

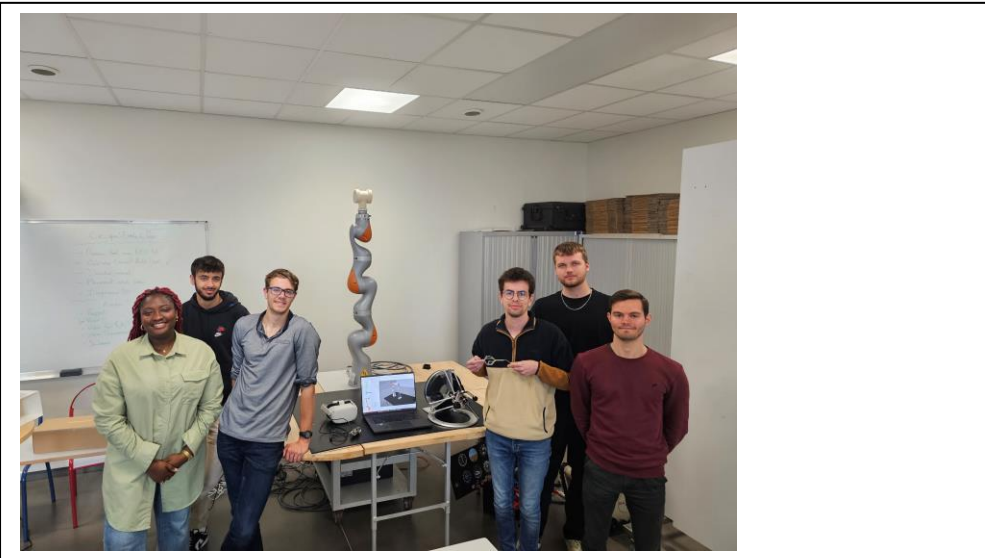
PROOF OF CONCEPT 2023-2024

Problématique :

Comment téléopérer un instrument médical

Sujet :

TORUS : Télé-Opération d'un Robot Ubiquitaire Sécurisé



*Arnaud GODET, Carelle LIAMIDI, Dimitri MINVIELLE,
Kaëlig PLANTARD—LUNNY, Léo GOURBIN, Mathias FOYER*

Professeur encadrant : M. BELHARET Karim

Remerciements

Nous exprimons notre gratitude envers Monsieur BELHARET pour son accompagnement précieux et son implication dévouée dans la concrétisation de ce projet. Grâce à son suivi attentif, nous avons pu valoriser au mieux nos compétences et maintenir le cap avec succès.

Nous tenons également à remercier chaleureusement Monsieur David DELOUCHE pour avoir mis à notre disposition les outils techniques et les locaux nécessaires à notre projet, ainsi que l'ensemble du corps pédagogique qui a pris le temps de répondre à nos questions.

Nos remerciements vont ensuite à l'équipe informatique du campus Centre de l'Indre, qui nous a généreusement fourni des outils nécessaires à la réalisation de notre projet, et pour avoir pris le temps de nous accompagner dans ce projet en répondant à nos différentes questions.

Enfin, nous souhaitons adresser nos remerciements sincères à toutes les personnes qui ont aussi contribué à la réussite de ce projet, en particulier les chercheurs de prisme. Leur soutien et leur engagement ont été essentiels à notre succès, et nous leur sommes profondément reconnaissants. Sans leurs conseils et la mise à disposition de leur matériel nous n'aurions pu réaliser ce projet.



Résumé

Le projet TORUS a pour objectif de permettre la réalisation d'une opération médicale à longue distance à l'aide d'un bras robotisé KUKA iiwa 7R800. Il offre une prise en main ergonomique et intuitive grâce à sa commande haptique et son casque de réalité virtuelle. Sa transmission par réseau lui permet de bénéficier d'un temps de réponse faible pour garantir la précision de l'opération. L'organe terminal du bras robotisé est muni d'un aimant qui permet le pilotage d'un fil de cathéter magnétique.

Abstract

The TORUS project aims to enable the performance of a medical operation remotely using a KUKA iiwa 7R800 robotic arm. It provides ergonomic and user-friendly control through its haptic interface and VR headset. Its network transmission allows it to benefit from low response times to ensure the precision of the operation. The end effector of the robotic arm is equipped with a magnet that allows the manipulation of a magnetic catheter.



Table des matières

Remerciements.....	2
Résumé	3
Abstract	3
Introduction	6
Contexte	6
Définition du projet	7
Objectifs du projet	7
Organisation du projet	8
Traitement du projet	9
L'opération actuelle	9
Partie 1 : Comment robotiser une opération de cathétérisme	10
Partie 2 : La téléopération	14
Partie 3 : Le feedback haptique	20
Partie 4 : Le feedback visuel	27
L'opération telle que nous l'envisageons	32
Technologies complémentaires	33
Solution finale	35
Prototype	37
Retour sur le travail d'équipe et individuel	38
Conclusion et perspectives	40
Bibliographie.....	40
Annexes	41



Figure 1 : Entrées et Sorties du projet POC	6
Figure 2 : Entrées et Sorties du prototype.....	8
Figure 3 : Cathéter	9
Figure 4 : Carrefour de vaisseaux sanguins	9
Figure 5 : Table de fluoroscopie c-arm Philips.....	9
Figure 6 : Synoptique 1 : l'opération actuelle.....	10
Figure 7 : Entrées et Sorties de la robotisation	10
Figure 8 : Synoptique 2 : L'opération robotisé	11
Figure 9 : Visuel sur la scène 3D global.....	12
Figure 10 : Importation des fichiers STL	13
Figure 11 : Plan simple scène 3D	13
Figure 12 : Entrées et sorties de la téléopération	14
Figure 13 : Synoptique 3 : La Téléopération	14
Figure 14 : Schéma du réseau.....	17
Figure 15 : Entrées et sorties du dispositif haptique	20
Figure 16 : Synoptique 4 : Retour haptique	20
Figure 17 : Schéma de fonctionnement d'un dispositif de commande haptique	21
Figure 18 : Omega 6 de Force Dimension.....	22
Figure 19 : Contrôle de l'aimant de la scène virtuelle avec la commande.....	23
Figure 20 : Exemple du fil du cathéter à un carrefour de directions.....	23
Figure 21 : Position du robot dans la scène 3D	24
Figure 22 : Zoom sur l'effecteur 3D	25
Figure 23 : Bouton de changement de mode	25
Figure 24 : Zone d'accès du robot.....	26
Figure 25 : Entrées et sorties du casque de réalité virtuelle	27
Figure 26 : Synoptique 5 : Retour visuel	27
Figure 27 : Affichage dans un casque VR	28
Figure 28 : Interprétation des images par le cerveau.....	28
Figure 29 : Casque VR META Quest 2	29
Figure 30 : Application VRidge	30
Figure 31 : Explication tracking camera entre réel et virtuel	30
Figure 32 : Entrées et sorties des technologies complémentaires.....	32
Figure 33 : Synoptique 6 : Technologies complémentaires.....	32
Figure 34 : Kinect	33
Figure 35 : Cartographie 3D de « Shina Systems »	35
Figure 36 : Architecture des différents environnements de logiciel/programme utilisés	36
Figure 37 : Prototype final	37



Introduction

Dans le cadre de la 4^{ème} année du cycle ingénieur JUNIA HEI, nous devons réaliser un Proof Of Concept. Notre thématique choisie tourne autour du pilotage à distance d'un outil médical. Le but est de montrer notre capacité à mener à terme un tel projet, et de réaliser un prototype pour démontrer la faisabilité de notre solution envisagée. Ce rapport contient l'ensemble de nos raisonnements, choix, développements et actions sur toute la durée du projet.

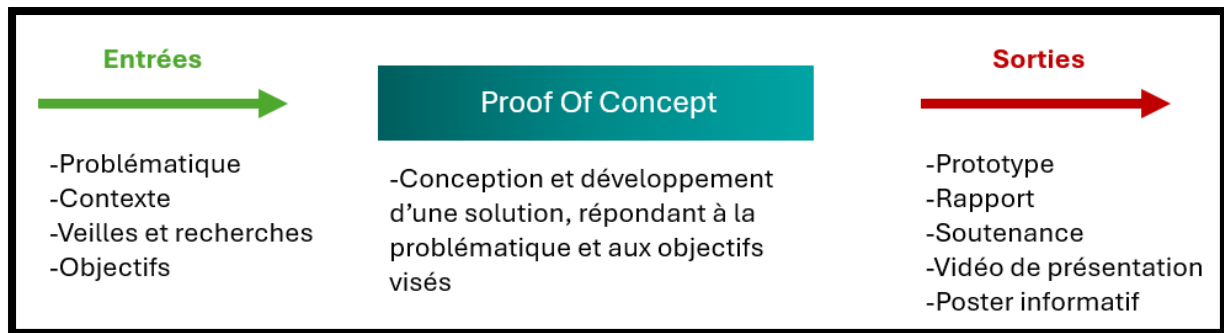


Figure 1 : Entrées et Sorties du projet POC

Contexte

En France, 4 millions de personnes vivent dans un désert médical. Alors que le nombre de médecins baisse fortement, 339 pour 100 000 habitants en 2023 contre 311 pour 100 000 en 2024, l'accès aux soins pour tous est plus que jamais au cœur des préoccupations des Français.

Imaginez une situation où un patient nécessite des soins délivrés par des chirurgiens spécialisés mais, vivant dans une région éloignée ou dans un désert médical, il n'a pas accès à ce genre de soins. Prenons l'exemple des accidents vasculaires cérébraux, ces accidents sont classés premiers pour les causes les plus fréquentes de décès et d'invalidité à long terme en France. Un AVC est causé par la présence de caillots de sang dans le cerveau, qui peut nécessiter une intervention chirurgicale d'urgence. Pour la traiter, des médecins spécialisés doivent agir très rapidement, environ 6 heures après l'AVC les chances de survie du patient baissent considérablement, et les risques de séquelles augmentent. Malgré ce danger, les spécialistes capables d'agir ne sont pas disponibles partout en France : à Châteauroux par exemple, une personne faisant un AVC doit aller jusqu'à Tours pour se faire opérer, or ce temps de déplacement est crucial pour le patient.

Dans ce contexte, la téléopération d'instruments médicaux offre une solution prometteuse. En utilisant des technologies avancées telles que la robotique, ou la réalité étendue, le chirurgien peut contrôler à distance des instruments chirurgicaux de haute précision pour effectuer des opérations complexes à partir de n'importe quel endroit avec une connexion internet fiable.



Définition du projet

À travers tous ces enjeux nous soulevons donc la problématique suivante : « Comment téléopérer un instrument médical » ?

Le 07 septembre 2001 a eu lieu la première téléchirurgie. La procédure s'est déroulée pendant 45 min, entre un chirurgien à New York contrôlant un système robotique ZEUS, et une patiente à l'hôpital de Strasbourg. L'intervention a été un succès avec une latence de 155 ms entre le geste de l'opérateur et le retour de son image. Puisque cela fait près de 23 ans que nous avons réussi la première téléchirurgie il est pertinent de se demander pourquoi elle n'est pas encore déployée et utilisée couramment. En observant de plus près les études et essais qui ont été réalisés après cette opération on observe que plusieurs obstacles se dressent sur la voie de la téléopération.

Premièrement, il y a la difficulté de la latence. La latence représente le délai de transmission dans les communications informatiques, il est indispensable que ce paramètre soit maîtrisé sans quoi nous ne pouvons pas garantir une opération fluide pour le chirurgien.

Deuxièmement, pour que le chirurgien puisse mener à bien l'intervention, il doit être bien à l'aise avec ses outils, or la chirurgie à distance retire les sensations et les repères sur lesquels le chirurgien se repose habituellement. La deuxième difficulté concerne donc le feedback. Nous pouvons distinguer les deux sens les plus utiles pour les chirurgiens : la vue et le toucher. **Pour être opérationnelle, la téléchirurgie doit donc avoir une latence maîtrisée, et inclure un feedback haptique et visuel.**

La thématique de la téléopération médicale est vaste, pour ce projet nous nous intéresserons donc **au cathétérisme cérébral**. Les opérations en salle de cathétérisme présentent aussi des limites, les plus importantes étant **la durée et la complexité des opérations**.

Objectifs du projet

Dans ce projet nous mettons donc en œuvre des moyens pour surmonter ces obstacles, et démontrer la pertinence de la téléopération. Nous visons aussi à offrir un meilleur outil aux chirurgiens pour raccourcir la durée des opérations et éviter de les exposer aux rayons X. Pour ce projet nous nous concentrerons principalement sur la téléopération, et par conséquent certains éléments seront **considérés acquis et non traités dans l'étude, et explicitement distingués**.



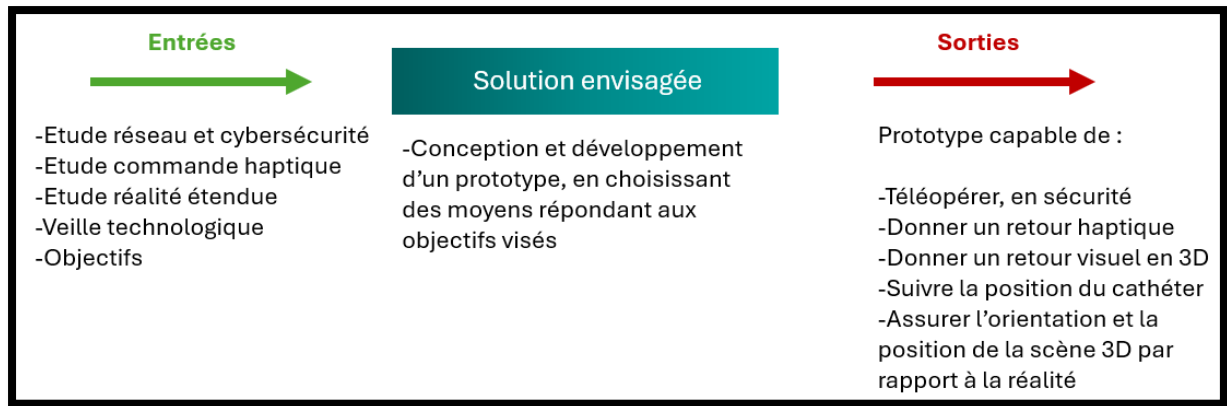


Figure 2 : Entrées et Sorties du prototype

Organisation du projet

Notre équipe est composée de six membres avec des parcours et compétences variés. Premièrement il y a Arnaud GODET issu d'une formation DUT informatique, il possède des compétences en informatique. Ensuite Carelle LIAMIDI, précédemment en DUT chimie analytique et de synthèse puis en licence professionnelle procédés et technologies pharmaceutiques, est compétente dans le domaine pharmaceutique et médical. Dimitri MINVIELLE issue d'une formation DUT GMP, elle est notre experte en génie mécanique. Mathias FOYER venant d'un DUT GEII possède des compétences en électronique. Léo GOURBIN venant d'une CPGE TSI possède des compétences variées dans chaque domaine. Et enfin Kaëlig PLANTARD—LUNNY issu aussi d'une CPGE TSI assume le rôle de chef de projet. Etant donné que ce projet est moins axé sur la mécatronique que sur l'informatique et les réseaux il est essentiel que chacun sorte de sa zone de confort pour acquérir de nouvelles compétences.

