Vecteur3d(0, 1, 0)`,
- Ressort simple utilisé avec une raideur de  $k = 20000$ .

Les résultats des mesures ont été obtenus en balayant l'espace avec l'effecteur. Les forces mesurées correspondent aux forces appliquées sur l'effecteur, à l'exception d'éventuelles saturations. Par ailleurs, les forces théoriquement appliquées ont été tracées pour comparaison.



(a) Force mesurée en fonction de la distance au mur.



(b) Force simulée en fonction de la distance au mur.

FIGURE 7 – Comparaison des forces mesurées et simulées en  $y$ .

Les résultats présentés dans la figure précédente illustrent clairement le profil des forces attendu :

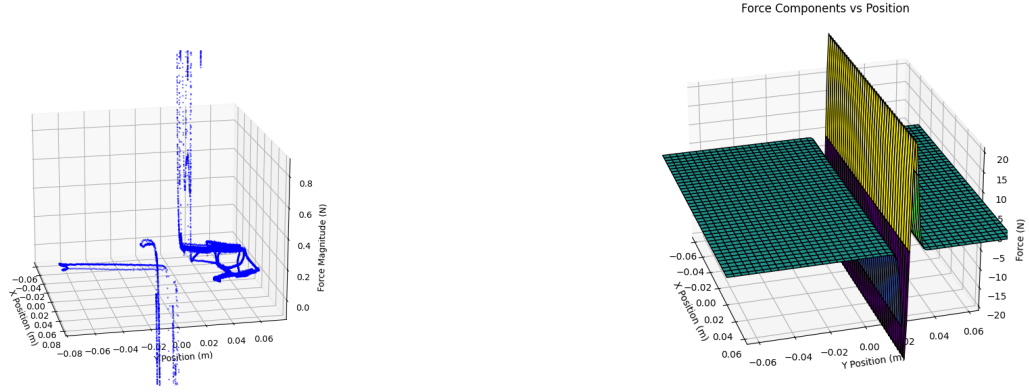
- Lorsque l'on s'approche du mur de la gauche vers la droite, en direction de sa position  $y = 0.02$ , une force négative est appliquée, poussant l'effecteur vers les  $y$  négatifs et l'éloignant ainsi du mur.
- Si l'on force le passage et pénètre le mur, atteignant une position proche de  $y \approx 0.018$ , on entre dans la *zone morte*, comme expliqué précédemment.
- Dans cette *zone morte*, la force change rapidement de signe, passant de positive à négative. Ce comportement entraîne l'éjection de l'effecteur hors du mur, le poussant vers les  $y$  positifs.

De plus, la saturation des forces appliquées est clairement visible en comparant les forces mesurées aux forces théoriques. Les forces appliquées sur l'effecteur ne peuvent pas dépasser une valeur maximale de 20 N, comme illustré dans les résultats.

Une autre manière de visualiser les forces consiste à représenter la composante  $F_y$  dans l'espace  $x$ - $y$ , tout en fixant la valeur de  $z$ . Les résultats obtenus sont présentés ci-dessous :

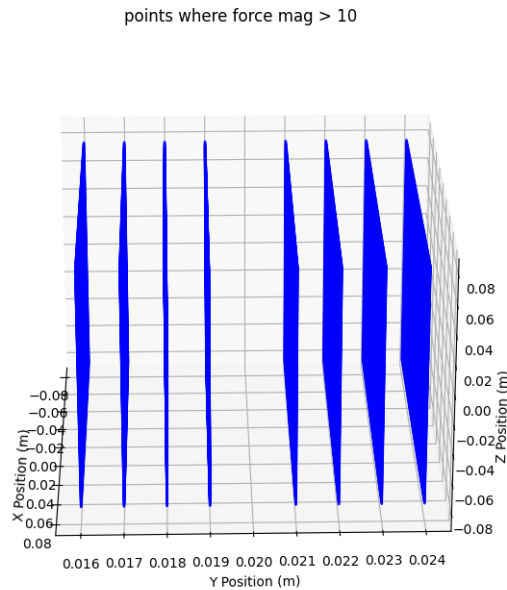
La visualisation du mur en 3D est particulièrement intéressante, car elle met en évidence le profil des forces s'étendant sur les axes  $x$  et  $y$ . Étant donné que le profil des forces est identique en  $x$  et  $z$ , on peut facilement extrapoler le comportement du mur dans l'espace.



