

THÈSE

En vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat

Présenté par : MASMOUDI MOSTEFA

**Prédiction en temps réel de la qualité de service pour la
téléopération à travers le réseau internet**

Faculté : GENIE ELCTRIQUE

Département : D'ELECTRONIQUE

Domaine : ST

Filière : ST

Intitulé de la Formation : SYSTEMES INTELLIGENTS ET ROBOTIQUE

Devant le Jury Composé de :

<i>Membres de Jury</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Domiciliation</i>
Ouamri Abdelaziz	Professeur	<i>Président</i>	USTO-MB
Kaddour El Boudadi Lahouari	MCA	<i>Encadreur</i>	USTO-MB
Ahmed Foitih Zoubir	Professeur	<i>Examineur</i>	USTO-MB
Berrached Nasreddine	Professeur	<i>Examineur</i>	USTO-MB
Mansouri Abdellah	Professeur	<i>Examineur</i>	ENPO
Guezouri Mustapha	Professeur	<i>Examineur</i>	Université d'Oran 1

Année Universitaire : 2016/2017

Remerciements

En préambule à cette thèse, je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de cette thèse.

Je tiens à remercier sincèrement Dr Kaddour El Boudadi Lahouari qui, en tant que encadreur de ma thèse, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de cette thèse, ainsi que l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu me consacrer et sans qui ce travail n'aurait jamais vu le jour.

Je tiens à remercier chaleureusement aussi Monsieur N. BERRACHED, professeur à l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, directeur du laboratoire de recherche en Systèmes Intelligents « LARESI », pour m'avoir bien accueilli au sein de son laboratoire et pour la fourniture des matériels nécessaires pour les travaux effectués dans cette thèse.

Je n'oublierai jamais Monsieur A. LOUKIL et M. Jean Vareille pour leurs orientations et recommandations.

J'exprime mon plus grand respect aux membres du jury d'avoir bien voulu accepter de faire partie de la commission d'examination.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements également à mes parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience, et à tous mes proches et amis (Khlef mohammed, Cheriet Amine, Hamoudi, Boualame, Amoune et le groupe 3BDOT), et tous les autres membres du groupe du laboratoire LARESI, qui m'ont toujours soutenu et encouragé au cours de la réalisation de cette thèse.

Merci à tous et à toutes

Dédicace

Pour mon père et ma mère

Table des matières

Résumé :	9
1. Introduction.....	12
2. Contexte et problématique :	12
3. Contributions :	13
4. Organisation de la thèse :	14
CHAPITRE 1: La Téléopération sur Internet	
Introduction	17
1.1 La téléopération :	17
1.2 La télérobotique :	18
1.3 La réalité virtuelle et la réalité augmentée : Outils indispensables pour la télérobotique : ...	18
1.3.1 La réalité virtuelle :	18
1.3.1.1 Bref Etat de l'art :	18
1.3.1.2 Définition de la RV :	19
1.3.1.3 Quelques domaines d'application de la RV [18] :	19
1.3.2 La réalité augmentée :	21
1.3.2.1 Quelques domaines d'application de la RA :	22
A. Médical :	22
B. Divertissement :	22
C. Formation militaire :	22
1.4 Robotique et Télérobotique :	23
1.5 Les plates-formes existantes sur le Web :	23
1.5.1 Le projet Mercury	23
1.5.2 Le Télé-robot Australien :	25
1.5.3 La plate-forme KheperOn The Web :	26
1.5.4 Rhino et Xavier :	27
1.5.5 Puma-Paint :	28

1.5.6	ARITI :	29
1.5.7	Plateforme de télé-enseignement du laboratoire LARESI :	30
1.6	Conclusion.....	31
 CHAPITRE 2 : Facteurs pouvant influencer la téléopération		
	Introduction	32
2.1	Le service fourni par un réseau informatique :	32
2.2	La qualité de service d'un réseau informatique :	32
2.3	Métriques de mesure de la qualité de service du réseau :	33
2.4	Mesure de QoS sur Internet :	33
2.5	Facteurs pouvant influencer la téléopération :	34
2.6	Téléopération avec délais dans la littérature :	36
2.7	Délais sur Internet	36
2.8	Evaluation de la Qualité du service en Algérie :	38
2.9	Aides proposées pour réduire l'influence du délai sur internet :	43
2.10	État de l'art sur les méthodes de prédiction :	43
	A. La précision de la prédiction :	45
	B. Le temps de calcul :	45
2.11	Séries Temporelles :	45
	2.11.1 Le processus Auto Régressif, Moyenne mobile (ARMA) :	46
	2.11.2 Identification :	46
	2.11.3 Estimation :	47
	2.11.4 Diagnostic :	48
2.12	Méthodes de Holt-Winter :	48
	2.12.1 Holt-Winter, version additive :	48
	2.12.2 Holt-Winters, version multiplicative :	49
	2.12.3 Choix des paramètres de lissage :	49
	2.12.4 La prédiction :	50
2.13	Conclusion :	54

CHAPITRE 3 : Architectures de téléopération proposées

Introduction :	55
3.1 Architectures de téléopération via internet (état de l'art) :	55
3.2 Architectures du système de téléopération :	57
3.3 La réalité virtuelle et la commande à distance :	58
3.4 Speed Limit Module (SLM) :	58
3.5 Les Stratégies Proposées :	59
3.5.1 Improved Speed Limit Module (ISLM) [62] :	59
3.5.2 La Temporisation Des Commandes (TDC) [111] :	61
3.6 L'interface de communication homme-robot :	62
3.6.1 Le client :	62
3.6.2 La simulation du robot :	63
3.6.3 Le serveur intermédiaire :	64
A. Synchronisation du temps :	64
B. Retour visuel :	64
C. Evaluation de la qualité du service :	64
D. Temporisation des commandes:	64
E. Le serveur :	64
F. Communication internet :	65
G. Choix du protocole de transmission :	65
3.7 Conclusion :	67

CHAPITRE 4 : Couche Matérielle

Introduction :	68
4.1 Hardware utilisé dans ce projet :	68
4.2 Le Robot mobile P3AT [8] :	68
4.3 Software utilisé dans cette thèse :	69
4.3.1 ARCOS [12] :	69
A. Qu'est-ce que ARCOS :	69
4.3.2 ARIA [12] :	70

4.3.3 Les langages de programmations utilisées dans ce travail :	71
4.4 Les langages de programmations utilisées pour développer le simulateur du robot :.....	72
4.4.1 Unity 3d :	72
4.5 Conclusion :.....	73
CHAPITRE 5 : Expérimentations et Résultats	
Introduction	74
5.1 Évaluations des résultats de prédictions :	74
5.1.1 Discussion des résultats :	74
5.2 La comparaison entre la méthode H-W classique et la méthode proposée :.....	78
A. Prédiction du RTT avec les variations légères :	81
B. Prédiction du RTT avec les variations brusques :	84
5.3 La comparaison entre la méthode H-W et le modèle ARIMA :.....	88
5.4 Évaluations des résultats de comparaisons entre la méthode H-W améliorée et le modèle ARIMA :.....	90
5.5 Évaluations des stratégies de télérobotique via internet :.....	90
5.5.1 La stratégie Improved Speed Limit Module (ISLM) :.....	90
5.5.2 La stratégie de la Temporisation Des Commandes (TDC) :.....	92
5.6 Résumé de la comparaison avec d'autres approches [24] :	92
5.7 Conclusion :.....	94
Conclusion Générale et Perspectives :	95
Références :	98