Traitement du projet

L'opération actuelle

Une opération de cathétérisme cérébral se déroule de la manière suivante : Le chirurgien insère un petit cathéter (un tube mince et flexible) à travers une artère périphérique, généralement dans l'aîne ou le poignet, et guide le fil du cathéter à travers les vaisseaux sanguins jusqu'aux artères cervicales qui alimentent le cerveau, en utilisant des images radiographiques en temps réel (fluoroscopie) pour visualiser le trajet du fil du cathéter. Un C-arm (cf. figure 4) par exemple, est un moyen permettant d'obtenir une imagerie grâce aux rayons X. L'opération peut cependant être très difficile à réaliser, surtout pour des chirurgiens débutants, et peut durer de 30 minutes jusqu'à 4 heures pour les opérations les plus complexes. Cette durée peut être expliquée par la difficulté à diriger le fil du cathéter et réussir à prendre le bon chemin lorsqu'on arrive à un carrefour. Le chirurgien doit aussi guider le fil du cathéter en l'insérant à la main.

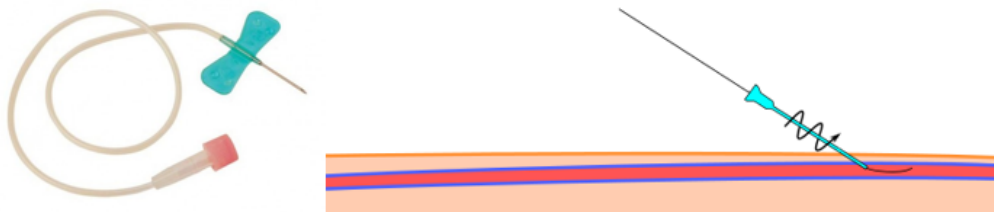


Figure 3 : Cathéter



Figure 5 : Table de fluoroscopie c-arm Philips

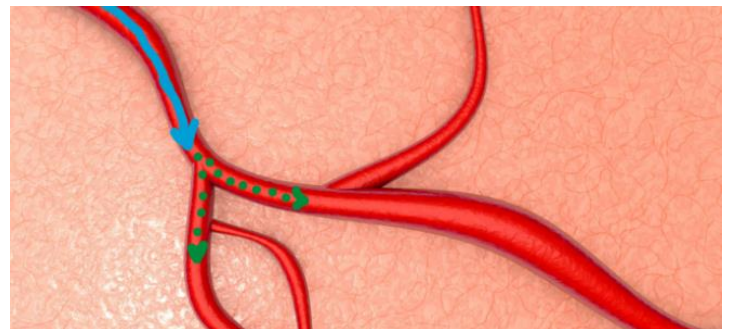


Figure 4 : Carrefour de vaisseaux sanguins

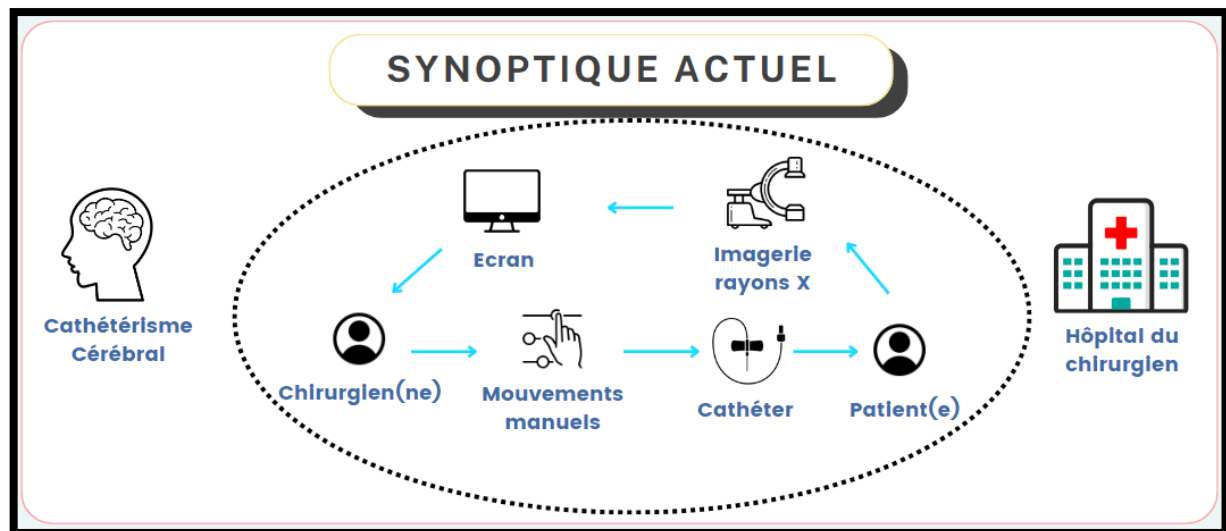


Figure 6 : Synoptique 1 : l'opération actuelle

Partie 1 : Comment robotiser une opération de cathétérisme

L'opération de cathétérisme étant très manuelle nous allons d'abord chercher à remplacer les mouvements du chirurgien par des machines.



Figure 7 : Entrées et Sorties de la robotisation

Pour cette partie nous avons identifié 2 mouvements du chirurgien à robotiser, **le déplacement du fil du cathéter ainsi que son orientation**. Dans un premier temps, nous avons travaillé sur un robot kuka, modèle IIWA 7R, qui a été mis à notre disposition par l'établissement. Ensuite, nous avons mis en place un dévidoir commandé par le chirurgien pour déplacer le fil du cathéter.

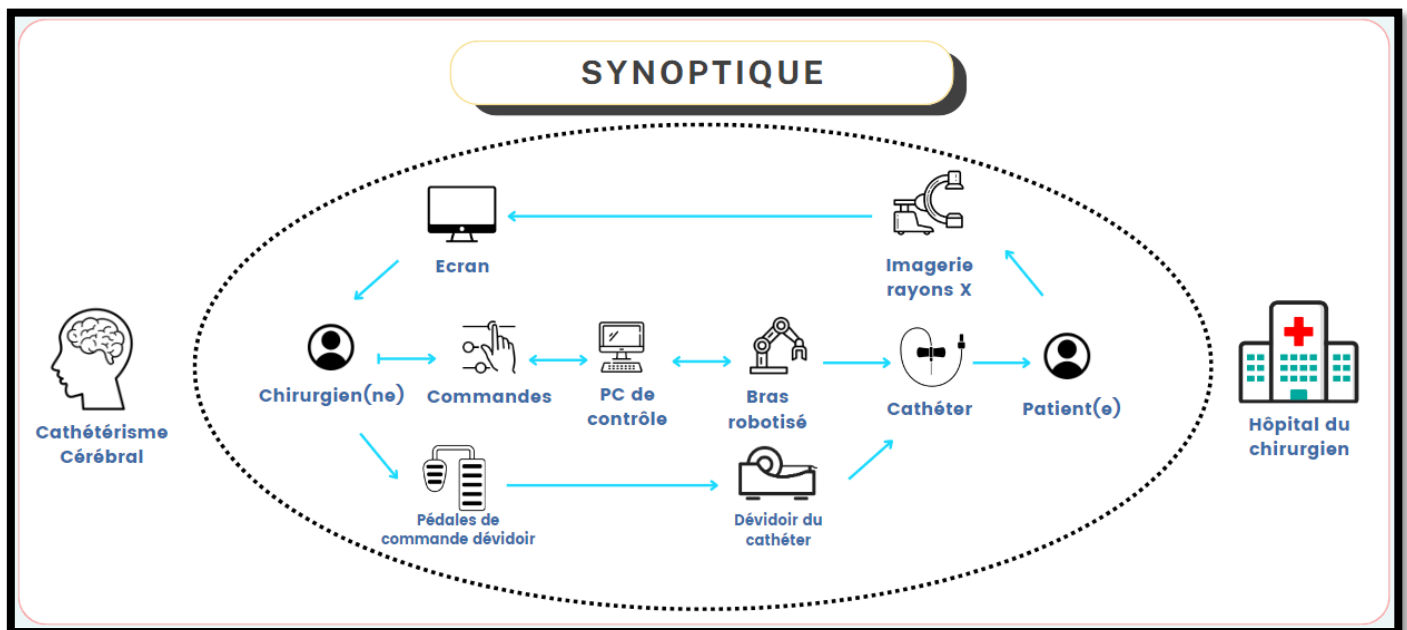


Figure 8 : Synoptique 2 : L'opération robotisé

Bras robotisé KUKA

Notre premier objectif a été de contrôler le robot kuka et pour cela, nous avons utilisé le logiciel Kuka sunrise pour implémenter un programme sur le robot que l'on peut lancer lorsqu'on le met en automatique sur le teach pendant. Ensuite nous avons utilisé la librairie « Kuka sunrise toolbox » pour communiquer avec un programme serveur sur le Kuka qui répond à un client matlab sur un pc relié par Ethernet au robot.

Cela nous a permis de contrôler le robot avec matlab, et pour pouvoir le contrôler avec CoppeliaSim nous avons établi une liaison entre les deux via la « Remote API » pour faire en sorte que le robot Kuka reproduise la position de chaque articulation du robot dans la simulation CoppeliaSim.

Dévidoir

La partie dévidoir a été considérée hors périmètre pour ce projet, son utilisation contribue au bon fonctionnement du système, d'où sa mention, mais il n'a pas été étudié ni implémenté dans le prototype.

CoppeliaSim

Nous avons choisi CoppeliaSim pour notre projet car il a été abordé dans notre parcours à HEI, ce qui a facilité sa prise en main. CoppeliaSim est également compatible avec Chai3D et MATLAB. Chai3D est une bibliothèque open-source utilisée pour la simulation haptique et la visualisation 3D. Les données de simulation de CoppeliaSim sont ensuite récupérées et utilisées dans MATLAB pour mettre à jour en temps réel la position de notre robot. Cette chaîne d'intégration fait de CoppeliaSim un outil idéal pour le développement et le test de nos algorithmes dans un environnement simulé avant leur déploiement sur le robot physique.

Présentation de la scène

Dans cette scène virtuelle, nous avons cherché à nous rapprocher le plus possible de la réalité. Ainsi, nous y retrouvons les éléments suivants :

Nous avons utilisé notre robot Kuka LBR iiwa 7 R800, qui était à notre disposition durant ce projet. En nous basant sur ce modèle, nous avons mis à l'échelle tous les autres éléments de la scène 3D. Parmi ces éléments nous avons un phantom et son support pour représenter les artères d'un patient, et une table, pour simuler un environnement aussi réaliste que possible.

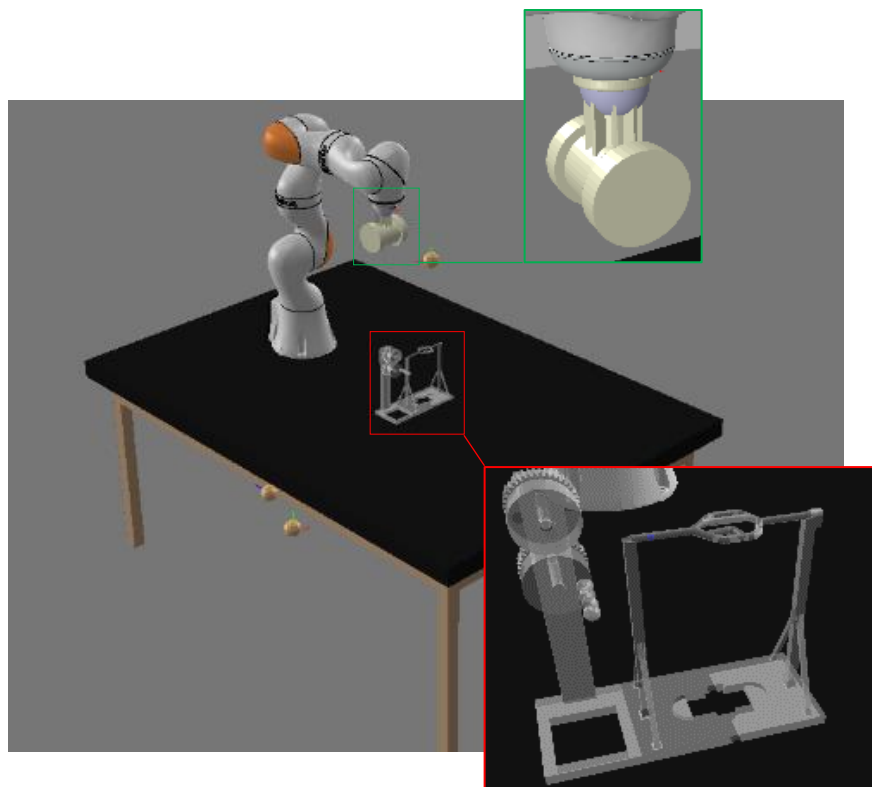


Figure 9 : Visuel sur la scène 3D global

En utilisant exactement les mêmes objets que dans la réalité, nous nous assurons que la simulation soit aussi proche que possible de la situation réelle. Cela garantit une représentation précise et fidèle de l'environnement médical, ce qui est essentiel pour une formation efficace et une précision optimale.

De plus, en rendant les fichiers STL translucides, nous permettons une visualisation claire de la position du fil du cathéter tout en maintenant l'intégrité visuelle de la simulation.