(a)  $F_y$  mesurée dans l'espace  $x-y$ .(b)  $F_y$  simulée dans l'espace  $x-y$ , avec  $z = 0$ .FIGURE 8 – Comparaison des forces mesurées et simulées pour la composante  $F_y$  dans l'espace  $x-y$ .

Une manière encore plus pertinente de visualiser le mur serait de projeter les nuages de points correspondant aux positions où la force dépasse un certain seuil (par exemple, 10 N). Cela offrirait une représentation claire et précise du mur dans l'espace. Malheureusement, l'auteur de ce rapport n'a pensé à cette approche qu'après avoir réalisé les mesures, rendant impossible leur exploitation avec cette méthode. Toutefois, le mur simulé a été visualisé en utilisant cette technique.

Il est important de noter que la génération et le traçage du mur sont particulièrement coûteux en termes de ressources, et il est conseillé de ne pas reproduire ces résultats inutilement ou bien de diminuer le pas de discrétisation de l'espace. Néanmoins, la visualisation des forces dans l'espace reste un outil précieux pour mieux comprendre le comportement du mur simulé.

FIGURE 9 – Nuage de points où la norme de la force  $> 10$

### 2..3 Discussion

Les résultats obtenus montrent clairement un mur dans l'espace de travail, avec une épaisseur allant de 0.016 à 0.024 pour les zones où la norme des forces appliquées est supérieure à 10 N.

Cependant, il est important de noter que les résultats présentent plusieurs plans distincts dans l'espace, et non pas un mur continu comme attendu. Cette observation s'explique par la discrétisation de l'espace, où un pas de 0.001 a été utilisé. Une résolution plus fine permettrait probablement de résoudre cette ambiguïté et de représenter le mur de manière plus uniforme.

Après l'ensemble des visualisations et analyses réalisées, nos résultats expérimentaux sont validés. Concernant la sensation perçue, on peut clairement ressentir l'effet souhaité grâce à l'utilisation de la dérivée de la distribution normale. Cette méthode permet de simuler efficacement l'interaction avec un mur virtuel.

Cependant, il convient de souligner qu'un choix rigoureux des paramètres est essentiel pour éviter les instabilités et maintenir une sensation de rigidité élevée. Les paramètres utilisés dans cette étude garantissent un bon fonctionnement et une expérience utilisateur satisfaisante.

Pour des améliorations futures, une piste intéressante serait d'enrichir la fonction *mur* en ajoutant davantage de paramètres en entrée. Cela offrirait une plus grande liberté d'adaptation et une meilleure flexibilité dans la configuration du mur virtuel, permettant ainsi de répondre à des besoins plus variés et spécifiques.

## 3. Cube virtuel

Pour créer un cube virtuel, nous utilisons la fonction *mur* développée précédemment. L'idée consiste à générer six murs et à les tronquer (les découper) pour former les faces du cube. La fonction *cube* développée crée un cube centré en  $(0, 0, 0)$  avec une longueur de côté  $L = 0,06$  m. Cette fonction génère deux murs pour chacun des axes  $x$ ,  $y$ , et  $z$ . Chaque mur est positionné à  $-L/2$  et  $+L/2$ , avec un vecteur normal orienté dans la direction de l'axe associé.

Pour tronquer les murs, une première approche consiste à introduire des conditions sur le mur. Par exemple, si la position dépasse  $\pm L/2$  selon  $y$  ou  $z$ , les forces appliquées par le mur en  $x$  sur l'effecteur sont nulles. Cependant, comme discuté précédemment, l'utilisation de structures conditionnelles (if statements) peut introduire des vibrations et des instabilités dans le système.

Pour éviter cela, nous recherchons une fonction qui assure une transition douce entre l'application et la non-application de la force, garantissant ainsi un comportement continu et stable.

### 3..1 Tronçage des Forces

Nous postulons que la fonction sigmoïde (l'intégrale de la fonction de distribution normale) est un candidat idéal pour une fonction de tronçage. Cette fonction est particulièrement adaptée grâce à son comportement autour du point où elle est centrée. Par exemple, pour  $x = 0$ , lorsque  $x < 0$ , sa sortie tend vers 0, et lorsque  $x > 0$ , sa sortie tend vers 1.

$$\text{Sigmoïde : } S(x) = \frac{1}{1 + \exp(-b \cdot x)}$$

Pour appliquer cette fonction à chaque mur, nous utilisons deux sigmoïdes centrées en  $\pm L/2$  sur chaque axe tangent au mur. Par exemple, pour un mur situé selon  $x$ , nous multiplions la force appliquée par le mur par deux sigmoïdes centrées en  $\pm L/2$  sur  $y$  et  $z$ . Cela se traduit par la relation suivante :

$$f_x \leftarrow f_x \cdot S(\text{pos.z} - (-L/2)) \cdot S'(\text{pos.z} - (+L/2)) \cdot S(\text{pos.y} - (-L/2)) \cdot S'(\text{pos.y} - (+L/2))$$