Table des figures

Figure 1: L'architecture générale d'un système de Téléopération.....	17
Figure 2: La télérobotique téléopération d'un robot [1].....	18
Figure 3: Rehaussement d'images vidéo dégradées par superposition d'une image synthétique "fil de fer "à une image caméra	22
Figure 4 : Robot, caméra et la buse d'air au-dessus de l'espace de travail	24
Figure 5 : L'interface du projet Mercury sur un navigateur WEB.....	24
Figure 6: Le télé-robot en action	25
Figure 7 : Labyrinthe où Khepera peut se déplacer.....	26
Figure 8 : Khepera équipé d'une caméra vidéo.	26
Figure 9 : L'interface de commande à distance pour le robot Khepera.....	27
Figure 10: Rhino au travail (à gauche) et le robot Xavier et son interface de contrôle (à droite).	28
Figure 11: Le robot Puma-Paint dans son environnement de travail.	28
Figure 12 : L'interface client de la plate-forme ARITI.....	29
Figure 13 Plateforme de télé-enseignement du laboratoire LARESI.....	30
Figure 14 Délais samedi après-midi [52]	36
Figure 15 Délais Lundi matin [52]	37
Figure 16 Délais typiques.....	38
Figure 17 L'application développée pour mesurer les RTT à l'aide de l'utilitaire réseau Ping .	39
Figure 18 Les mesures des Pings le samedi de 7 :00 à 00:00	40
Figure 19 Les mesures des Pings le dimanche de 07 :00 à 00:00	40
Figure 20 Les mesures des Pings le lundi à 07:00 jusque 1:00.....	41
Figure 21 Les mesures des Pings le mardi de 07:00 à 00:00	41
Figure 22 Les mesures des Pings le jeudi de 07:00 à 01:00.....	42
Figure 23 Les mesures des Pings le mercredi de 07:00 à 00:00.....	42
Figure 24 La méthode Holt-Winters améliorée.....	53
Figure 25 Résultat de chemin avec un contrôle direct et les fluctuations de RTT	57
Figure 26 L'architecture globale de SLM [17]	59
Figure 27 Vue globale de l'architecture proposée	60
Figure 28 Procédé et système de retardement des commandes.....	61
Figure 29 Le simulateur développé par Unity 3D.....	63
Figure 30 Interface serveur du Pioneer-3AT	65
Figure 31 : Pioneer 3AT au sein de laboratoire LARESI.....	68
Figure 32 : Description technique du robot mobile P3AT	69

Figure 33 : Architecture Client - Serveur.....	70
Figure 34 : Structure ARIA	71
Figure 35 L'interface de réalité virtuelle du robot P3 AT.....	72
Figure 36 L'architecture de prédiction de la QoS en temps réel en utilisant la méthode H-W .	75
Figure 37 Comparaison entre les résultats de modélisations par la méthode H-W classique et l'adaptative	77
Figure 38 Comparaison entre les résultats de prédictions par H-W classique et l'adaptative	77
Figure 39 Comparaison entre les erreurs de prédictions par H-W classique et l'adaptative.....	78
Figure 40 Comparaison des résultats de prédiction entre H-W classique et H-W améliorée (entre USTO et UBO).....	79
Figure 41 Comparaison des résultats de prédiction entre H-W classique et H-W améliorée (entre USTO et UMKB)	80
Figure 42 Comparaison des résultats de prédiction entre H-W classique et H-W améliorée (entre USTO et server 3)	80
Figure 43: Modélisation des RTT par la méthode H-W améliorée entre USTO (Algérie) et UBO (France).....	81
Figure 44 : Résultats des prédictions du RTT par H-W améliorée entre USTO(Algérie) et UBO (France)	82
Figure 45 : Erreur de prédiction entre USTO (Algérie) et UBO (France)	82
Figure 46 : Résultats des Prédictions du RTT par H-W améliorée entre USTO (Algérie) et UMKB (Algérie)	83
Figure 47: Modélisation des RTT par la méthode H-W améliorée entre USTO (Algérie) et UMKB (Algérie)	83
Figure 48 : Erreur de prédiction entre USTO (Algérie) et UMKB (Algérie).....	84
Figure 49 : Modélisation des RTT par la méthode H-W améliorée entre USTO et Iran	85
Figure 50 : Erreur de prédiction entre USTO et Iran	86
Figure 51 : Résultats des prédictions du RTT par H-W améliorée entre USTO et Iran	86
Figure 52: Comparaison des résultats de prédiction entre H-W version additive vs H-W version Multiplicative	87
Figure 53 : Comparaison des résultats de prédiction entre la méthode H-W et le modèle ARIMA (entre USTO et Brest)	88
Figure 54 : Comparaison des résultats de prédiction entre la méthode H-W et le modèle ARIMA (entre USTO et Iran)	89
Figure 55: Résultats de la téléopération	91
Figure 56: Commande basée sur un modèle virtuel	92

Liste des tableaux

Tableau 1 Classification de la qualité en fonction des gigues dans PingER [120]	34
Tableau 2 Classification de la qualité en fonction des taux de pertes dans PingER [120]	34
Tableau 3 Classification de la qualité du service en fonction des RTT prédits.....	60
Tableau 4 Distributions des erreurs de prédiction entre la méthode H-W classique et H-W adaptative.....	78
Tableau 5 Distributions des erreurs de prédiction entre H-W classique et H-W améliorée	81
Tableau 6: Distributions des erreurs de prédiction par la méthode H-W améliorée entre USTO et 3 serveurs.....	87
Tableau 7: Distributions des erreurs de prédiction entre la méthode H-W version additive et H-W version multiplicative	87
Tableau 8 : Distributions de l'erreur relative entre la méthode H-W et ARIMA	89
Tableau 9: Comparaison des performances des diverses stratégies de téléopération	93

Table des abréviations

<i>H-W</i>	<i>Holt-Winters</i>
<i>SLM</i>	<i>Speed Limit Module</i>
<i>ISLM</i>	<i>Improved Speed Limit Module</i>
<i>TdC</i>	<i>Temporisation des commandes</i>
<i>RTT</i>	<i>Round Trip Time</i>
<i>TCP</i>	<i>Transmission Control Protocol</i>
<i>AR</i>	<i>Autorégressif</i>
<i>ARIMA</i>	<i>Autoregressive moving average</i>

Résumé :

La commande à distance des machines via le réseau internet a connu un regain d'intérêt, motivé en grande partie par la diversité des domaines d'application. La mise en pratique de cette technique nécessite de trouver un moyen d'assurer la qualité de service car la communication via réseau peut être perturbée ou perdue, à cause de plusieurs éléments tels que la charge du réseau, la distance entre le poste maître et le poste esclave etc.

Ce travail de recherche traite le problème de la téléopération en temps réel en utilisant l'internet comme support de transmission, pour le contrôle du robot mobile Pioneer 3AT. Deux architectures ont été proposées pour surmonter le problème de délais sur internet.

Une méthode a été élaborée en vue de prédire en temps réel la qualité de service en se basant sur des méthodes statistiques. Ensuite, l'utilisation de la réalité virtuelle comme un outil de téléopération. Le système développé a été testé et validé sur le robot mobile Pioneer 3AT en montrant l'intérêt du déploiement de ces techniques.

Mots clés : Télé opération, Qualité de service (en anglais QoS), Prédiction, Réalité Virtuelle et Internet.

Abstract:

The remote control of machines via Internet network has regained its interest, motivated in large part by the diversity of fields of application. The implementation of this technique requires finding a way of ensuring quality of service because the network communication can be disturbed or lost due to several elements such as network congestion, distance between the master station and the slave station, etc.