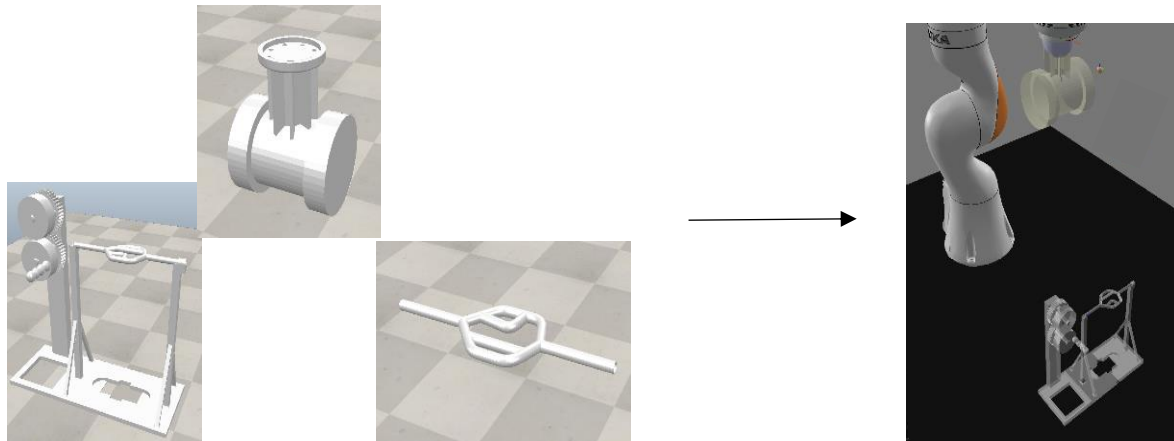


Figure 10 : Importation des fichiers STL

Nous avons choisi de simplifier au maximum notre environnement 3D pour deux raisons majeures. Premièrement, en épurant la scène à ses éléments essentiels, nous permettons aux chirurgiens de se concentrer sur les informations cruciales. Deuxièmement, cette simplification entraîne des gains de performance, réduisant la quantité d'informations à traiter, et améliorant le confort visuel et l'immersion globale de l'utilisateur.



Figure 11 : Plan simple scène 3D

Partie 2 : La téléopération

La téléopération consiste à contrôler une machine à distance, dans notre cas d'application, nous nous intéressons à la téléopération des moyens, remplaçant les mouvements manuels du chirurgien, développés dans la partie 1.



Figure 12 : Entrées et sorties de la téléopération

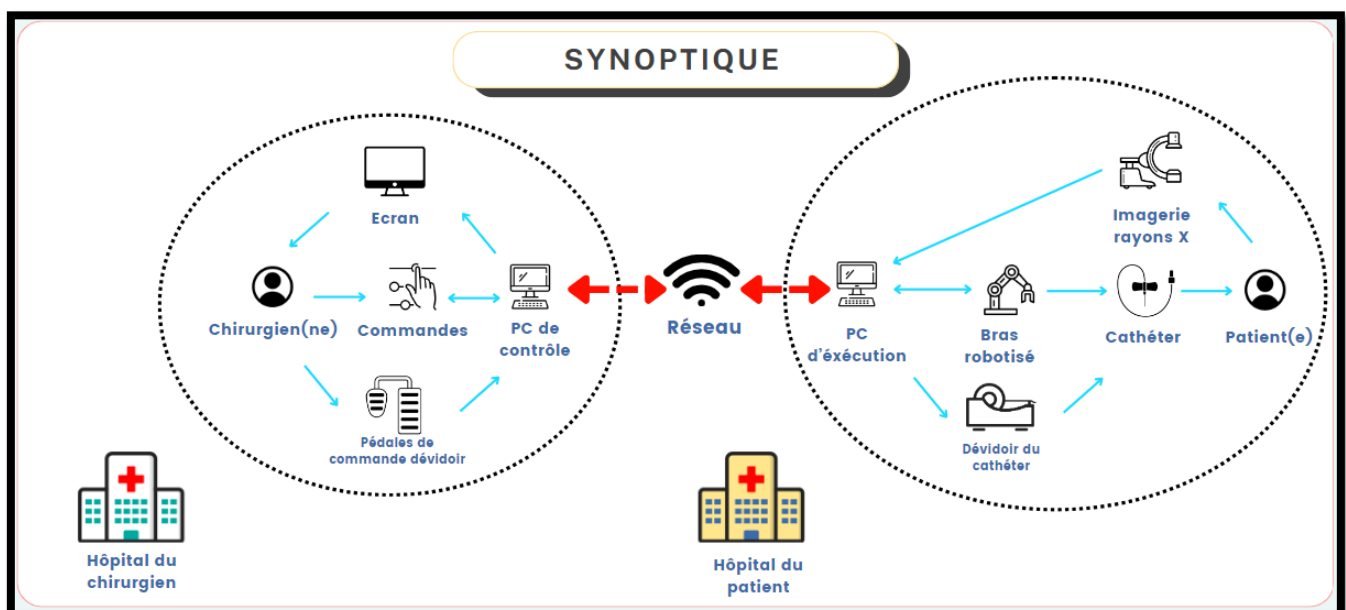


Figure 13 : Synoptique 3 : La Téléopération

La manipulation du robot à distance doit être fiable, fluide et intuitive. Dans cette partie nous allons nous intéresser au contrôle à distance et le caractériser.

Comme expliqué précédemment, c'est en 2001 qu'a eu lieu l'opération Lindbergh la toute première télé opération chirurgicale. Ce fut un succès avec une latence moyenne de seulement 155 millisecondes et cela a montré la faisabilité de la chirurgie à distance. Néanmoins cette opération a demandé des moyens titanesques avec plus de 2 ans de préparation, 80 personnes impliquées et des millions d'euros pour la mener à bien. Cette opération a donc plutôt servi d'exemple que de mise en pratique pour une utilisation régulière de la télé opération.

La latence

Les principaux indicateurs pour mesurer la qualité d'une connexion sont le débit, la latence et la gigue.

1. Le débit : la vitesse de votre connexion

Le débit, exprimé en mégabits par seconde (Mbps), représente la quantité de données pouvant être transmises par votre connexion en une seconde. Plus le débit est élevé, plus votre connexion sera rapide. Le débit descendant correspond à la vitesse de réception des données tandis que le débit ascendant correspond à la vitesse d'envoi des données.

2. La latence : le temps de réaction

La latence, exprimée en millisecondes (ms), représente le délai entre l'envoi d'une requête et la réception de la réponse. Plus la latence est faible, plus votre connexion sera réactive. Une latence faible **est indispensable** pour notre application qui est un travail en temps réel. Lorsque la latence est élevée cela peut se traduire par des décalages, des à-coups avec l'interface haptique et donc une perte importante de la précision et manipulabilité de notre système.

3. La gigue : la variation de la latence

La gigue, également exprimée en millisecondes (ms), représente la variation de la latence. Une gigue faible indique une connexion stable, tandis qu'une gigue élevée se traduit par des fluctuations de la latence. Une gigue élevée peut causer des interruptions, des saccades et des problèmes de qualité audio ou vidéo. C'est également essentiel pour notre application d'avoir une gigue la plus faible possible.

La latence acceptable

Selon une étude du CHRU de Nancy [B], un temps de retard inférieur à 100 millisecondes est considéré comme idéal pour un système de télécommunication dédié pouvant être atteint en téléchirurgie. Ce délai correspond au laps de temps entre le moment où le chirurgien effectue une action et le moment où les instruments chirurgicaux à distance réagissent. À l'inverse, un temps de retard supérieur à 300 millisecondes introduit des imprécisions significatives dans le maniement des instruments. Cela peut gêner le déroulement de l'opération et potentiellement mettre en danger le patient.



La cybersécurité

Les structures médicales recueillent et traitent des données de santé qui sont particulièrement sensibles et se revendent à prix d'or. Les rançongiciels sur les hôpitaux peuvent également rapporter beaucoup d'argent, ainsi en 2023 il y a 422 établissements français qui ont été ciblés par des cyberattaques dont 32% ont été contraints de mettre en place un système dégradé de prise en charge des patients.

Une cyberattaque peut en effet non seulement perturber le quotidien des professionnels, mais aussi mettre en péril la prise en charge des patients : Systèmes biomédicaux paralysés, plateaux techniques indisponibles, données de programmation des soins détruites, systèmes de messageries en panne, données de gestion et de ressources humaines perdues, données personnelles de santé usurpées...

Les cyberattaques ciblant les hôpitaux passent donc par un système connecté à internet et accessible à tous comme les systèmes de messageries, les échanges de données des patients sur différents serveurs distants ou le réseau wifi de l'hôpital. Ce qui n'est pas le cas de notre système qui est isolé du reste et relié uniquement avec une ligne spécialisée.

Des chercheurs ont étudié certains dangers de la téléopération [C] avec des cyberattaques comme Denial-of-service attack (DoS) ou man-in-the-middle (MiTM) et ont observé que l'on pouvait ainsi perturber le robot en augmentant son temps de latence voire lui transmettre de mauvaises commandes.

Ce danger très important n'a cependant été observé que dans le cas de réseaux publics (l'étude porte notamment sur l'hypothèse de l'utilisation de robots chirurgicaux dans des zones difficiles comme des communautés rurales de pays en voie de développement ou des zones de guerre) puisque ces cyberattaques ne sont pas possibles sur un réseau privé et il faut des approches bien plus complexes pour s'attaquer à de telles infrastructures.

Les risques seraient donc plutôt des attaques par l'intérieur puisqu'il faut un accès sur la ligne pour s'introduire sur le réseau.

Moyens existants

La téléopération chirurgicale en milieu hospitalier nécessite un réseau performant et fiable. Plusieurs technologies clés sont alors indispensables : un haut débit et un faible temps de latence, garantis par des circuits MPLS dédiés ou par le réseau émergent 5G.

On retrouve plusieurs exemples en Chine d'utilisation de la 5g pour des téléopérations avec une latence moyenne de 264ms [E]

Dans le cas de la 1^{ère} téléopération en 2001 c'est une liaison filaire ATM (Asynchronous Transfer Mode) qui avait été utilisée, cette technologie est très efficace pour les réseaux longue distance privés. De nos jours on utilise plutôt la technologie MPLS (Multiprotocol Label Switching) qui est supportée par les routeurs modernes et également très efficace pour des réseaux longues distances privés.



Moyen retenu

Pour effectuer l'opération les deux hôpitaux seraient donc connectés avec la fibre et une liaison MPLS dédiée au robot.

La sécurité du réseau est primordiale, elle serait assurée par des pare-feux, des tunnels VPN et des systèmes de détection/prévention d'intrusion. La redondance des connexions et la qualité de service (QoS) assurent quant à elles la continuité et la fiabilité du réseau pendant l'intervention. Enfin, la supervision du réseau permet d'identifier d'éventuels problèmes avant qu'ils ne perturbent le déroulement de l'opération.

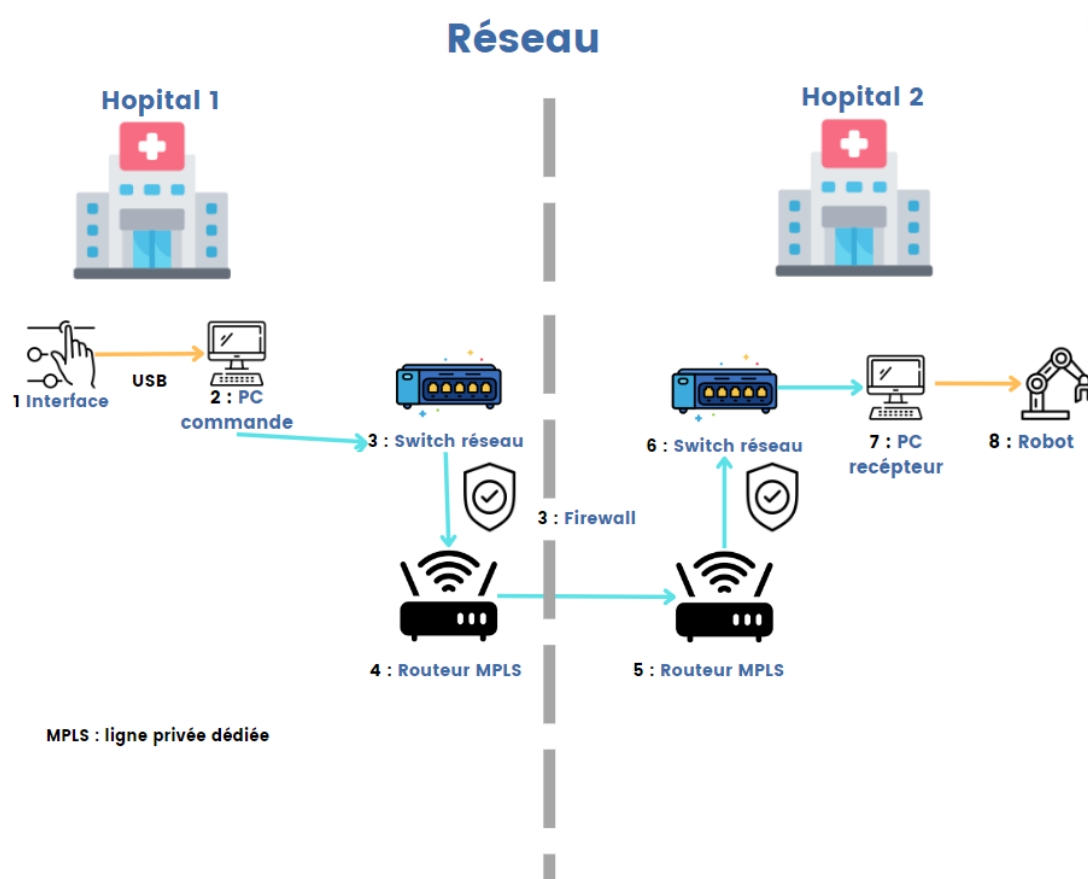


Figure 14 : Schéma du réseau

Pour notre prototype puisque nous ne disposons pas de ligne réseaux avec la fibre dédiée à notre utilisation nous avons choisi d'utiliser une box 5g pour communiquer sans fil avec de bonnes performances. Nous avons connecté les 2 PC sous le même réseau et espérons par la suite pouvoir utiliser 2 réseaux différents mais cela entraînait trop de latence.

Essais

Dans un premier temps nous avons testé simplement la latence d'un contrôle à distance de PC envers un autre.

Avec Parsec :

Clien t A	Hôte B	Distance AB	Latence	Bitrate	Etat connexion client	Etat connexion Hôte B
4g A	4g B	1 m	100- 10000 ms	0.07 Mbps	H+	
Wifi A	Wifi B				Impossible de faire les tests	La sécurité de la CCI bloque ces tests
4g A	5g B		200 ms	0.38 Mbps	Ping 71 2296 1432 Down 46 Up 1	
5g A	4g B	1 m	134 ms		Ping 173 488 1257 Down 16 Up 1	
5g A	5g A	1 m	2ms	1,7 Mbps	Ping 43 1174 1669 Down 118 Up 1	Ping 43 1174 1669 Down 118 Up 1
4g A	4g B	30 m	120 ms	?	?	