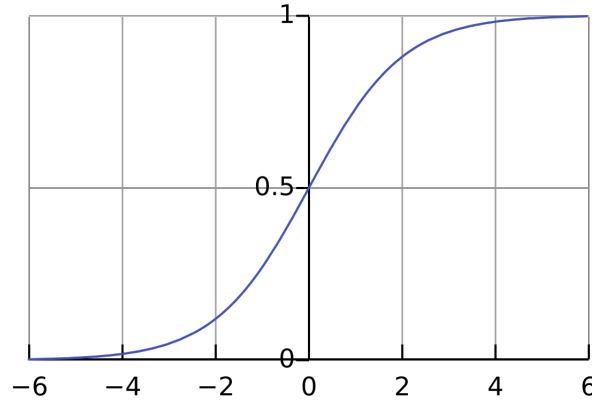


FIGURE 10 – Représentation de la fonction sigmoïde

où

$$S(x) = \frac{1}{1 + \exp(-1000 \cdot x)}$$

et

$$S'(x) = \frac{1}{1 + \exp(1000 \cdot x)}$$

Ce procédé crée une sorte d'intervalle d'activité. Dans cet intervalle, pour  $y \in [-L/2, L/2]$  et  $z \in [-L/2, L/2]$ ,  $f_x > 0$ . En dehors de ces limites,  $f_x = 0$ , garantissant ainsi que les forces exercées par les murs en  $x$  sont confinées à la zone définie.

### 3.2 Résultats

Les mesures des forces durant la session expérimentale ont été prises sans pénétration du mur, c'est-à-dire en balayant tous les murs sans forcer l'effecteur à travers eux. Cela revient à observer le profil des forces sous la condition  $|x| > 0.03$  m ou  $|y| > 0.03$  m.

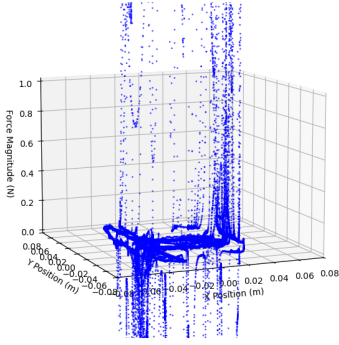
On peut clairement observer les similitudes entre les résultats expérimentaux et les résultats simulés. Le balayage des murs simulés donne une répartition des forces qui reproduit fidèlement une forme cubique. Il est intéressant de noter qu'aux arêtes du cube, les forces sont nulles. Ce phénomène s'explique par la méthode de représentation des forces, où l'on trace la somme des forces  $f_x$  et  $f_y$ . Par exemple, si  $f_x = -f_y$  aux arêtes, leur somme sera nulle, d'où une absence apparente de forces dans ces zones.

### 3.3 Visualisation étendue des forces

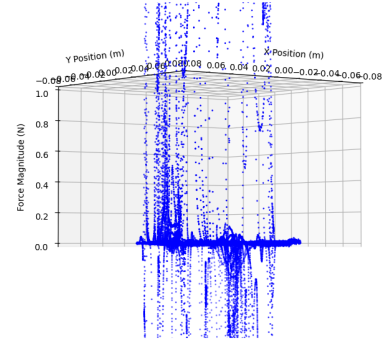
Maintenant que nous avons confirmé la cohérence entre les forces ressenties expérimentalement et celles simulées, nous pouvons élargir le domaine et visualiser les forces dans tout l'espace de travail.

Le profil montre que les forces rejettent l'effecteur vers l'extérieur lorsqu'il s'approche du cube depuis l'extérieur, et vers l'intérieur lorsqu'il s'approche depuis l'intérieur. Les forces sont saturées à  $\pm 15$  N, car des forces excessives, notamment aux arêtes, peuvent causer des instabilités et des comportements imprécis. Cette saturation limite efficacement ces sauts imprévus.

Le nuage de points représente les zones où la norme des forces appliquées est supérieure à 7 N. Cette visualisation met en évidence un objet de forme cubique, vide à l'intérieur, et d'une épaisseur mesurable.



(a) Vue d'angle 1 du cube simulé.



(b) Vue d'angle 2 du cube simulé.