The research work deals with the problem of teleoperation in real time using the Internet as a transmission medium, for the control of the mobile robot Pioneer 3AT. Two architectures have been proposed to overcome the problem of delays on the Internet.

A method has been developed to predict the quality of service in real time based on statistical methods. Then, we used another aspect based on virtual reality as a tool for remote operation. The developed system was tested and validated on the mobile robot Pioneer 3AT showing the interest of the deployment of these techniques.

Keywords: Teleoperation, Quality of service, Prediction, Virtual Reality, Internet.

ملخص:

موضوع هذه الأطروحة هو استعمال شبكة الإنترنت في التحكم وأتباع الآلات الصناعية. في الواقع الاتصال عبر الإنترنت يمكن أن يتأثر بعدة عوامل مما يؤدي الى التذبذب او فقدان الاتصال بين المتحكم والآلة الأوتوماتيكية، في هذه الحالة، من الضروري إيجاد وسيلة لضمان السيطرة على الجهاز بغض النظر عن جودة الشبكة. لذلك اقترحنا حلين لتحقيق التحكم عن بعد في الروبوت المتحرك بيونير 3AT مهما كانت نوعية الخدمة.

من بين الاسباب التي يمكنها التأثير على نوعية جودة الأنترنت نذكر: الاحتقان، نوعية الشبكة المستعملة والتدفق.... الخ. هذه العوامل قد تؤثر في وقت نقل البيانات والوامر بين المستعمل والآلة المراد التحكم بها مما يؤثر على جودت التحكم بهته الآلات. لحل هذا المشكل اقترحنا طريقة تمكنا من التنبؤ في الوقت الحقيقي، بوقت تأخر نقل الاوامر والبيانات وهذا يمكننا من معرفة جودة الانترنت قبل الشروع في عملية التحكم عن بعد.

جانب اخر طرح في هذه الاطروحة وهو استخدام تقنيات الواقع الافتراضي كأداة تشغيل عن بعد. اختبارات أنجزت

على هذه المنصة لتبيان مدا فعالية وفائدة استعمال هذه التقنية

كلمات المفتاح: التحكم عن بعد، نوعية الخدمة، الواقع الافتراضي، التنبؤ والإنترنت

1. Introduction

De nos jours, le progrès d'Internet a un grand impact sur notre quotidien. Nous pouvons transmettre diverses données, tel que : texte, image, voix et vision sur l'internet . Internet n'est pas seulement une autoroute de l'information, mais aussi un moyen de contrôler à distance les systèmes mécaniques. Ces dernières années, les technologies de l'information et de la communication ont permis de dispenser la présence de l'Homme dans des milieux à risques (milieu nucléaire, haute température, etc.) ou tout simplement pour des missions d'exploration (milieu sous-marin, spatial, etc.). Les percées technologiques ont permis l'automatisation afin de remplacer de nombreuses tâches à nature répétitive. Néanmoins, il y a d'autres tâches qui sont dangereuses pour la santé humaine. Ces tâches doivent être effectuées par un télémanipulateur, autrement connu comme une télé robot. L'accès et l'usage d'un dispositif robotique dans le cadre de la téléopération a été défini comme « les techniques qui permettent à l'opérateur humain d'accomplir une tâche à distance, à l'aide d'un système robotique ».

La télérobotique est un nouveau domaine de la robotique qui a attiré considérablement l'attention des chercheurs au cours de ces dernières années. Le terme de télérobotique via internet se réfère à un système de robot commandé à distance et surveillé à travers Internet. La télérobotique permet ainsi à un opérateur de réaliser une tâche à distance, en l'éloignant de l'environnement de travail et des machines qu'il contrôle.

2. Contexte et problématique :

Le travail de notre thèse porte sur l'élaboration d'un système de téléopération, dans le cadre d'une commande à distance de machines industrielles, en utilisant le réseau internet comme support de communication. L'utilisation des réseaux pour transmettre des données présente divers problématiques, parmi lesquelles nous pouvons citer :

➤ Latence :

La latence ou le délai de transmissions qui est le temps que prend le système pour exécuter les commandes de l'utilisateur ; en d'autre termes, entre la communication des instructions et la visualisation des résultats. Dans le cadre de la téléopération à longue distance, les délais (ou retards) de transmissions peuvent varier aléatoirement en fonction de la charge du réseau, du type de réseau utilisé, des distances physiques entre l'opérateur et la machine. Lorsque les retards de

communications sont importants, la perception du site de travail est dégradée et le système devient difficile à contrôler.

➤ **Interface Homme-Machine :**

Dans une téléopération, l'opérateur peut à travers une interface Homme-Machine transmettre des instructions et recevoir des informations de retour. Afin de contrôler l'état de la machine ou les mouvements du robot contrôlé à distance, plusieurs chercheurs utilisent le retour visuel. Cet outil permet à l'opérateur de voir la configuration du robot lors de l'exécution d'une tâche. Mais, la qualité du signal vidéo peut être dégradée à cause de la mauvaise qualité du réseau internet, ce qui complique le contrôle et le suivi des mouvements du système à distance.

3. Contributions :

De nombreuses recherches ont été réalisées dans le but d'étudier et analyser le problème de délai de transmission en téléopération. La majorité de ces recherches exigent que le délai de transmission soit connu ou borné. Ces solutions restent limitées à cause de la variation aléatoire de délai.

Dans ce travail, nous proposons d'évaluer la qualité de service par la prédiction du RTT sur Internet, afin d'établir une commande à longue distance, soit la téléopération. La prédiction du RTT sur internet joue un rôle clé pour de nombreuses applications, par conséquent, l'approche idéale de la prédiction doit être étudiée avec insistance. Pour cela nous avons proposé une méthode basée sur des calculs statistiques, en l'occurrence, la méthode de Holt-Winter. L'objectif principal de cette méthode est de prédire le RTT en temps réel afin d'évaluer la qualité du service.

Concernant la problématique de la mauvaise qualité du signal vidéo, les interfaces basées sur la réalité virtuelle sont capables de compenser les longs délais de communication. Les commandes à retour virtuel font appel à des affichages prédictifs et des interfaces homme-machine évoluées pour fournir un retour d'information exempt de retard à l'opérateur. Ce dernier peut ainsi continuer le cours des manipulations en ne faisant pas appel à une précision particulière, sans avoir à attendre le retour réel des informations [17].

4. Organisation de la thèse :

A la suite de cette introduction générale, cette thèse est organisée de la manière suivante :

Le chapitre 1 débute par une présentation des systèmes commandés à distance, ainsi qu'une analyse exhaustive des réalisations présentes aujourd'hui dans la téléopération sur Internet en faisant une évaluation des différentes plates-formes existantes. On présente aussi un état de l'art concernant la réalité virtuelle et la réalité augmentée avec leurs domaines d'utilisation.

Le chapitre 2 présente quelques solutions proposées pour réduire l'influence du délai sur internet, ainsi qu'une évaluation de l'existence des techniques et des méthodes proposées pour prédire le RTT. Nous présentons également notre solution proposée pour prédire le RTT.

Le chapitre 3 présente la commande à distance du robot mobile (Pioneer 3-AX) via Internet. Ainsi que deux architectures proposées pour améliorer la qualité du contrôle d'un système à distance.

Le chapitre 4 présente la couche matérielle et les logiciels utilisés dans ce travail.

Le chapitre 5 est consacré à la présentation des différentes expérimentations réalisées dans ce travail ainsi que les résultats concernant la prédiction des RTT en utilisant deux méthodes, afin de mieux connaître l'évolution du réseau Internet lors du contrôle à distance.