Ensuite nous avons comparé le débit de transfert de données par partage de port USB avec différentes conditions :

User	Receiver	Vitesse transmission kb/s	Application	VPN
4g nul	4g D	10 à 40	souris	Hamachi
4g D	4g M	200	souris	Hamachi
4g D	4g M	25	Haptic desk	Hamachi
4g D	4g M	228	Souris	Zero tier
4g D	4g M	17	Haptic desk	Zero tier
4g D	4g D	220	Haptic desk	Rien
4g D	4g D	180	CoppeliaSim	Rien
4g M	Fibre	31	Haptic desk	Hamachi

Finalement il y a peu de débit mais nous avons réussi à faire fonctionner l'interface haptique avec Hamachi et ZeroTier donc ce n'est pas un problème de VPN. Nous avons un bon débit avec la souris, ce n'est donc pas une limite fixe mais plutôt due à l'interface haptique en elle-même et non à USB over network. Nous retrouvons le même problème de latence avec l'ordinateur d'Arnaud et celui de Dimitri ou de Mathias, ce n'est donc pas non plus le PC qui limite le débit.



Limite d'utilisation sur un seul réseau

Lorsque nous avons testé sur 2 réseaux différents nous avons utilisé un VPN tel que Hamachi ou Zero tier pour établir un accès entre les 2 ordinateurs. Chacun de nos tests avec 2 réseaux induisait trop de latence, nous avons donc choisi de rester sur un seul réseau pour notre prototype. Quelques pistes d'améliorations pour diminuer la latence et régler ce problème seraient :

- Disposer d'un réseau 5g professionnel ou d'une connexion filaire avec la fibre pour avoir un meilleur débit et une très faible latence.
- Utiliser 1 seul environnement de programmation, actuellement notre projet utilise du C++ pour l'interface haptique, matlab pour commander le robot et CoppeliaSim pour la simulation et définir les positions que le robot doit prendre. Cela ajoute donc du délai pour chaque transfert de données d'un environnement envers un autre.
- Implémenter sur l'interface haptique une segmentation du retour d'information avec une période d'échantillonnage plus longue. Actuellement l'interface haptique nécessite un retour d'information très rapide ce qui la rend très sensible à la latence ou la perte de paquets de données. Si on modifiait ce fonctionnement cela pourrait réduire l'influence du réseau sur le retour de force que ressent l'utilisateur.

Conclusion

Nous répondons ainsi à la problématique de la téléopération, car notre prototype fonctionne à distance bien qu'elle soit limitée puisque les 2 ordinateurs sont sur le même réseau. Lors de nos tests nous avons établi la connexion avec 2 réseaux différents en passant par un VPN mais cela induisait trop de latence pour notre prototype.

Partie 3 : Le feedback haptique

Une fois la téléopération effectuée nous avons commencé à répondre à une autre problématique de la téléchirurgie, le manque de retour sensoriel, repères auxquels sont habitués les chirurgiens formés. Dans un premier temps nous avons introduit une technologie permettant de simuler le toucher.

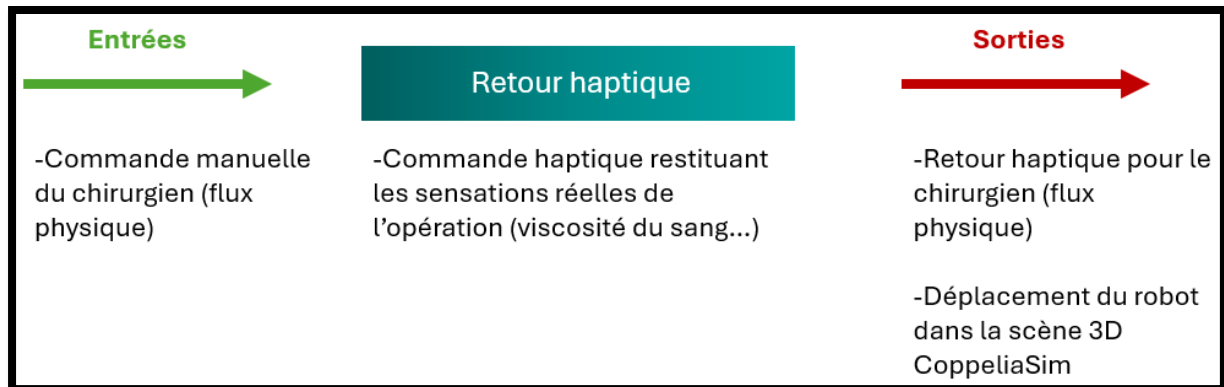


Figure 15 : Entrées et sorties du dispositif haptique

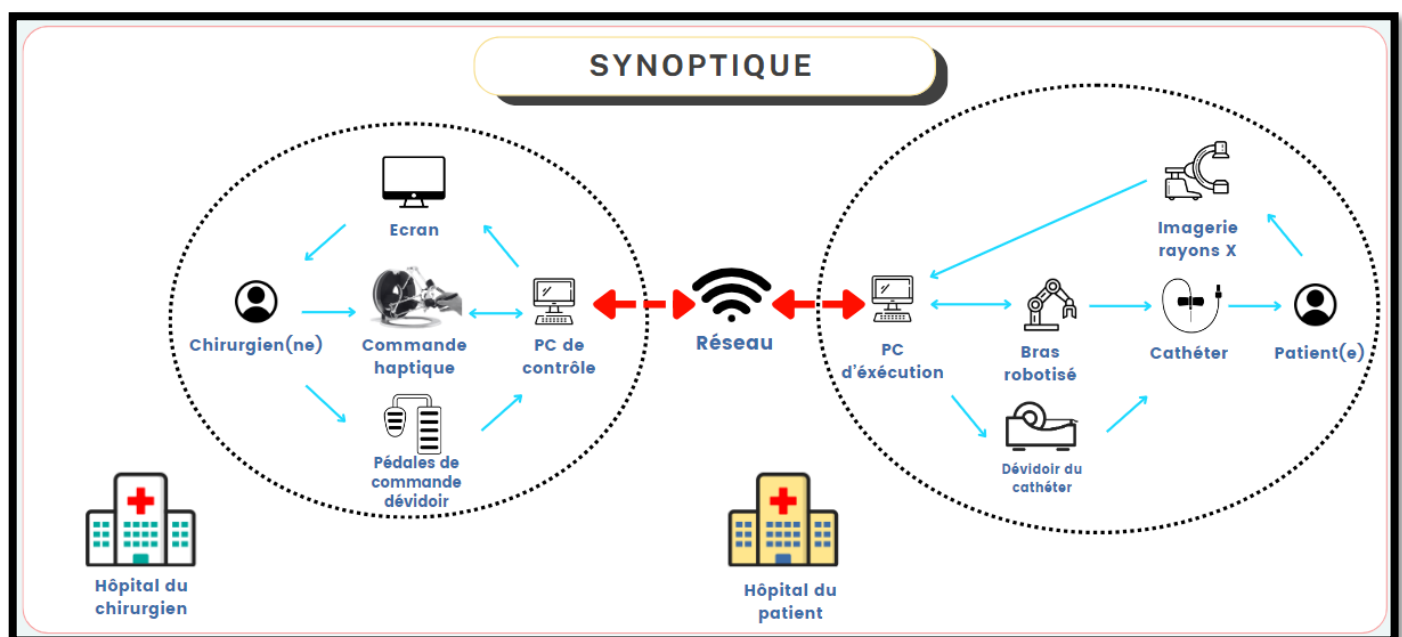


Figure 16 : Synoptique 4 : Retour haptique

Par définition, un dispositif haptique est un système physique qui permet à son utilisateur d'intervenir dans un environnement virtuel. La particularité de ce dispositif est qu'il permet d'obtenir un retour sensoriel appelé perception kinesthésique. On retrouve par exemple des

retours haptiques sur des objets vibrants comme les téléphones portables ou certaines montres. On utilise également cette technologie dans la médecine pour la laparoscopie ou la **téléopération**.

Il existe donc des dispositifs permettant d'imiter et de rendre palpable des environnements virtuels à travers la dynamique du système : poids, inertie, frottements et textures. Lors d'une opération chirurgicale à distance, il est nécessaire que le chirurgien soit capable de ressentir la réalité des caractéristiques physiques du patient. Depuis l'utilisation du retour haptique dans le domaine de la téléopération, la précision des tâches a significativement augmenté.

Afin de répondre au mieux aux besoins de l'opération, le dispositif doit être capable d'avoir une maniabilité et une opérabilité la plus réaliste possible par rapport à l'exécution de l'opération chirurgicale.

À titre d'exemple, pour réaliser les études du prototype, nous avons utilisé le dispositif haptique Omega 6 de *Force Dimension*. Par le biais de ce dispositif haptique, le chirurgien est capable de commander et ressentir les effets du fil du cathéter dans l'environnement humain.

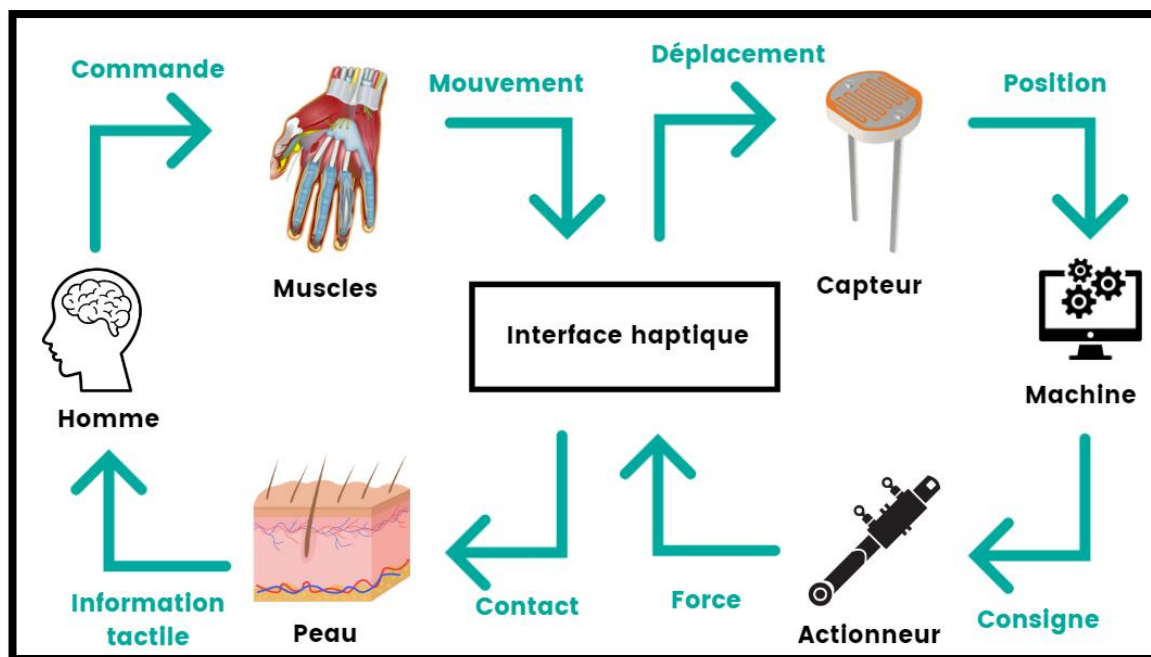


Figure 17 : Schéma de fonctionnement d'un dispositif de commande haptique

Nous retrouvons la pertinence de la commande Omega 6 grâce au nombre de degrés de liberté (3 rotations et 3 translations) ainsi qu'à sa capacité d'utilisation : Ø160x110 qui répondent au besoin de l'application réelle. De plus, le fournisseur Force Dimension met à disposition son kit de développement logiciel (SDK) permettant d'intervenir sur les aspects d'utilisation de la commande (programmation des boutons, gestion dynamique des forces et des vitesses etc...). Enfin, le modèle Omega 6 possède un processeur intégré qui surveille la vitesse en temps réel et permet le freinage électromagnétique du dispositif haptique si des problèmes surviennent sur l'ordinateur hôte.



Figure 18 : Omega 6 de Force Dimension

Le retour d'information haptique est donc primordial pour la réussite de l'opération chirurgicale. La précision et le contrôle s'en retrouvent grandement améliorés, il est aisé de démultiplier les effets de pression et de viscosité pour assurer une marge d'intervention plus restrictive. Cela permet également de réduire le taux d'erreur, le dispositif haptique peut permettre de bloquer des gestes involontaires ou trop direct, de plus il assure une précision que même les chirurgiens les plus expérimentés n'ont pas. Enfin, avec un retour tactile, les chirurgiens peuvent davantage se focaliser sur le guidage du fil du cathéter plutôt que sur l'interprétation visuelle et cognitive des mouvements.

Ainsi, la commande haptique, par l'intermédiaire du logiciel Coppeliassim, permet de diriger l'effecteur du robot Kuka et donc le fil du cathéter (uniquement dans la scène virtuelle). Le retour haptique, lui, vient du fil du cathéter de la scène virtuelle par rapport à son environnement.



Figure 19 : Contrôle de l'aimant de la scène virtuelle avec la commande

Le guidage du fil du cathéter à travers le système artériel (représenté par un réseau planaire de \varnothing intérieur 5 mm pour notre prototype) est donc réalisé à l'aide de la commande haptique. Ce guidage est utilisé pour aider à la direction à prendre lors d'un carrefour dans le réseau artériel. Le médecin utilise donc la commande haptique pour orienter le fil du cathéter vers la direction choisie. Un système annexe permet au chirurgien d'assurer la fonction d'avancer/reculer le fil du cathéter dans le réseau artériel. En effet, le fil du cathéter étant soumis à la pression sanguine (effort mécanique principal dans les artères), il va facilement suivre longitudinalement les artères.