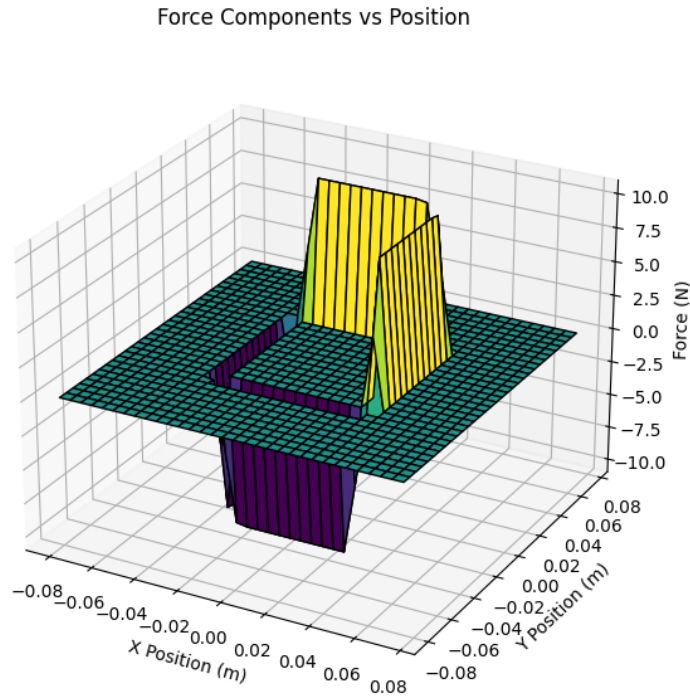
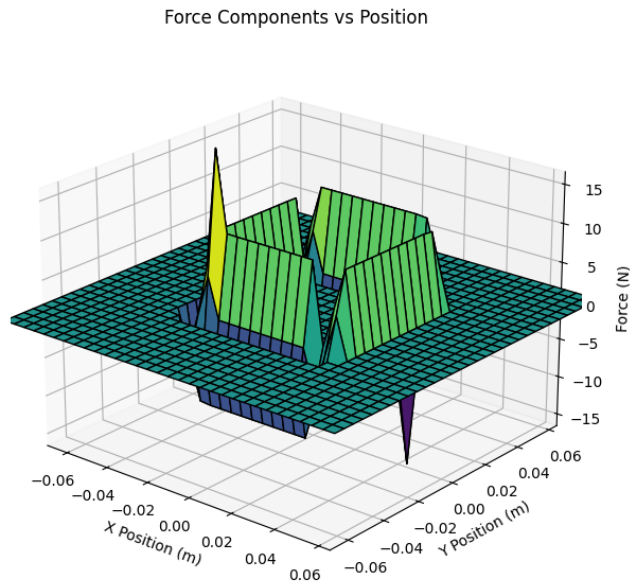
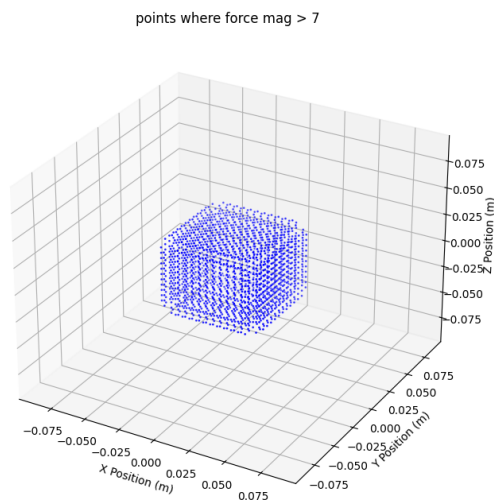
(c) Profil des forces  $f_x + f_y$  dans l'espace ( $|x| > 0.03$  m ou  $|y| > 0.03$  m).

FIGURE 11 – Comparaison des résultats simulés et expérimentaux pour les forces appliquées au cube (pas de discrétisation = 0.005 m ,  $z = 0$ ).

### 3.4 Améliorations possibles

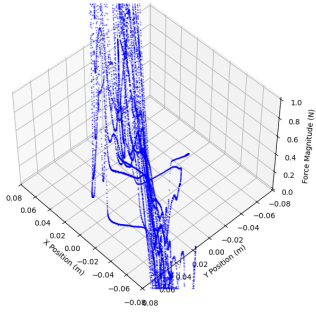
Une amélioration possible serait d'enrichir la fonction de génération du cube avec davantage de paramètres, tels que la position, la longueur des côtés, ou d'autres caractéristiques. Cela offrirait une plus grande flexibilité et facilité d'utilisation pour des applications variées.