Enfin, notre conclusion donne un récapitulatif du travail effectué et une synthèse des résultats obtenus, ainsi nous décrivons les perspectives d'applications de ce travail.

Publications :

Les travaux suivants ont été publiés dans le cadre de la thèse :

Journal: International Review on Computers and Software (I.RE.CO.S.), Vol. 10, N. 1, ISSN 1828-6003, January 2015.

Title: Real-Time Prediction of RTT Based on Holt-Winter Method for Internet-Based Teleoperation

Authors : Mostefa. Masmoudi, L. Kaddour El Boudadi, A. Loukil, J. Vareille.

Journal: International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM).

Title: Safe and efficient mobile robot teleoperation via a network with communication delay

Authors : Masmoudi Mostefa, L. Kaddour El Boudadi, J. Vareille

Conferences internationales:

Conference: International Congress on Telecommunication and Application'14? University of A.MIRA, Bejaia, Algeria, 23-24 April 2014

Title: Modeling and prediction of the internet end-to-end delay using time series methods

Conference: International Conference on Embedded Systems in Telecommunications and Instrumentation (ICESTI'14), Annaba, Algeria, October, 27-29, 2014

Title : La Téléopération d'un robot mobile dans un réseau sans qualité de service garantie

Conference: International Symposium on Programming and Systems, ISPS'2015, April 28-30, 2015, Algiers, Algeria, (**IEEE**)

Title: The teleoperation of a mobile robot in a network without a quality of service guaranteed.

Conference: 3rd INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL, ENGINEERING & INFORMATION TECHNOLOGY, 25-27 May 2015, Tlemcen, Algeria, (IEEE)

Title: Design of Mobile Robot Teleoperation System Based on Virtual Reality.

Conference: CVA ' 2015 Troisième Conférence internationale sur la Vision Artificielle, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 12-13-14 avril 2015.

Title: L'utilisation de la réalité virtuelle pour la télérobotique.

CHAPITRE 1

La Téléopération sur Internet

Introduction

Ces dernières années, les technologies de l'information et de la communication ont permis de dispenser la présence de l'homme dans des milieux à haut risque (milieu nucléaire, haute température, etc.) ou tout simplement pour des missions d'exploration (milieu sous-marin, spatial, etc.). Dans ce chapitre, nous présentons une forme de contrôle à distance des systèmes robotisés, nous présenterons alors la télérobotique et la téléopération et nous verrons comment les techniques de la réalité virtuelle et augmentée ont contribué à lever certains verrous liés généralement à la distance séparant l'opérateur (l'utilisateur) du robot à contrôler. Parmi ces verrous, nous nous intéresserons à celui de la gestion des retards dûs au flux important de données multimédia qui transitent entre les sites maîtres (où se trouve l'opérateur humain) et le site esclave (où se situe robot). L'objectif principal de ce chapitre est de présenter une synthèse et une classification par domaines d'application de la téléopération/télérobotique, réalité virtuelle et réalité augmentée.

1.1 La téléopération :

La Téléopération désigne les principes et les techniques qui permettent à l'opérateur humain d'accomplir une tâche à distance, en l'éloignant de l'environnement de travail et des machines qu'il contrôle (dispositif esclave), commandées à partir d'une station de contrôle (Dispositif maître), par l'intermédiaire d'un canal de télécommunication (figure 1). [1].

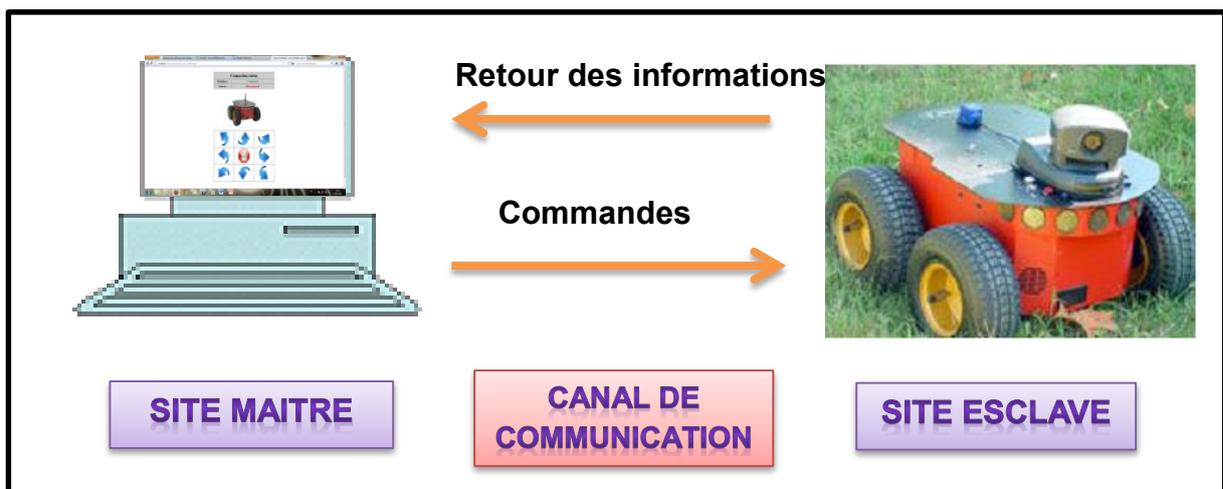


Figure 1: L'architecture générale d'un système de Téléopération

Un système de téléopération se compose généralement de trois parties :

- Le site maître (une interface graphique) qui permet à l'opérateur humain de contrôler à distance les machines
- Le site esclave reçoit les consignes de l'utilisateur afin de manipuler les objets.

La Téléopération sur Internet

- Le canal de communication entre le site maître et l'esclave, ce lien peut être un câble, wifi, Bluetooth ou internet.

1.2 La télérobotique :

la télérobotique, est une forme de téléopération lorsque l'opérateur réalise des tâches à distance en utilisant un robot (figure 2). Elle résulte en fait de la fusion des deux domaines originellement séparés qui sont la téléopération et la robotique. En effet, la robotique autonome n'étant pas encore tout à fait au point, le robot doit présentement être opéré à distance par un opérateur humain [1].