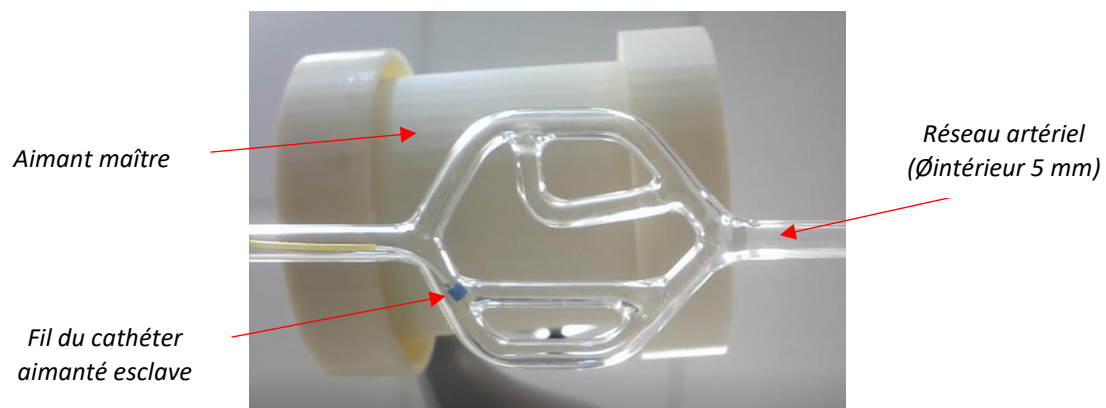


Figure 20 : Exemple du fil du cathéter à un carrefour de directions

Limitations et difficultés rencontrées

De nombreuses études sur le retour haptique mettent en avant les problèmes rencontrés pour la création d'une scène virtuelle mise à jour en temps réel. L'intervention d'un opérateur dans la boucle de commande du retour haptique intègre des instabilités, c'est pourquoi le modèle se doit d'être stable. La latence du système de téléopération se doit d'être extrêmement performante. Il faut prendre en compte que pour avoir un retour haptique de qualité, il faut un pas de « mise à jour » de la scène très petit pour correspondre au plus proche à la réalité. C'est cette opération qui est lourde et qui crée une instabilité et des vibrations lors de retours haptiques sur le dispositif.

Conclusion

Pour conclure, le ressenti haptique doit faire partie intégrante de la chirurgie. Le médecin en charge de l'opération par téléopération doit avoir le même ressenti que s'il réalisait ses actions sur le patient directement. Le système se doit de fonctionner en boucle fermée pour des raisons de sécurité. En d'autres termes, en raison de la précision exigée par l'opération (\varnothing artère < 5mm), un retour d'information continu doit avoir lieu pour vérifier la position du fil du cathéter et donc du système de commande haptique. Afin d'avoir une immersion complète et pour réduire la charge cognitive, il est nécessaire de coupler plusieurs technologies de substitution de ressenti. La perception de la profondeur en fait partie.

Partie déplacement du robot sur CoppeliaSim

Tout d'abord nous avons choisi de mettre le robot dans une position bien spécifique avant de le déplacer.

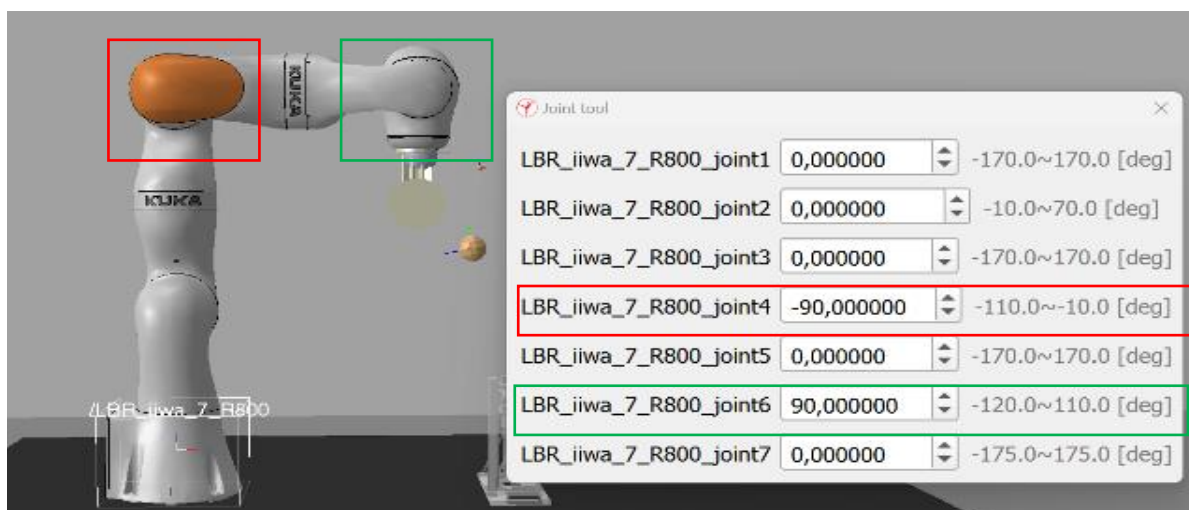


Figure 21 : Position du robot dans la scène 3D

Cela permet une manipulation plus précise et facilite la prise en main du robot. En partant d'une position standardisée, il devient plus facile d'atteindre avec précision les points souhaités.

Nous avons spécifiquement choisi d'orienter ces deux joints de cette manière car, pour notre utilisation - accéder au Phantom placé sur une table plate devant le robot - cette position nous semble être la plus optimisée. Dans d'autres cas d'utilisation (Phantom 3D, patient réel, ...), il serait nécessaire de déterminer la position initiale des joints la plus adaptée pour garantir une précision et une simplicité de mouvement similaires.

L'effecteur de notre robot fonctionne comme un curseur sur un ordinateur. La commande haptique déplace l'effecteur du robot dans la scène 3D. Tous les joints du robot s'ajustent intelligemment pour atteindre la position de la sphère dans l'espace défini. Nous contrôlons donc le robot par le principe du modèle géométrique indirect (MGI).

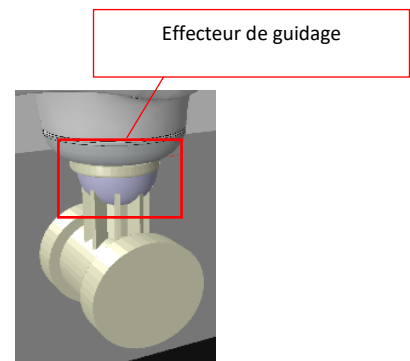


Figure 22 : Zoom sur l'effecteur 3D

Cette approche permet une interaction intuitive et précise, car l'utilisateur peut manipuler la sphère en temps réel avec la commande haptique. Les algorithmes de cinématique inverse de CoppeliaSim calculent automatiquement les angles nécessaires pour chaque joint afin que l'effecteur suive la trajectoire de la sphère de manière fluide et efficace. Cela simplifie grandement le contrôle du robot et améliore la précision des mouvements, rendant le système idéal pour des tâches nécessitant une manipulation délicate et précise.

Nous avons envisagé l'utilisation de deux modes de déplacement pour notre robot, chacun ayant des avantages spécifiques. La sélection de ces deux modes se fait par l'appui du bouton de notre commande haptique.



Figure 23 : Bouton de changement de mode

Le premier mode permet au robot de se déplacer de manière linéaire en utilisant la translation. Nous avons ajouté sur ce mode la rotation du dernier axe en fonction de la

rotation du stylo de la commande haptique, offrant des mouvements fluides et précis dans un espace sans obstacle, comme celui du Phantom en plan 2D.

Le deuxième mode combine des translations avec des rotations sur les axes, permettant des mouvements plus complexes et précis tout en offrant une grande stabilité. Ce mode étant destiné à être utilisé dans un cas où le Phantom est sur un plan 3D.

Sécurité : Zone accès du robot et mise en place de mur virtuelle.

Pour sécuriser notre prototype, nous avons mis en place plusieurs solutions pour limiter les mouvements du robot.

La première consiste à créer des murs virtuels. Dès que le robot touche un mur, il est bloqué et ne peut pas le franchir, ce qui est renforcé par un retour haptique sur la commande, limitant ainsi les déplacements. Pour ajouter ces murs, nous avons créé des formes dans le code Lua pour contraindre notre effecteur, simulant ainsi la présence d'un mur virtuel. Ces murs apparaissent uniquement lors du lancement d'une simulation.

Malgré ces murs, la vitesse du robot restait trop élevée. Pour la réduire, nous avons ajusté la zone d'accès du robot dans CoppeliaSim. En réduisant cette zone, nous réduisons aussi la vitesse du robot. Par exemple, avec une grande zone, un petit mouvement sur la commande haptique entraîne un grand déplacement du robot. En restreignant la zone, un petit mouvement correspond à un petit déplacement, rendant le robot plus lent et plus sécurisé.

Cependant, cette réduction de la zone d'action doit être soigneusement calibrée pour maintenir un accès complet au champ d'opération du Phantom. Trop restreindre la zone pourrait limiter l'accès à certaines parties essentielles.

Ainsi, pour sécuriser les déplacements du robot, nous avons trouvé un compromis entre l'espace de travail, la vitesse du robot et la position des murs virtuels.

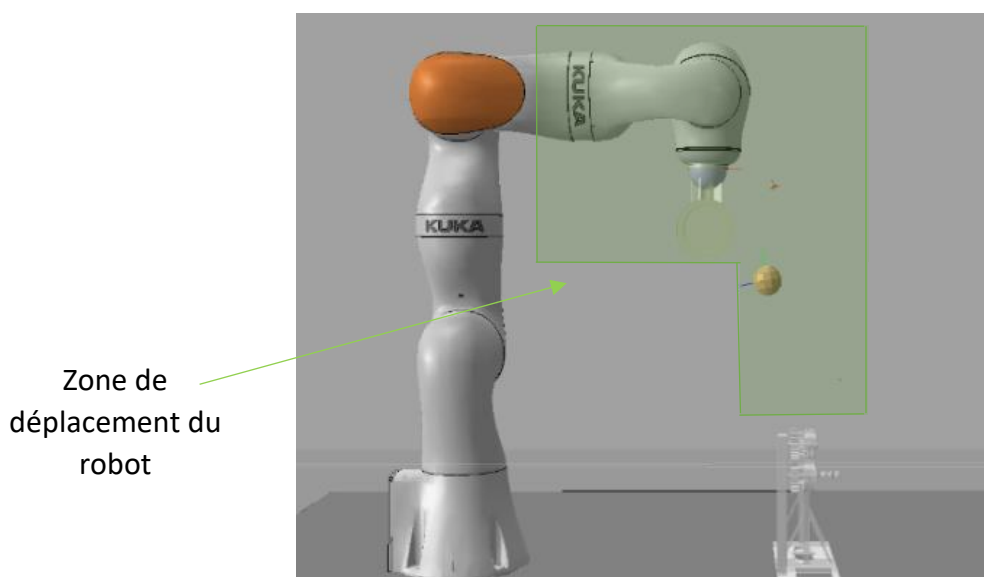


Figure 24 : Zone d'accès du robot

Partie 4 : Le feedback visuel

Pour aller plus loin dans le projet nous avons décidé d'introduire le deuxième retour sensoriel demandé par les chirurgiens : la vue. En effet dans l'opération actuelle les chirurgiens visualisent soit des images caméra, soit une scène 3D sur un écran en 2D, de ce fait ils doivent déplacer la caméra pour visualiser différents endroits, cela ajoute une charge mentale si nous devons introduire une nouvelle commande pour le chirurgien. Ainsi nous avons opté pour la réalité virtuelle qui permet au chirurgien de voir intuitivement la scène 3D, avec la sensation de profondeur à laquelle il est habitué.

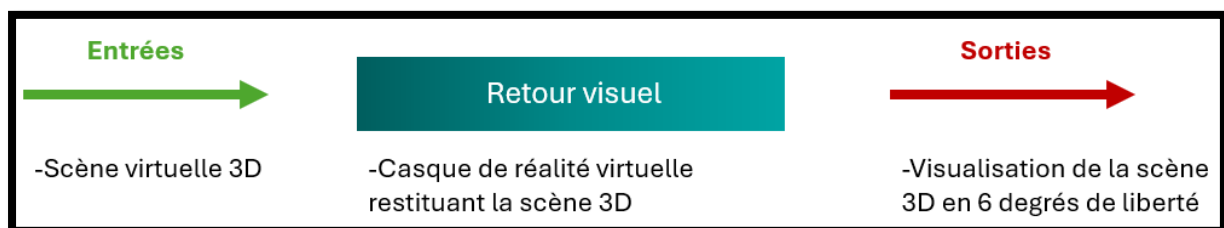


Figure 25 : Entrées et sorties du casque de réalité virtuelle

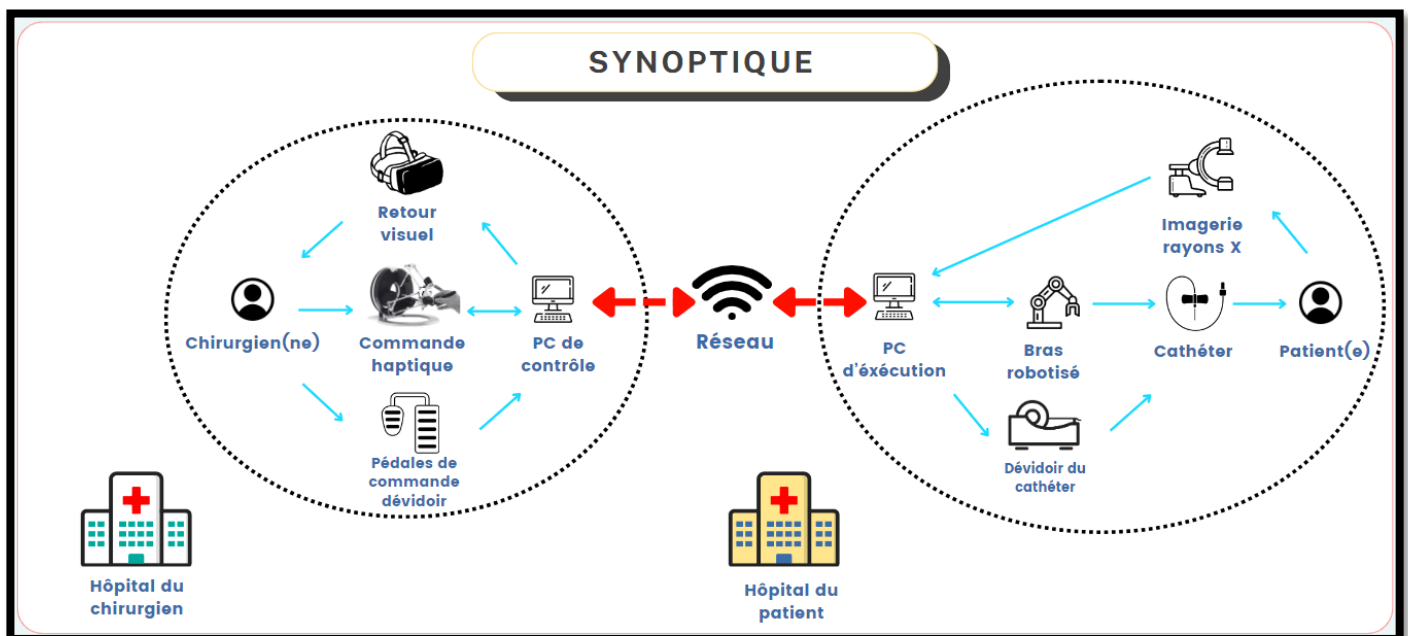


Figure 26 : Synoptique 5 : Retour visuel

Pour assurer le succès et la sécurité de ces interventions à distance, il est essentiel d'intégrer des mécanismes de retour d'information pour les chirurgiens. L'utilisation d'un casque de réalité virtuelle (VR) pour fournir un feedback visuel représente une avancée significative dans ce domaine. Ce développement explore les raisons pour lesquelles le feedback visuel est crucial et comment il peut être intégré efficacement via un casque VR dans le contexte de la télé-opération d'un instrument médical.