FIGURE 12 – Profil étendu des forces simulées dans tout l'espace de travail ,  $z=0$ .FIGURE 13 – Nuage de points dans l'espace où la norme des forces est  $> 7$  N.

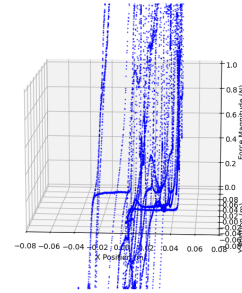
## 4. Sphère virtuelle

Pour créer une sphère virtuelle, l'idée est similaire à celle des autres objets précédemment décrits : il s'agit de calculer la distance entre la position de l'effecteur et la surface de la sphère, puis de moduler cette distance à l'aide de la dérivée d'une distribution normale. Cette approche est mise en œuvre dans la fonction **sphere** développée à cet effet.

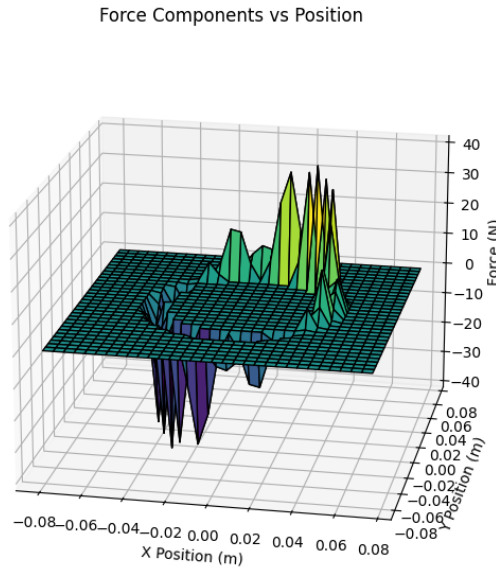
Des mesures expérimentales ont été prises en balayant l'objet simulé avec l'effecteur. Aucune pression ou force externe n'a été appliquée pour forcer l'effecteur à pénétrer dans la sphère.



(a) Vue d'angle 1 de la sphère simulée.



(b) Vue d'angle 2 de la sphère simulée.

(c) Force en  $y$  + force en  $x$  dans l'espace  $x, y$  avec distance à la sphère  $\geq$  rayon de la sphère,  $z = 0$ .FIGURE 14 – Comparaison des forces appliquées dans l'espace  $x, y$  pour une sphère simulée.

Malheureusement, la qualité des mesures n'est pas optimale, mais une similitude entre les forces mesurées et les forces théoriques simulées peut être observée.

Le tracé des forces sur l'ensemble du domaine de travail nous donne :

Il est possible de distinguer une répartition circulaire des forces dans l'espace, où les forces ressenties agissent de manière à repousser l'effecteur vers l'extérieur lorsqu'il s'approche du bord de la sphère et vers l'intérieur lorsqu'il s'approche du centre. Il est à noter que les forces ne sont pas parfaitement réparties autour du cercle ; elles prennent plutôt la forme d'une courbe. Ce phénomène est dû à la méthode de représentation des forces, car la somme de  $f_x$  et  $f_y$  peut s'annuler dans certaines zones. Une solution pour contourner cela serait de tracer la norme de la force, mais cela entraînerait la perte d'information sur la direction de la force.

Le tracé ci-dessus montre un nuage de points représentant les zones où la norme des forces appliquées sur la sphère simulée est supérieure à 7 N. Il est évident que la forme obtenue est sphérique dans l'espace (bien qu'une légère déformation ovale apparaisse en raison de l'affichage

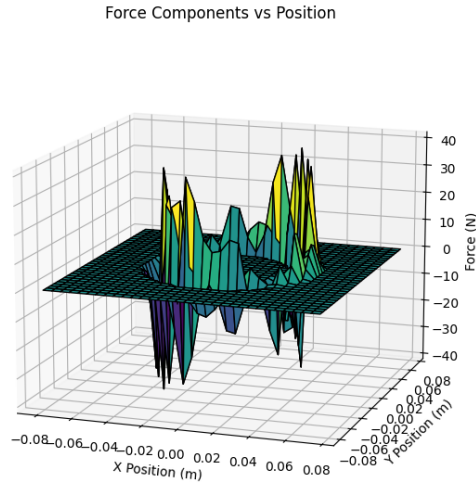


FIGURE 15 – Force  $f_x + f_y$  en  $x$  et  $y$ ,  $z = 0$ , pas de discrétisation = 0.005, centre de la sphère  $(0, 0, 0)$ , rayon = 0.004 m.