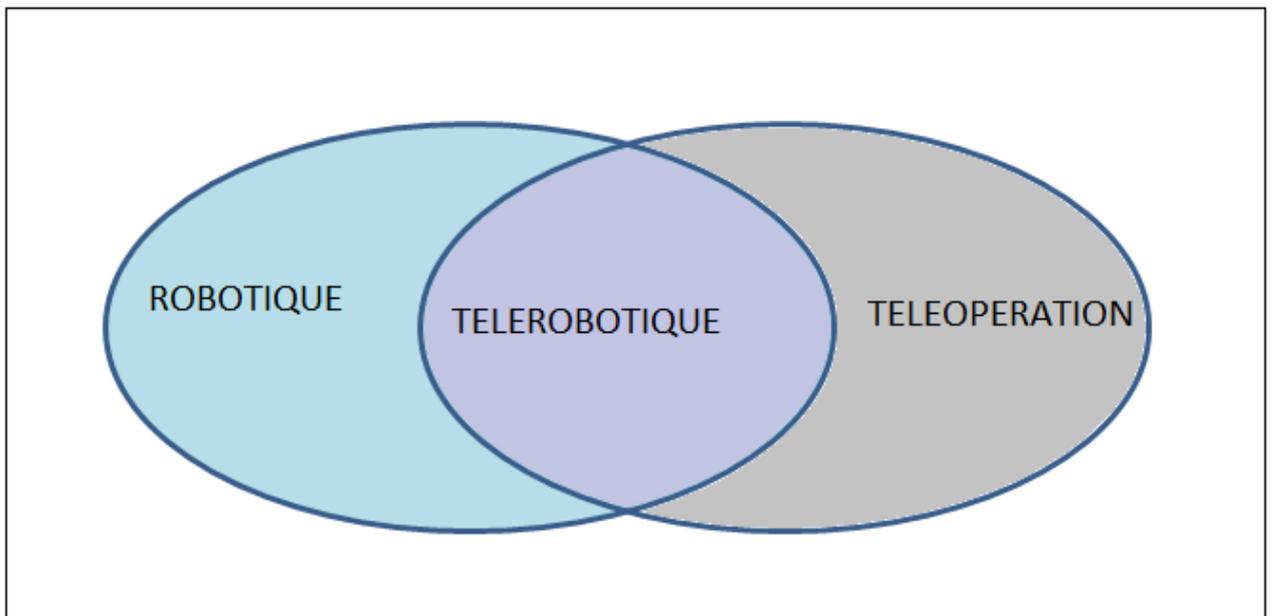


Figure 2: La télérobotique téléopération d'un robot [1]

1.3 La réalité virtuelle et la réalité augmentée : Outils indispensables pour la télérobotique :

1.3.1 La réalité virtuelle :

1.3.1.1 Bref Etat de l'art :

La réalité virtuelle est issue des recherches qui ont débuté dans les années cinquante dans des milieux aussi divers que les laboratoires de la NASA ou les studios d'Hollywood. Les pionniers de ce monde artificiel furent des visionnaires qui empruntèrent des techniques aussi variées que le cinéma, l'informatique, l'automatique et l'électronique, les briques de ce qui fût appelé la Réalité Virtuelle (RV).

Les contraintes auxquelles doit faire face cette technologie sont nombreuses. Ce qui a provoqué de multiples définitions de la RV [21, 22 et 23].

La Téléopération sur Internet

1.3.1.2 Définition de la RV :

Un système de réalité virtuelle est une interface qui implique la simulation en temps réel et des interactions via multiples canaux sensoriels. Ces canaux sensoriels sont ceux de l'Homme, vision, audition, toucher, odorat et le goût [18].

1.3.1.3 Quelques domaines d'application de la RV [18] :

A. L'Architecture :

On peut créer des plans, imaginer des architectures de construction de cites, de villes, enfin grâce au virtuel on peut faire visiter une maison avant qu'elle ne soit construite. Ce procédé est surtout utilisé pour les handicapés. A l'aide d'une chaise roulante virtuelle, on peut vérifier s'il y aura un problème lors des emplacements à l'intérieur du bâtiment en question.

B. L'armée :

Les militaires utilisent la RV pour plusieurs raisons tel que : la simulation. Grâce à la RV, l'armée peut entraîner ses régiments pour des missions spécifiques ou bien pour les entraîner de façon générale.

C. Le divertissement :

C'est sans doute dans ce secteur que la RV est la plus exploitée à son état pur. Des jeux très réels dans un monde imaginaire où tout est permis. La majorité des jeux virtuels qui existent se focalisent sur le principe de la simulation. Etre dans un véhicule et le diriger au travers de différents environnements, en ressentant toutes les secousses. Les jeux virtuels font de plus en plus fureur.

D. L'enseignement :

L'apprentissage à l'aide des hypermédias entraîne une navigation non linéaire et interactive par l'usage d'un matériel éducatif qui atteint les sens de l'étudiant : vision, audition, toucher, odorat. Les ordinateurs pour l'hypermédia, connectés aux réseaux internationaux à large bande, réalisent la plupart de l'enseignement interactif, plus spécialement l'enseignement des détails techniques dans les domaines de l'art, des affaires, de l'histoire, des langues, de la médecine, de la musique, des sciences. Les instructeurs donneront moins d'explications, parce que les meilleurs matériaux des meilleurs enseignants du monde sur presque n'importe quel sujet seront ajoutés aux présentations hypermédia de son propre professeur et sont disponibles sur simple appel à n'importe quel moment du jour et de la nuit quand les étudiants veulent apprendre. La télérobotique : Utilisée pour des interventions dans des milieux hostiles tels que : l'intérieur d'une centrale nucléaire, les fonds sous-marin, l'intérieur d'un volcan... c'est d'ailleurs ce principe qui a été utilisé lors des récentes missions spatiales sur la planète Mars. Grâce à la RV

La Téléopération sur Internet

les techniciens peuvent s'entraîner à manipuler le robot, améliorer leurs réflexes en causant des fausses situations d'urgence ou de faux problèmes techniques. Ils peuvent aussi enregistrer une série de mouvements ou de tâches, que le robot devra faire, avant de les faire par le robot dans une situation réelle. Dans une opération de télérobotique la plupart des actions du robot sont préprogrammées. Lorsque le robot effectue ces phases préprogrammées, l'opérateur ne croise pas les doigts. Il doit superviser le robot durant l'accomplissement de sa tâche ou, dans certains cas, il doit assister le robot (téléassistance). Les techniques de la RV en robotique sont susceptibles de remplir deux fonctions. La première est la simulation, qui permet à l'opérateur de s'entraîner (à manipuler le robot) et de programmer des tâches qui seront ensuite exécutées par le robot. La deuxième fonction est de servir d'interface entre l'opérateur et le robot au cours d'une mission, par laquelle l'opérateur peut manipuler le robot et l'assister.

E. La chirurgie :

En chirurgie, la tendance est de réduire la taille de l'accès à la zone à opérer. L'objectif de cette tendance est de réduire le risque d'infection, la morbidité postopératoire et bien sûr le temps d'hospitalisation [4,45]. Ces techniques se nomment vidéoscopie et endoscopie. Ces deux techniques fonctionnent efficacement, mais la visibilité du chirurgien et l'accessibilité à la zone à opérer sont fortement réduites. Grâce à la RV, ce problème peut être enfin résolu. Ces techniques consistent à introduire une micro-caméra, qui transmet les images à un écran installé près de la table d'opération, par une petite incision et par une autre, introduire les instruments de chirurgie [10 et 11]. Tout ceci pour effectuer l'acte chirurgical. La visibilité étant restreinte et le chirurgien étant privé du contact avec les organes, l'opération devient très difficile. A l'aide d'échographie, de scanographie ou d'imagerie par résonance magnétique nucléaire, il est possible de reconstituer la zone à opérer en une image tridimensionnelle visible à l'aide d'un système de RV. Le chirurgien a donc une meilleure visibilité et puisqu'il peut grossir l'image qu'il reçoit, il est même plus précis. Il faut comprendre que ce procédé est à un stade peu développé. Par ce fait, il ne peut pas être utilisé en pratique, il faut attendre encore quelques années avant que ce procédé n'atteigne sa maturité. Cette technique ne servira pas seulement à réduire le risque d'infection, la morbidité postopératoire, le temps d'hospitalisation et à augmenter la précision de l'acte chirurgical et la

visibilité. Mais elle permettra aux jeunes chirurgiens de s'entraîner sur des modèles virtuels avant de pratiquer des opérations sur de vrais sujets.

La NASA s'intéresse à la téléchirurgie, pour agréer l'opération de quelqu'un dans l'espace. Le chirurgien opérerait sur un modèle virtuel, et un robot assistant opèrerait réellement

le patient. Les capteurs d'efforts devraient, dans ce cas, fournir et faire ressentir, les plus légers efforts appliqués par les outils chirurgicaux du robot.