Précision

Lorsque les opérateurs téléopèrent un instrument médical, ils doivent avoir une perception précise de l'environnement dans lequel ils travaillent. Un feedback visuel en temps réel leur permet de visualiser avec précision l'emplacement de l'instrument et toute autre structure pertinente (cathéter, patient, robot KUKA). La VR permet d'évoluer dans un espace virtuel grâce à des capteurs et ainsi donner une sensation de « réalité » et une immersion poussée.

Perception de la profondeur

La perception de la profondeur est indispensable en chirurgie pour éviter les erreurs de positionnement de l'instrument et pour manipuler avec précision les tissus. C'est une des raisons pour laquelle le casque VR est plus intéressant qu'une caméra 2D. Un feedback visuel en VR permet aux opérateurs de percevoir la profondeur et la distance avec plus de précision qu'il n'en aurait simplement en regardant la scène sur un écran, ce qui est essentiel pour des interventions chirurgicales réussies.

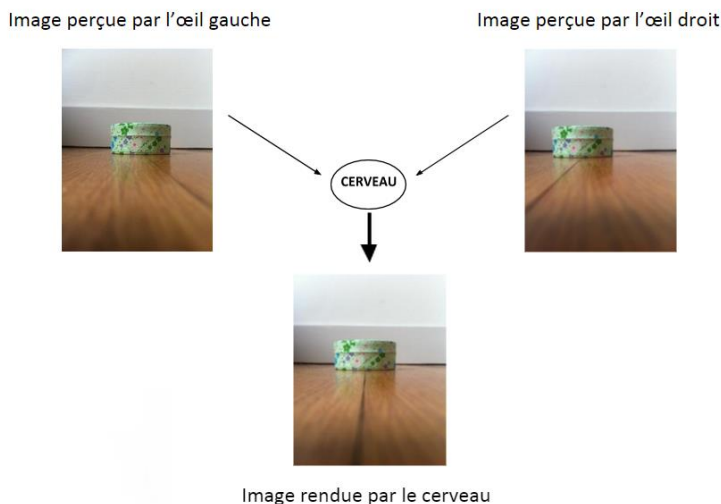


Figure 28 : Interprétation des images par le cerveau



Figure 27 : Affichage dans un casque VR

Confiance et confort

La télé-opération d'instruments médicaux peut être stressante pour les opérateurs, en particulier lorsqu'ils ne sont pas physiquement présents sur le site de l'intervention. Un feedback visuel en temps réel via un casque VR renforce la confiance des opérateurs en leur fournissant une vision claire et détaillée de l'environnement de travail, ce qui peut réduire le stress et améliorer la précision des mouvements. Ils sont également moins sujets à la distraction et peuvent se concentrer de manière plus optimale sur l'opération.

À la suite d'une télé-opération en Italie, Leonardo Mattos, chef du laboratoire de robotique biomédicale de l'Institut italien de technologie expliquait : « *Les chirurgiens ont l'impression d'être directement dans la salle. Ils ressentent également moins de stress pendant les actions délicates car les dispositifs robotiques offrent une grande stabilité et des mouvements fluides, ce qui leur permet d'être plus précis et confiants pendant l'opération* ».



Figure 29 : Casque VR META Quest 2

Nous avons fait le choix de mettre en place un feedback visuel « virtuel », c'est-à-dire avec une scène virtuelle. Ce choix est motivé par la facilité d'utilisation, de transmission, d'ajustement et d'application ainsi que le coût intéressant de la mise en place de cette solution. Le feedback virtuel consiste à transmettre au casque VR, un retour d'une scène 3D virtuelle comportant une modélisation de l'environnement réel, et une mise à jour en temps réel des éléments en mouvement tels que le bras robot KUKA ou le cathéter. La scène de l'environnement chirurgical doit être parfaitement alignés sur l'environnement réel. La deuxième solution aurait été de mettre en place un retour réel avec une caméra 360°. Cependant, cette solution est très onéreuse et bien plus consommatrice de bande passante internet.

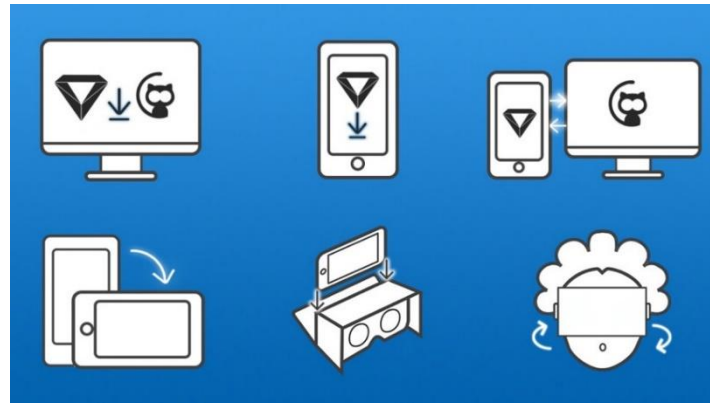


Figure 30 : Application VRidge

Avant de partir sur un achat de casque VR, nous avons eu la chance de voir une application sortir en accès anticipé au mois de février nommée VRidge. Cette application permet de simuler un casque VR avec son smartphone, ce qui nous a permis d'en tester la plus-value en amont.

Intégration de la VR dans la scène virtuelle

Nous avons en entrée du processus des images classiques provenant de CoppeliaSim. Ensuite nous utilisons une interface créée par le chercheur doctorant Boris Bogaerts. Cette interface implémente la VR dans CoppeliaSim de manière fluide et ergonomique. Elle permet de se déplacer librement dans la scène 3D et d'entrer en immersion en utilisant au maximum les capteurs du casque VR et les gyroscopes pour obtenir 6 degrés de liberté. Les mouvements de tête contrôlent la caméra virtuelle de la scène 3D.

Partie vision par tracking

Pour récupérer les informations sur la position du fil du cathéter nous utilisons un programme Matlab qui, à l'aide d'une caméra, va déterminer les coordonnées du cathéter dans l'espace à l'aide d'une détection par la couleur bleue. Cela va nous permettre de faire bouger une sphère dans CoppeliaSim, nous affectons ensuite à cette sphère bleue, les coordonnées créées par Matlab. De cette façon nous pouvons voir la position du cathéter en temps réel sur la scène CoppeliaSim.

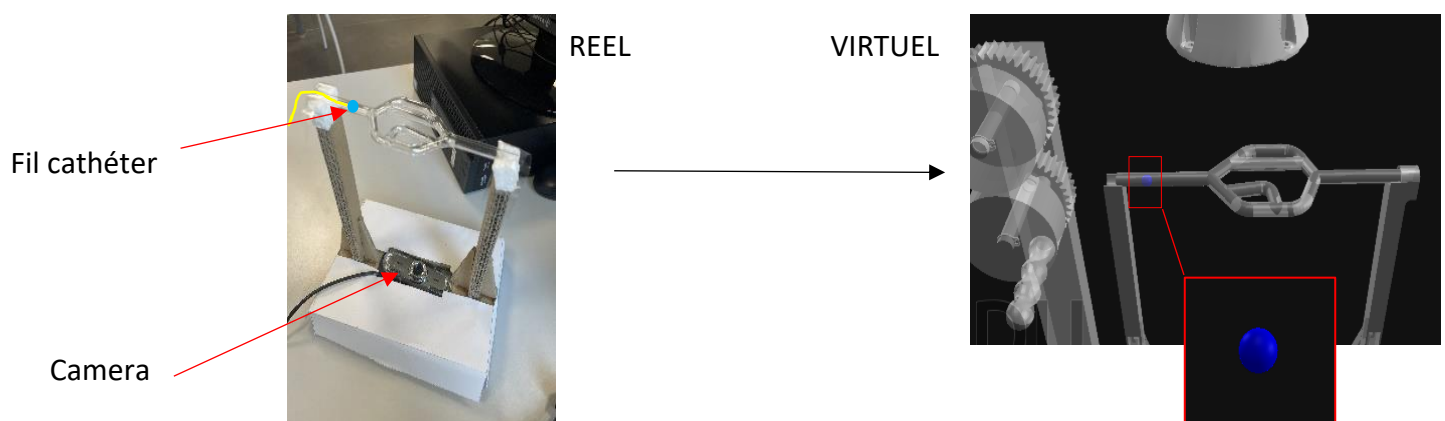


Figure 31 : Explication tracking camera entre réel et virtuel

Conclusion sur la plus-value de l'utilisation d'une scène 3D

L'utilisation d'une scène 3D offre en effet un retour d'informations visuelles en temps réel sur ce qui se passe à distance, ce qui est particulièrement utile dans des domaines comme la chirurgie où la précision et la compréhension de l'environnement sont essentielles. Cette représentation virtuelle permet de recréer l'environnement chirurgical de manière précise et immersive, offrant ainsi une meilleure visualisation et compréhension des procédures.

La scène 3D crée un environnement plus proche, plus précis et plus accessible que les méthodes traditionnelles telles que l'utilisation de caméras devant l'opération. En permettant une immersion totale dans l'environnement simulé, elle offre une expérience plus intuitive et réaliste pour le chirurgien, ce qui lui permet de rester concentré sur la tâche à accomplir.

Au-delà de ces retours visuels, l'environnement CoppeliaSim (notre scène 3D) nous permet de contrôler notre robot de manière intuitive grâce à notre commande haptique.

En résumé, l'utilisation d'une scène 3D dans ce contexte permet non seulement d'avoir un retour visuel sur les actions effectuées à distance, mais aussi de créer un environnement virtuel plus immersif et précis, ce qui contribue à améliorer la concentration et la performance du chirurgien.



L'opération telle que nous l'envisageons

Enfin, afin de garantir l'harmonie et le bon fonctionnement de notre système il nous faut introduire des technologies complémentaires.

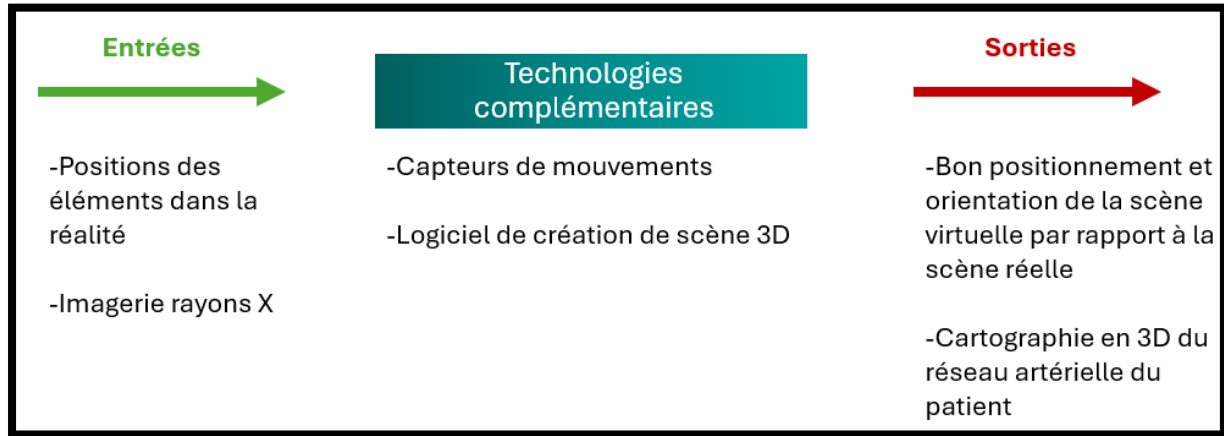


Figure 32 : Entrées et sorties des technologies complémentaires

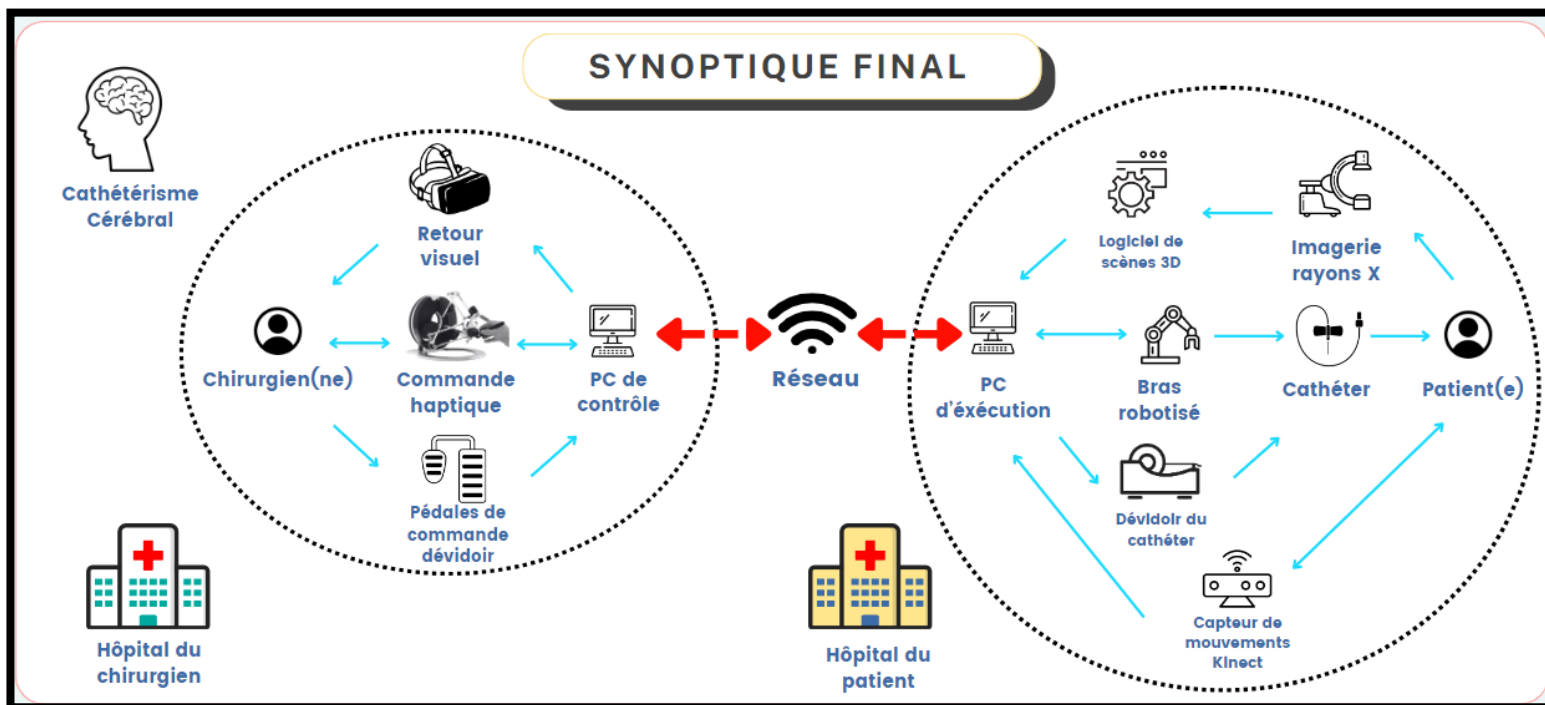


Figure 33 : Synoptique 6 : Technologies complémentaires

Technologies complémentaires

Les PC :