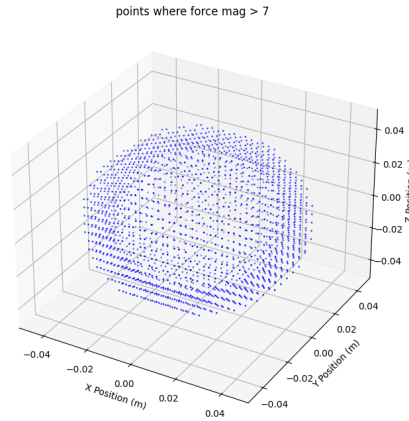


FIGURE 16 – Nuage de points représentant les forces présentes sur la sphère simulée où la norme des forces est  $> 7$  N.

en 2D).

Une autre possibilité consiste à simuler un cylindre en utilisant les sphères et les murs. Cela peut être réalisé en simulant deux sphères représentant les deux surfaces planes du cylindre et un mur avec une normale égale à celle du cylindre. Le point de contact de l'effecteur avec le cylindre peut être projeté sur sa surface, puis un tronçage du mur peut être effectué. Une fonction `cylindre` a été développée pour cela, mais elle n'est pas encore entièrement fonctionnelle, notamment en ce qui concerne la partie tronçage.



## 5. Glissière à clic virtuel

Pour simuler une glissière à clic, il est nécessaire de modéliser deux types de forces : la force tangentielle à la direction du mouvement de la glissière pour simuler les clics, et une seconde force  $f_{\text{colle}}$  pour assurer un seul degré de liberté de mouvement, selon l'axe de la glissière.

La force  $f_{\text{colle}}$  est une force de rappel où l'on utilise la fonction ressort avec une raideur  $k = 1000$ , et comme distance, la distance entre l'effecteur et le centre de la glissière, mais en soustrayant la distance selon l'axe de la glissière. La force tangentielle,  $f_{\text{tangentielle}}$ , est également une force de rappel utilisant la fonction ressort, avec une raideur de 10 N et une distance donnée par  $\cos(\text{distance selon l'axe de la glissière} \times \text{fréquence au choix})$ .

Malheureusement, les mesures expérimentales ne sont pas suffisamment claires, nous nous contenterons donc de visualiser uniquement les valeurs des forces théoriques.

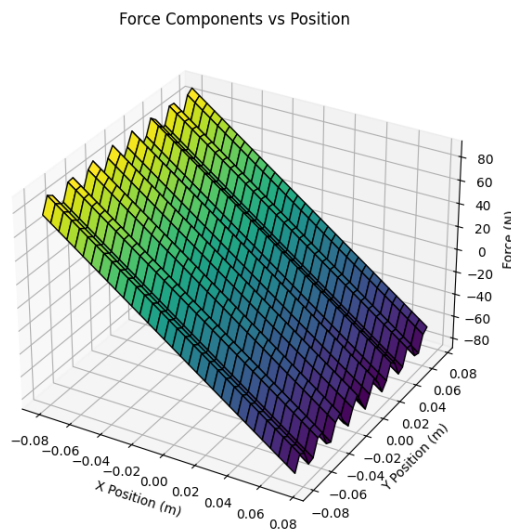


FIGURE 17 – Glissière d'axe  $\mathbf{V} = \text{Vecteur3D}(0, 1, 0)$  et de centre  $(0, 0, 0)$ .

On peut observer que le domaine de travail est uniquement sur  $x = 0$ . Si on tente de se déplacer sur l'axe des  $x$ , les forces appliquées sur l'effecteur augmentent de manière linéaire à mesure que l'on s'éloigne de  $x = 0$ , de manière à ramener l'effecteur vers cette position.

Concernant l'axe des  $y$ , on peut observer la variation sinusoïdale de la force tout au long de cet axe. Cette variation sinusoïdale est ce qui crée la sensation de clic recherchée, où l'effecteur se stabilise (clique) lorsque la force est nulle (i.e.,  $\cos(\text{fréquence} \times \text{position}) = 0$ ).

Étant donné qu'il y a une symétrie entre l'axe des  $x$  et l'axe des  $z$ , et que la glissière se déplace uniquement selon l'axe des  $y$ , on obtient exactement le même motif de forces si l'on trace  $f_y + f_z$  dans l'espace  $y, z$ . Cela signifie que dans le domaine de travail 3D, le seul mouvement permis est lorsque  $x = 0$  et  $z = 0$ , ou lorsque les forces appliquées sur l'effecteur sont suffisamment faibles pour permettre un mouvement. Cela peut être observé en traçant les points où la force simulée a une norme inférieure à 5 N.