Il faut noter qu'au début de l'apparition de la réalité virtuelle, on pensait que tous les domaines allaient être touchés et que beaucoup d'applications basées sur ce principe verraient le jour. Aujourd'hui, le penchant est de ne pas réaliser des applications purement virtuelles, mais, avec les méthodes de ces dernières, d'augmenter la perception des utilisateurs. Ce nouveau concept se nomme la réalité augmentée. Dans ce cas, l'utilisateur n'est plus complètement immergé dans un monde non réel, mais des informations virtuelles viennent renforcer sa perception de la réalité. La définition de la réalité virtuelle n'étant pas encore unanime, il est difficile de dire si la réalité augmentée est ou non de la réalité virtuelle.

1.3.2 La réalité augmentée :

La Réalité Augmentée (RA) peut être définie comme une combinaison de la vraie scène visualisée par l'utilisateur et d'une scène virtuelle produite par l'ordinateur. D'une manière générale cette technique consiste à augmenter la scène réelle avec des informations virtuelles additionnelles. Cet accroissement peut prendre différentes formes selon les domaines d'application comme nous allons le voir par la suite. Par exemple dans le domaine de la télérobotique, généralement cette opération consiste à superposer un modèle virtuel sur une image réelle grâce à un mécanisme appelé la calibration [59]. On parlera alors de la visualisation prédictive ou encore des prédicteurs graphiques pratiqués généralement en téléopération soit pour pallier le problème de délai [25 et 26], soit pour rehausser l'image vidéo pour compenser ses défauts [27 et 28] (Figure 3). Des exemples de systèmes à base de cette technologie sont présentes à la fin de cette partie.

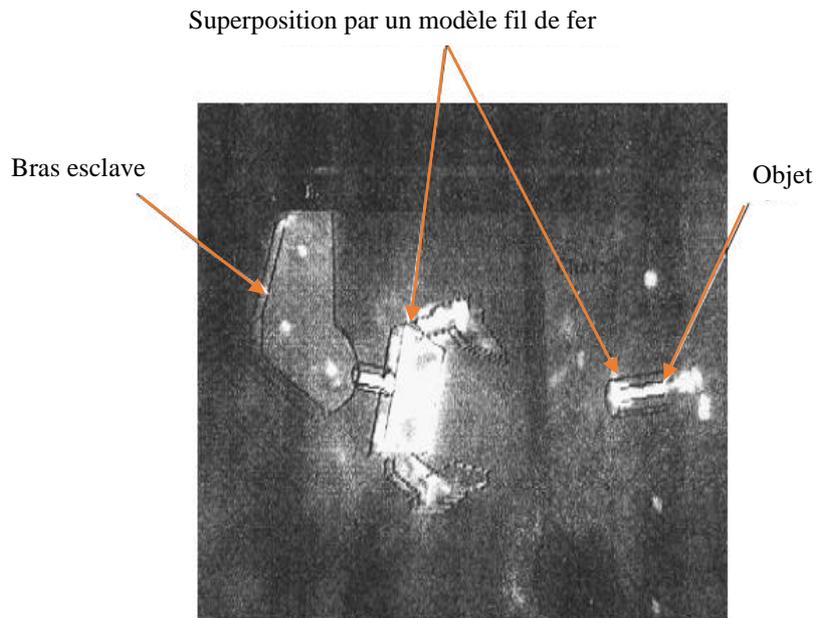


Figure 3: Rehaussement d'images vidéo dégradées par superposition d'une image synthétique "fil de fer" à une image caméra

1.3.2.1 Quelques domaines d'application de la RA :

Le développement de la technologie d'affichage et des systèmes informatiques, ainsi que le traitement du temps réel d'images vidéo a rendu possible l'affichage d'images virtuelles correctement appariées aux images vidéo. La réalité augmentée a trouvé sa place et a apporté des solutions à des problèmes exposés dans de nombreux domaines.

A. Médical :

L'utilisation des systèmes de la RA dans ce domaine est une guise très encouragée par de nombreux chercheurs. Généralement ce sont les opérations chirurgicales qui en profitent le plus. Par exemple, un robot est utilisé pour assister le neurochirurgien lors d'une opération chirurgicale sur un patient atteint d'une tumeur au cerveau. Des images sont transmises à l'ordinateur qui les traduit en 3D et durant l'opération, le cerveau virtuel est en permanence superposé à l'image du cerveau réel du patient. Cette superposition permet au système de guider le chirurgien jusqu'à la tumeur moyennant un rayon laser.

B. Divertissement :

Une forme simple de la RA est utilisée pendant le journal de télévision. La plupart du temps le journaliste se trouve devant un fond bleu ou vert et cette image réelle est augmentée avec des images générées par ordinateur.

C. Formation militaire :

La Téléopération sur Internet

Les militaires utilisent aussi des systèmes de RA où des informations s'affichent sur leur écran de pilotage, ou bien un viseur qui indique la cible à atteindre. On trouve un système distribué de simulation de guerre (SIMNET) qui utilise aussi des techniques de la RA [29].

1.4 Robotique et Télérobotique :

La RA est utilisée pour améliorer la perception visuelle ou encore anticiper une situation réelle et prévenir des cas dangereux. En effet, la superposition d'un modèle virtuel sur une image réelle est très utilisée en Téléopération. Le fait d'augmenter l'image vidéo avec un modèle en fil de fer par exemple, facilite la visualisation du monde 3D distant (généralement lorsque le site distant est visualisé par une seule caméra). Si l'opérateur désire effectuer un déplacement sur le robot réel, il peut le réaliser sur le robot virtuel (fil de fer) qui n'est rien d'autre qu'un rehaussement graphique du vrai robot. L'opérateur peut alors décider de l'exécution de la tâche après avoir vu le résultat de la simulation, ainsi les problèmes d'une opération de télérobotique liés à la distance séparant les deux sites sont éliminés (problème de délai, image bruitée, etc ...).

1.5 Les plates-formes existantes sur le Web :

Les évolutions d'Internet ont souvent été illustrées de manière assez originale comme la fameuse cafetière de Cambridge (The Trojan Room Coffee Pot) considérée comme la première webcam qui avait été inventée par les informations de Cambridge pour connaître le niveau de café de la cafetière sans bouger. La téléopération n'échappe pas à la règle avec le célèbre Toaster présenté à Interop en 1990, réalisé par Simon Hackett et John Romkey, et sa pauvre tartine qui finit mal en point pour cette première expérience [30]. Depuis ces réalisations originales, de nombreuses plates-formes mettant en oeuvre Internet comme un nouvel élément de la téléopération sont apparues.

1.5.1 Le projet Mercury

Faisant suite au projet de télérobotique minimaliste (une ampoule qu'il était possible d'allumer/éteindre à distance) [31], le projet Mercury, développé par Ken Goldberg à Berkeley, est considéré comme la première réalisation effective d'une téléopération utilisant Internet comme support de communication. Le but de ce projet était la validation par expérience du concept de téléopération sur Internet [32 et 33].

La Téléopération sur Internet

Le projet de Mercury est composé d'un bras de robot industriel équipé d'une caméra et d'un système pneumatique. Le bras du robot étant situé au-dessus d'un bac contenant des objets divers (montre, pinceau. . .) enfouis dans du sable.