Afin de traiter toutes les données échangées il faut que le PC du chirurgien, et le PC dans la salle du patient, soient assez puissants. Nous avons pu constater lors de nos essais une différence considérable avec un PC portable et un PC fixe. Voici les configurations des deux PC pour mettre en avant les facteurs influents :

Composant	PC portable : Asus ROG Zephyrus M16	PC fixe : OMEN 40L GT21-1531nf - NVIDIA® GeForce RTX™ 4060 Ti
Processeur	Intel 12th gen Alder Lake, up to Core i9-12900H, 6C+8c/20T	AMD Ryzen™ 9 7900
Carte Graphique	Intel UHD + Nvidia GeForce RTX 3070Ti Laptop 8GB (up to 120W with Dynamic Boost)	NVIDIA® GeForce RTX™ 4060 Ti (8 GB)
Memoire	32 GB DDR5-4800 (16 GB onboard, 1x DIMM, up to 48 GB)	32 GB RAM
Stockage	2 TB SSD (Samsung PM9A1) – 2x M.2 PCI 4.0 x4 slots	1 TB SSD
Connectivité	WiFi 6E (Intel AX211) 2x2 with Bluetooth 5.2, 2.5Gigabit LAN (Realtek RTL8125)	?
Ports	2x USB-A 3.2 gen1	2x USB-A 3.2 gen1

Pour avoir une opération fluide il est préférable d'avoir minimum **16 Giga de RAM**, et un **processeur 14 cœurs et 5 GHz** dans la configuration des PC.

La Kinect :



Figure 34 : Kinect

L'utilisation de la Kinect dans le domaine de la télé chirurgie médicale pour aligner une scène réelle sur une scène 3D virtuelle est justifiée par la facilité de mise en place et sa précision comparée à une caméra classique. La Kinect, un dispositif de capture de mouvement développé par Microsoft, est largement connue pour ses capacités à détecter les mouvements du corps humain et à reconstruire des scènes tridimensionnelles en temps réel.

En l'intégrant à notre système de téléchirurgie, elle permet d'assurer le bon positionnement et l'orientation des éléments de la scène 3D.

L'idée est d'aligner la scène réelle capturée par la Kinect sur la scène virtuelle CoppeliaSim. Cet alignement est essentiel pour garantir que le chirurgien dispose d'une représentation précise de l'anatomie du patient lors de l'opération à distance. La Kinect est utilisée pour capturer la scène réelle, y compris le patient et le dispositif chirurgical, en temps réel. Cette étape peut se faire sur MatLab, ce qui est un avantage car nous l'utilisons déjà pour la simulation.

Pour faire coïncider les mouvements de la scène réelle sur la scène virtuelle nous avons utilisé l'add-on KinectV2 pour Matlab. Des techniques de reconnaissance de recalage d'image et de suivi de la pose intégrées à cet add-on ont été très utiles pour détecter les repères anatomiques dans la scène réelle et retranscrire les mouvements détectés sur un objet de la scène virtuelle, cela grâce au RemoteAPI.

Une fois que la scène réelle est alignée avec la scène 3D virtuelle, le chirurgien peut visualiser l'anatomie du patient et les instruments chirurgicaux superposés en temps réel. Cela permet au chirurgien de planifier et d'exécuter l'intervention chirurgicale à distance avec une précision accrue.

Tout au long de l'opération, le système peut ajuster automatiquement l'alignement des données en fonction des mouvements du patient et des variations dans la scène chirurgicale grâce à l'utilisation de la Kinect. Dans la pratique, c'est un C-Arm qui capturera les images nécessaires, au moment souhaité. Cela garantit que le chirurgien dispose toujours d'une représentation précise de l'anatomie du patient pendant toute la durée de l'intervention.

Le C-arm :

Un C-Arm est un appareil d'imagerie médicale spécialisé qui utilise les rayons X pour produire des images en temps réel des structures internes du corps. Son nom vient de la forme distinctive en « C » du bras, qui permet de positionner la source de rayons X et l'intensificateur d'image sur les côtés opposés du patient. Il fournit des images radiographiques haute résolution en temps réel et sous n'importe quel angle, permettant ainsi au médecin de surveiller les progrès et d'apporter immédiatement les corrections. Ces images de radiographies, permettent de créer une base de données qui peut ensuite être transmise à un logiciel de scènes 3D pour recréer une cartographie du réseau artériel du patient. N'ayant accès à ce genre de dispositif, nous l'avons exclu du périmètre de notre projet. Néanmoins la visualisation du cathéter est indispensable, dans notre prototype nous avons donc, comme expliqué précédemment, mis en place un système de détection de couleur avec une caméra, un phantom transparent, et un cathéter bleu à l'extrémité.



Le logiciel de scènes 3D :

Le logiciel de scènes 3D est aussi en dehors du périmètre de notre projet. Ce genre de logiciel permet de créer des tomographies, c'est-à-dire reconstruire des volumes à partir de mesures. Il existe plusieurs logiciels intéressants permettant d'arriver à notre produit souhaité, comme InVesalius, qui est open source et développé pour le médical. Faute de temps, et sans base de données, nous n'avons pas pu réaliser des essais avec ce logiciel. Notre objectif final étant de créer à partir d'images du C-arm, une cartographie du réseau artériel du patient, pour que le chirurgien puisse le visualiser dans la scène 3D.

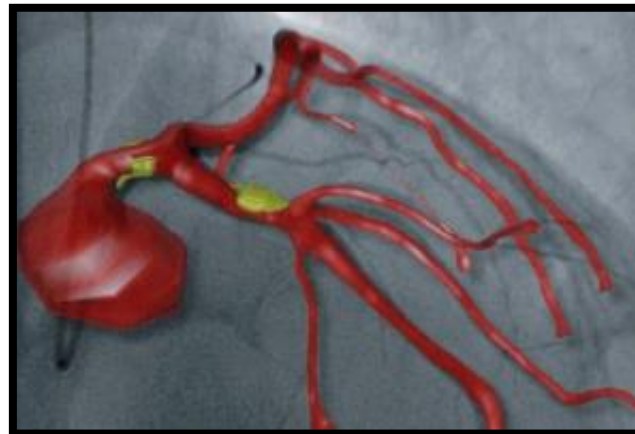


Figure 35 : Cartographie 3D de « Shina Systems »

Solution finale

Après avoir intégré toutes les technologies nécessaires, et développés tous les programmes servant à faire fonctionner le système, nous obtenons les schémas suivants :

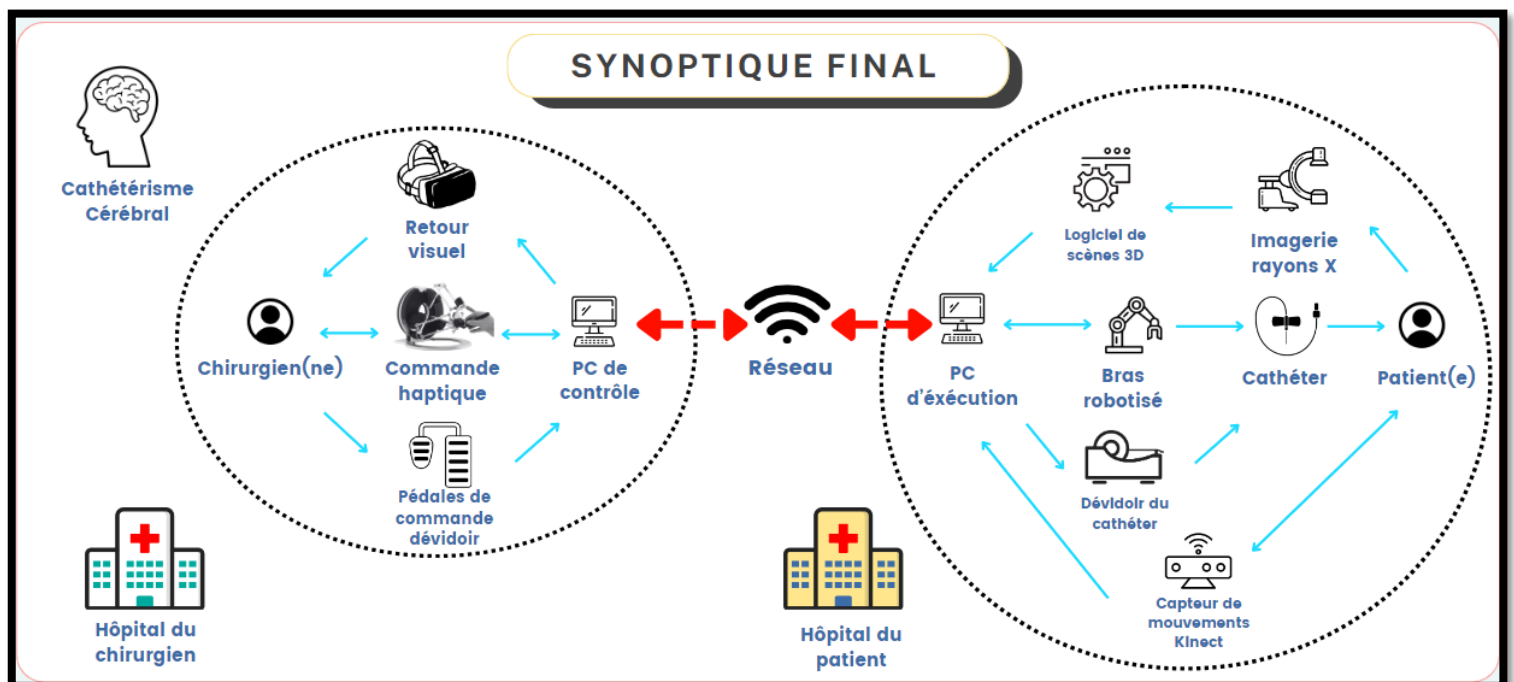


Figure 36 : Synoptique 7 : solution finale

Concernant les programmes développés, voici un schéma récapitulatif :

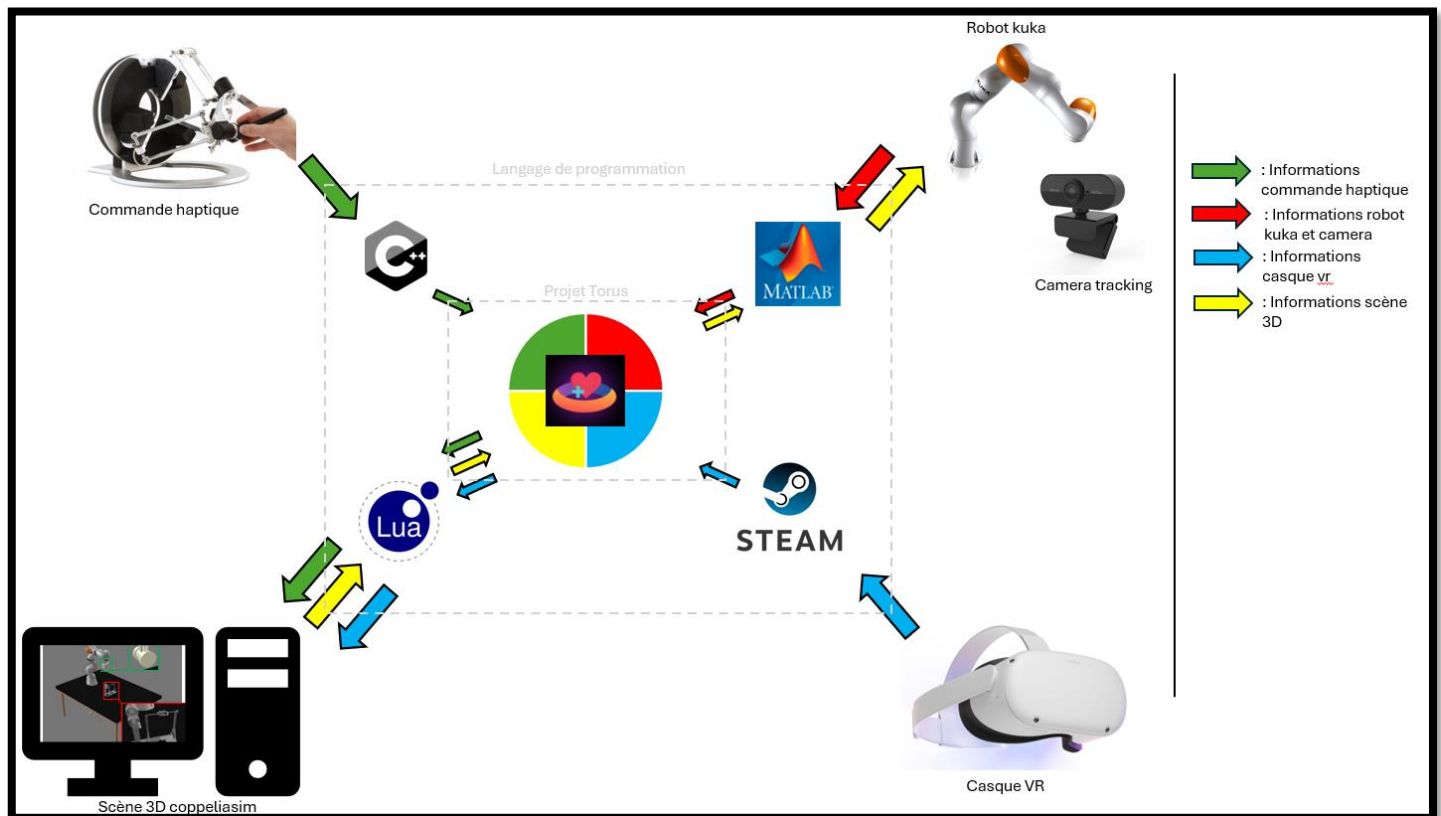


Figure 36 : Architecture des différents environnements de logiciel/programme utilisés

Nous avons ainsi développé des programmes sur Matlab, sur CoppeliaSim, en Lua, et en C++. Le cœur de notre travail était de réussir à faire communiquer ces logiciels entre eux, et de manière efficace pour ne pas surcharger et ralentir la communication entre nos moyens.