## 6. Mur virtuel texturisé

Pour simuler un mur texturisé, nous commençons par utiliser le modèle de mur déjà développé. Le mur texturisé est la somme des forces d'un mur classique et des forces de texture, qui sont



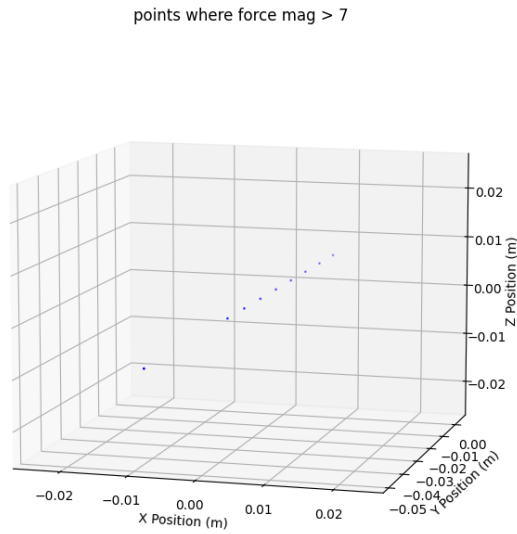
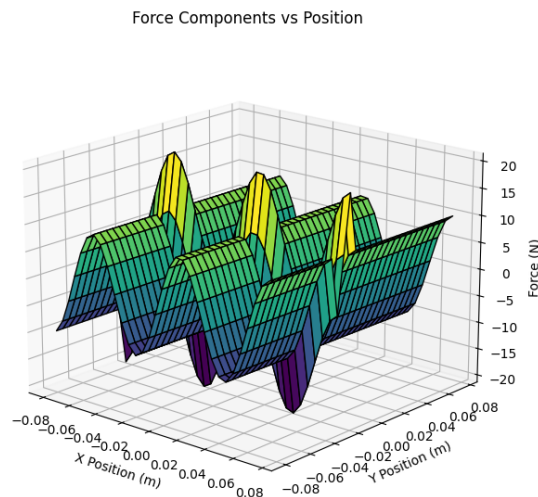


FIGURE 18 – Nuage de points où la force simulée est inférieure à 5 N.

tangentiellement appliquées au mur. Pour créer ces forces tangentielles, nous trouvons les vecteurs tangents au mur, puis nous calculons une force de rappel en utilisant un ressort simple avec une raideur  $k = 10$ , en modélisant le  $\Delta d$  du ressort avec le cosinus de la distance entre la position de l'effecteur et celle du mur, multiplié par une fréquence choisie ici 100 Hz.

Aucune mesure expérimentale n'a été réalisée, mais nous pouvons visualiser les forces  $f_x + f_y$  dans l'espace  $x, y$  pour  $z$  fixé à n'importe quelle valeur.

FIGURE 19 – Forces  $f_x + f_y$  dans l'espace  $x, y$  avec  $z$  fixé à 0 .

On peut observer le profil de force déjà observé pour un mur normal, mais également, selon  $x$

(un des deux axes tangentiels au mur), une force sinusoïdale, qui correspond à la texture du mur. Lorsque l'on balaie le mur sur l'axe des  $x$ , on ressent une force sinusoïdale qui simule des creux et des maxima locaux.

Comme l'axe des  $z$  est symétrique de l'axe des  $x$ , dans ce cas précis, on verra le même phénomène pour  $f_z + f_y$  dans l'espace  $y, z$ . Cela signifie que dans un espace 3D, si l'on balaie le mur avec l'effecteur, on ressentira une grille de maxima et minima locaux. Cette grille est formée par les axes tangentiels au mur, à savoir les axes  $x$  et  $z$  dans ce cas précis.

Cette fonction n'est pas complète. Comme le montrent les résultats simulés, il est nécessaire de tronquer les forces en  $x$ ,  $y$  et  $z$  afin d'obtenir un mur plus réaliste, et non une force infinie.

### III. Seconde Partie : Couplage à un simulateur physique

Dans cette partie, nous cherchons à coupler l'interface haptique avec un simulateur physique dans le but d'expérimenter la téléopération avec une plateforme robotique distante, par exemple.