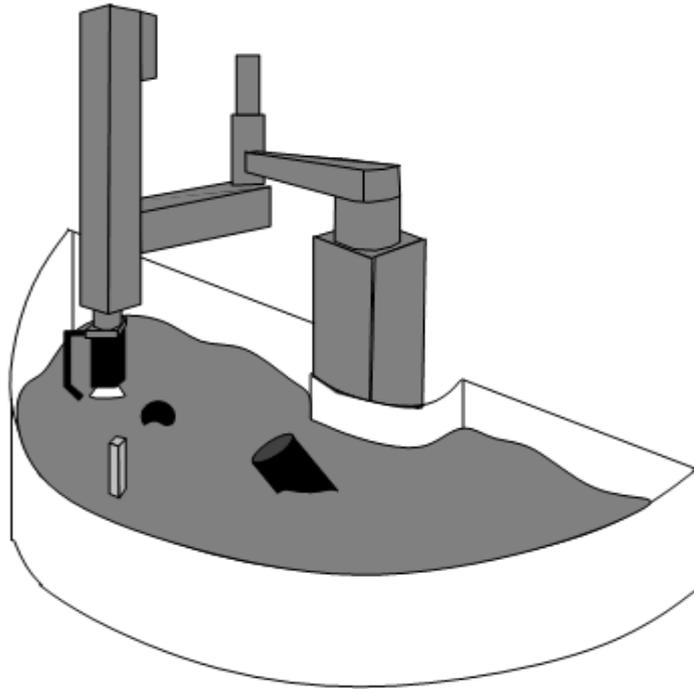


Figure 4 : Robot, caméra et la buse d'air au-dessus de l'espace de travail

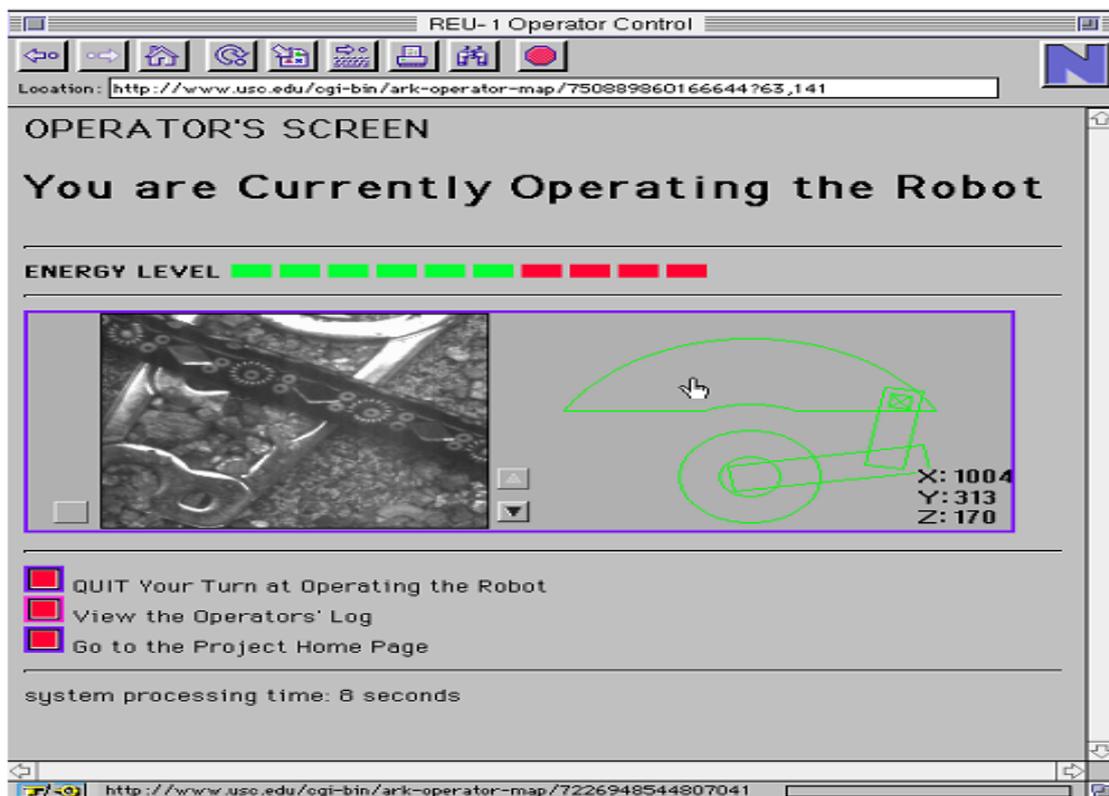


Figure 5 : L'interface du projet Mercury sur un navigateur WEB

La Téléopération sur Internet

Les utilisateurs peuvent alors contrôler à distance la caméra pour afficher des emplacements souhaités ou diriger une courte rafale d'air comprimé dans le sable pour faire apparaître les objets (Figure 4). Ainsi une interface a été développée sur un navigateur WEB pour permettre aux utilisateurs de contrôler le matériel via l'internet (Figure 5) [34].

1.5.2 Le Télé-robot Australien :

Un télé-robot Australien fit ses premiers mouvements quelques semaines après la réalisation du projet Mercury [35,36 et 37]. La plate-forme consista en un bras manipulateur (un ASEA IRB- 6 puis un ABB IRB 1400) en août 1996 situé au-dessus d'une table où étaient disposés des petits blocs de bois, le but étant de permettre à un opérateur distant de manipuler les blocs en utilisant la pince située à l'extrémité du robot (Figure 6).

Le type de contrôle repose, comme pour la plate-forme Mercury, sur la stratégie " move-and-wait ". L'utilisateur donne une instruction ou un bloc d'instruction puis attend le retour d'informations, pour visualiser le résultat de l'exécution de l'instruction et ainsi d'en saisir une nouvelle.

L'interface graphique a été modifiée au cours des différentes années en réponse aux évolutions des technologies de programmation liées au Web. Les premières versions se basaient sur des formulaires Java-script.