Prix estimatif de notre solution

Pour le prix final de notre solution nous ne pouvons qu'offrir un prix estimatif étant donné que nous ne connaissons pas assez le prix des équipements biomédical, en plus de tous les éléments auxquels nous n'avons sûrement pas pensé puisque nous n'avons pas réalisé d'étude approfondie sur le coût réel du système. Nous ne savons pas non plus combien coûterai un réseau dédié, et pour le matériel informatique le prix varie fortement. Néanmoins, nous sommes positifs que notre solution reste abordable puisque les hôpitaux possèdent déjà la plupart de l'équipement nécessaire, et si nous nous intéressons simplement aux moyens que nous introduisons nous obtenons le prix estimatif suivant :

Objet	Prix
Casque VR Meta Quest 2	300.00 €
Kinect	49.99 €
Kuka LBR iiwa 7R800	73,700.00 €
Force dimension Omega 6	18,425.00 €
Système dévidoir	? €
Licenses pour logiciels	160.00 €
Total estimé	92,634.99 €

Prototype

Concernant le travail réalisé, voici un schéma récapitulatif :

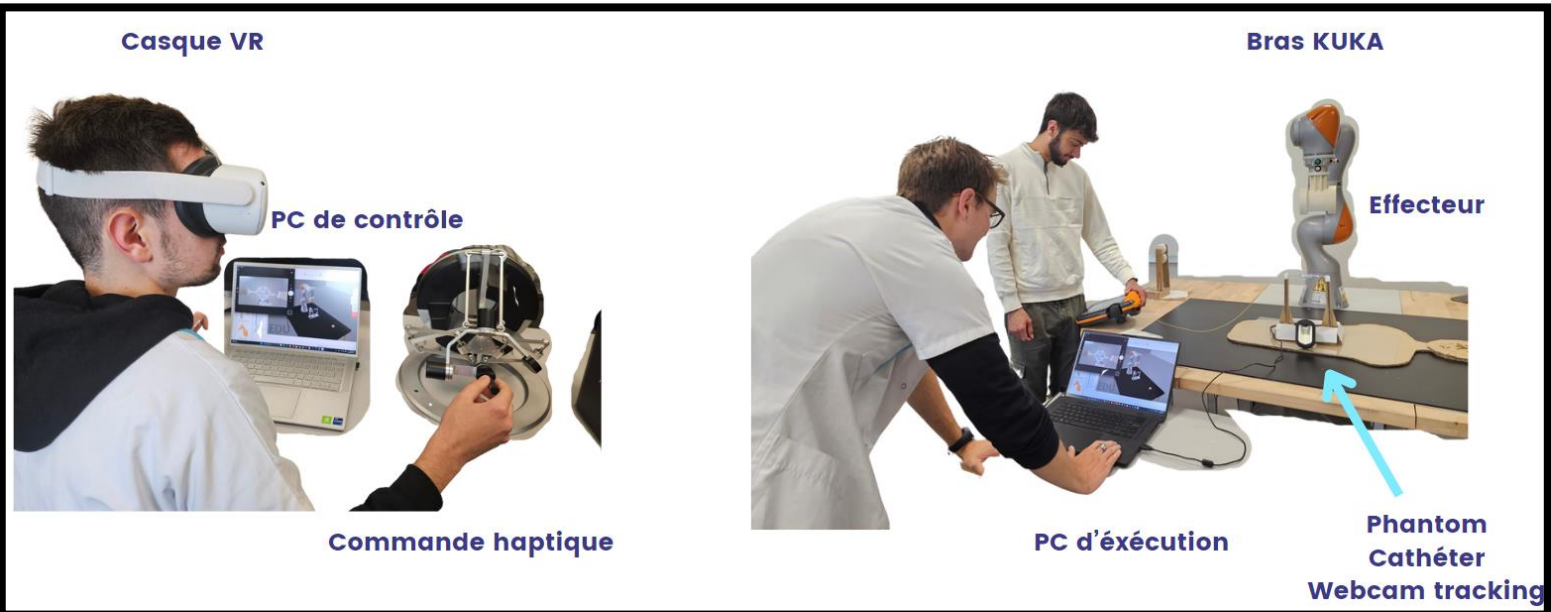


Figure 37 : Prototype final

Prix du prototype et utilisation du budget

Sur les 500€ attribués par JUNIA HEI nous avons dépensé 397,98€ dans les objets suivants :

Objet	Achat sur facture
Box 5G Bouygues	47.99 €
Casque VR Meta Quest 2	300.00 €
Kinect	49.99 €
Total estimé	397.98 €

Le reste des éléments dans notre prototype était du matériel mise à notre disposition par les doctorants et notre tuteur M.Belharet. Nous les remercions à nouveau, car c'est grâce à ce prêt de matériel que nous avons pu réaliser notre prototype. Nous avons complété le prototype avec des matériaux que nous avons déjà sous la main.

Retour sur le travail d'équipe et individuel

Retour de l'équipe

Globalement nous sommes très heureux et fiers de ce projet, c'est pour cela que nous n'avons pas hésité à communiquer sur les réseaux l'avancement de notre projet. Posts linkedIn <https://linkedin.com/company/torus-hei> et page vitrine <https://robot-torus.carrd.co/>. Avec l'aide de ces outils nous avons eu l'occasion de présenter notre projet à des intervenants extérieurs pour recueillir leur avis, par exemple nous avons eu au téléphone une étudiante en médecine et un chirurgien maxillo-facial.

Retours personnels

Arnaud GODET

Ce fut un projet difficile avec beaucoup de technologies complexes en interaction et malgré ces difficultés j'ai beaucoup apprécié travailler sur ce projet avec mon équipe. Grâce à mes compétences je me suis rapidement impliqué dans la programmation et la téléopération. Passionné par le biomédical je me suis renseigné sur beaucoup de choses dans le domaine médical autour de notre sujet lors des veilles. J'ai par exemple réalisé l'état de l'art des technologies les plus avancées, les cathétérismes les plus courants, ... Ce projet pour moi est une belle réussite et je suis fier d'y avoir participé.

Carelle LIAMIDI

Avec mon parcours scolaire assez varié, j'ai déjà eu l'occasion de réaliser différents projets. Mais avec le PISTE et maintenant le POC à HEI, c'est une toute nouvelle approche et défi qui se présente à moi. Tout d'abord la taille de l'équipe, cinq personnes c'est assez conséquent et ce n'est pas toujours facile de se faire comprendre.

Ensuite le rythme d'alternance, il a fallu se garder du temps pour développer le projet pendant nos périodes d'entreprises et la plus grande difficulté était que nous n'avions pas accès au bras robotisé kuka en dehors des périodes de cours.

Concernant le projet, on parlait d'une problématique un peu vaste et on accédait à des éléments au fur et à mesure et surtout, je parlais de loin étant donné que je n'ai aucune compétence dans les domaines de la programmation et réseaux. Malgré la complexité du sujet, j'ai aimé contribuer (veille téléchirurgie, aspect médical du projet, création du site internet) du mieux que je pouvais sur ce projet et je suis ravie du résultat final.

Et pour finir, je souhaiterais surtout remercier l'intégralité des membres du groupe TORUS avec qui j'ai pu travailler tout au long de l'année, ils ont abattu un travail considérable.

Dimitri MINVIELLE

Le projet était intéressant. Il était difficile de se projeter sur un prototype concret au début de l'année, cependant j'ai été surpris de la réussite de nos efforts. J'ai apprécié travailler sur des aspects (l'haptique ou la réalité virtuelle) que je n'avais pas eu l'occasion d'intervenir dans ma scolarité. Le domaine du réseau est quant à lui une déception car ce n'est pas un domaine où notre groupe pouvait faire ses preuves.



Kaëlig PLANTARD—LUNNY

Ce projet fût une nouvelle aventure pleine d'obstacles, obstacles que nous avons vus très tôt et tout au long de l'année. Dès le début il fût difficile de s'organiser, trouver le travail pertinent à réaliser, puis l'attribuer. En effet dans notre équipe il y avait un déséquilibre important entre les compétences de chacun, ajouté à cela notre sujet nécessitait des connaissances importantes en informatique et réseaux. Heureusement Arnaud GODET possédait les compétences nécessaires, il a su lancer le projet dans la bonne direction. Mathias FOYER et Dimitri MINVIELLE ont su se montrer motivés et très utiles, à travers leur volonté d'apprendre de nouvelles compétences et soutenir Arnaud dans le développement des programmes. Ensuite Carelle à su transmettre au reste du groupe ses acquis dans le domaine médical et les recherches qu'elle à menée pour mieux comprendre notre cas d'application. Enfin Léo GOURBIN, qui a travaillé sur les technologies complémentaires de notre projet, a contribué à la finalité du projet. Je tiens à remercier mon équipe pour le travail qu'ils ont fourni. Pour ma part le travail réalisé semble moins intéressant, j'ai assuré du mieux que je pouvais l'organisation et l'avancement du projet, cependant trop d'imprévus ont souvent changé le planning, et nous n'avons pas réussi à maintenir nos efforts et notre motivation de manière continue. Cherchant à développer plus de compétences j'ai passé beaucoup de temps à rechercher plus de moyens pour améliorer notre système. Finalement, toutes ces parties ont été mis hors périmètre. Je suis déçu de ne pas avoir pu assister Arnaud, Mathias et Dimitri sur la programmation, surtout étant donné que c'est un domaine dans lequel je suis à l'aise. Aussi, les livrables de vidéo et poster que j'ai réalisé, bien qu'amusant, n'ont pas réellement de valeur ajoutée à notre projet face au prototype. Je regrette aussi d'avoir été un peu trop ambitieux, et nous n'avons pas su atteindre notre vision finale, cependant Arnaud, Mathias, Dimitri et moi avons décidé de poursuivre avec M. BELHARET ce projet afin d'atteindre cette vision. Cette fois-ci j'espère pouvoir mieux centrer et planifier nos objectifs, ainsi que de contribuer au travail de programmation.

Léo GOURBIN

Le projet était vraiment intéressant et même si le début était un peu flou, il était incroyable de voir l'avancée du projet tout du long. Lors du PISTE de HEI 3, j'avais gagné en communication avec les membres de mon groupe, compétence que j'ai approfondie dans ce POC. De plus, les nombreux domaines que comportait le projet TORUS m'a permis de monter en compétences dans des logiciels comme Matlab et CoppeliaSim.

Les membres de mon groupe ont su également communiquer de manière efficace et mention spéciale au chef de projet Kaëlig qui s'est montré très responsable sur le déroulement du projet et qui a su coordonner les forces et faiblesses de chacun pour mener à bien TORUS.

Mathias FOYER

J'ai trouvé ce projet très enrichissant. En effet, la majeure partie du projet reposait sur des bases nouvelles que je n'avais jamais encore étudiées. Le fait de l'inclure dans ce POC m'a permis de développer de nouvelles compétences, telles que le réseau. Au fil de mon travail sur la scène 3D CoppeliaSim, j'ai pu améliorer mes compétences en termes de programmation en langage Lua. Malgré la complexité de ce projet au vu des compétences nécessaires pour



l'accomplir, je suis satisfait du rendu que nous avons proposé pour cette année. Je suis de plus satisfait par le fait de continuer ce projet l'année prochaine avec certains membres de ce groupe et M.Belharet.

Conclusion et perspectives

Notre problématique était : « *Comment téléopérer un instrument médical ?* », et nos objectifs au départ de ce projet étaient de démontrer la pertinence de la téléopération, à travers l'intégration de retours sensoriels, et en contrôlant nos moyens à distance avec une faible latence. Nous visions aussi à offrir un meilleur outil aux chirurgiens pour raccourcir la durée des opérations et éviter de les exposer aux rayons X. Enfin, nous souhaitions un système qui puisse être plus facilement accessible en cas d'urgence.

C'est avec l'esprit tranquille que nous pouvons dire que nous avons répondu à notre problématique et ces enjeux, grâce à l'intégration d'une commande haptique et un casque VR pour rendre aux chirurgiens les sensations auxquelles il est habitué. Nous avons su développer un système qui connecte plusieurs programmes et langages informatiques, permettant à nos moyens de fonctionner ensemble. Et enfin, nous pouvons contrôler ces moyens à distance avec une latence acceptable.

Il existe cependant des pistes d'amélioration pour ce projet. Tout d'abord réaliser une téléopération stable sur deux réseaux différents, en essayant de passer par un réseau dédié. Ensuite nous voudrions ressentir les effets de la commande haptique sur les artères dans la scène 3D plutôt que de ressentir les murs de sécurité. Pour la partie VR nous sommes satisfaits du résultat et n'estimons pas nécessaire d'aller plus loin. Enfin nous pourrions développer plus les technologies complémentaires que nous avons considérées hors périmètre. Nous pourrions développer un système de dévidoir pour notre prototype, et aussi étudier ses performances et le comportement du cathéter dans un milieu liquide.

Bibliographie

- A. Pocheville. *Modèles comportementaux pour le prototypage virtuel d'objets rigides avec retour haptique*. 2003.
- B. Determination of the latency effects on surgical performance and the acceptable latency levels in telesurgery using the dV-Trainer® simulator
<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01726735>
- C. To Make a Robot Secure: An Experimental Analysis of Cyber Security Threats Against Teleoperated Surgical Robots
<https://arxiv.org/abs/1504.04339>
- D. Telesurgery: Past, Present, and Future
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6067812/>



- E. 5G ultra-remote robot-assisted laparoscopic surgery in China

https://www.researchgate.net/publication/343146995_5G_ultra-remote_robot-assisted_laparoscopic_surgery_in_China

Annexes

Annexe 1 : Casque VR Meta Quest 2 :

<https://www.meta.com/fr/en/quest/products/quest-2/tech-specs/#tech-specs>

Annexe 2 : Kinect Xbox One :

<https://support.xbox.com/fr-BE/help/hardware-network/kinect/kinect-for-windows-v2-setup-with-adapter>

Annexe 3 : Fiche technique Commande haptique, Force Dimension Omega 6

Cf document Annexe 3

Annexe 4 : Fiche technique Robot axe industriel collaboratif 7 axes KUKA Ibr iiwa 7r800

Cf document Annexe 4