En téléopération, nous avons deux choix de contrôle :

Le premier, en mode *impédance*, où l'interface haptique envoie des commandes de position et de vitesse au schéma de couplage. Ce dernier tente d'appliquer ces changements de position et de vitesse sur l'effecteur du robot ou de l'objet téléopéré (en multipliant ces paramètres par un facteur de redimensionnement, bien entendu). En retour, nous mesurons les forces appliquées par le monde extérieur sur cet effecteur, puis nous les transmettons à l'interface haptique via le schéma de commande.

En revanche, dans le mode *admittance*, nous mesurons les forces appliquées sur l'interface haptique, les transmettons au schéma de couplage vers la plateforme téléopérée, puis mesurons les changements de position et de vitesse sur l'effecteur ou l'objet de la plateforme. Ces informations de position et de vitesse sont ensuite renvoyées vers l'interface haptique, de manière à ce que l'interface suive les mouvements de la plateforme téléopérée. La poignée de l'interface haptique reproduit ainsi les mouvements du robot téléopéré.

Bien que la téléopération en mode *impédance* soit beaucoup plus pratique, le mode *admittance* présente de nombreux avantages, notamment pour la précision de suivi des mouvements. Cependant, le mode *impédance* reste plus robuste face à la latence, qui est un problème majeur en téléopération.

Dans le simulateur, nous contrôlons deux sphères : une sphère blanche de masse nulle, qui suit la position de l'effecteur de l'interface haptique et peut pénétrer les objets dans l'espace, et une autre sphère bleue, de masse non négligeable, que nous essayons de coupler avec l'effecteur de l'interface haptique en mode *impédance*.

Pour cela, nous créons une fonction ressort similaire à celle déjà vue, mais avec l'ajout d'un amortissement critique. Cet amortissement est défini par la relation

$$c = 2 \cdot \sqrt{\text{masse} \cdot k}$$

où  $k$  est la raideur du ressort. L'idée est de coupler la sphère bleue avec un ressort de longueur nulle à l'effecteur de l'interface haptique.

Si la distance entre la sphère bleue et l'effecteur devient supérieure à zéro (par exemple, si l'on touche un cube avec la sphère bleue qui ne peut pas pénétrer), une force de rappel se crée pour empêcher l'effecteur de traverser le cube. Cette force de rappel est appliquée à l'effecteur et l'empêche de pénétrer dans l'objet.

Pour garantir un bon fonctionnement du schéma de couplage, il est essentiel de choisir une raideur adéquate et un facteur de redimensionnement approprié. Nos expériences montrent qu'une raideur de 250 et un facteur de redimensionnement de 5 assurent un bon fonctionnement pour une masse de 100 g.

Deux vidéos de démonstration des résultats sont présentées dans la section 'figs' du dépôt Git (video1.mp4 et video2.mp4).

## IV. Conclusion

Au cours de ce travail, plusieurs objectifs ont été atteints grâce à une série de séances de travaux pratiques. Tout d'abord, nous avons développé et estimé les caractéristiques inertiales de la plateforme haptique Novint Falcon, ce qui a permis d'améliorer la compréhension des dynamiques de l'interface.

Ensuite, nous avons développé des objets à simuler de manière innovante, en proposant une méthode originale pour le calcul des forces simulées par ces objets. En utilisant des modèles physiques et des méthodes numériques, nous avons créé des objets réagissant de façon réaliste aux mouvements de l'effecteur, permettant ainsi des simulations réalistes des interactions avec ces objets.

Enfin, nous avons couplé l'interface haptique avec un simulateur physique afin de réaliser des expérimentations sur la téléopération. Ce couplage a permis de valider les principes théoriques et de confirmer l'efficacité du système mis en place, tout en offrant une plateforme pour des applications pratiques en téléopération.

Ce travail a ainsi permis de poser les bases d'une interface haptique plus précise et d'outils de simulation améliorés.

## V. Auto-évaluation

Je m'attribue une note de 4.7/5. Bien que mon travail présente certaines lacunes, notamment en termes de mesures nécessaires pour valider pleinement les résultats, la qualité de la simulation des objets me semble excellente. La créativité et l'originalité que j'ai investies dans ce travail. Toutefois, la deuxième partie souffre d'un manque d'expérimentation, en partie en raison de ma condition durant la dernière séance, où j'étais malade et épuisé. De plus, je n'avais pas pu préparer les mesures pour la première partie à l'avance, étant donné que j'avais de nombreuses autres échéances et projets à gérer simultanément. Malgré ces défis, je considère que mon travail est solide et créatif. Je pense qu'une note de 4.7/5 reflète bien mes efforts et les résultats obtenus, bien que j'aurais pu optimiser certains aspects du projet.