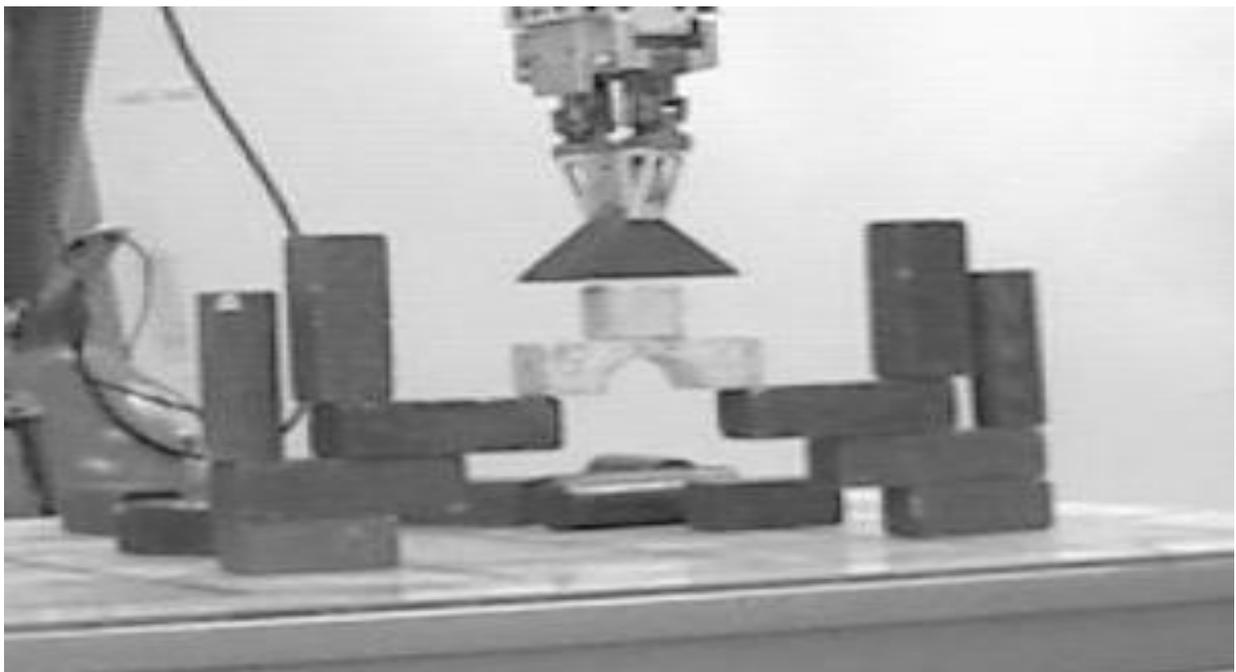


Figure 6: Le télé-robot en action

La Téléopération sur Internet

1.5.3 La plate-forme KheperOn The Web :

En décembre 1996 l'équipe du LAMI5 de l'EPFL6 mis à disposition sur le Web la plate-forme KheperOn the Web [38]. La plate-forme consistait en un mini-robot (robot Khepera Figure 8) équipé d'une caméra embarquée [39]. Le robot se déplaçait dans un labyrinthe (Figure 7) connecté à un PC via une liaison filaire. Une caméra supplémentaire était fixée au plafond, pour observer le labyrinthe [39].



Figure 7 : Labyrinthe où Khepera peut se déplacer.

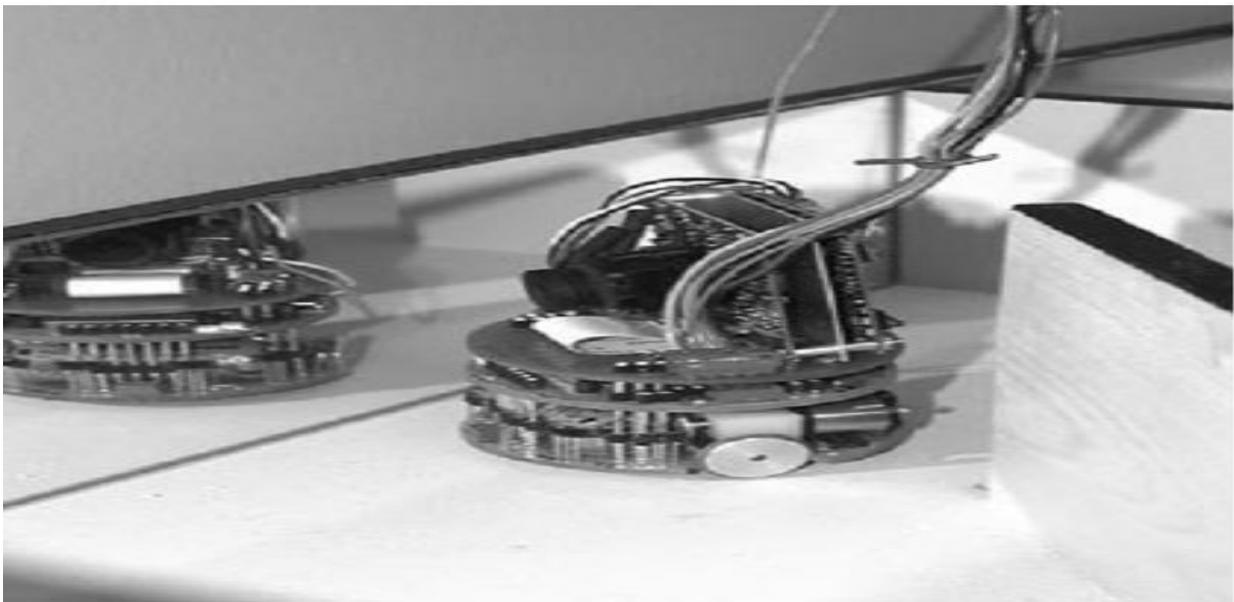


Figure 8 : Khepera équipé d'une caméra vidéo.

La Téléopération sur Internet

Le PC qui contrôlait le robot était connecté à Internet. Il était ainsi équipé d'une carte d'acquisition pour l'acquisition des images. L'utilisateur pouvait basculer entre la caméra du robot et la caméra externe en utilisant l'interface utilisateur. Le modèle virtuel du robot disposait de la même interface utilisateur que le vrai, et donc l'utilisateur pouvait sélectionner une vue de l'une des deux caméras (Figure 9).

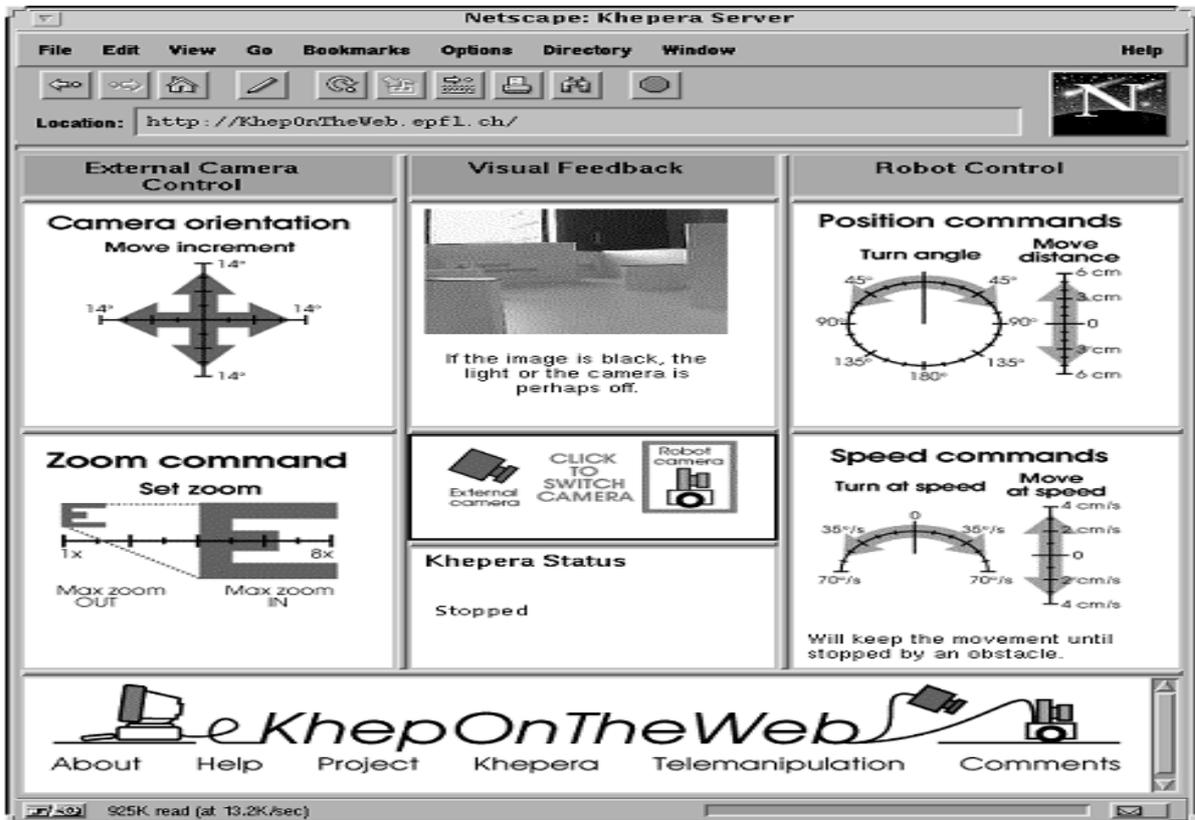


Figure 9 : L'interface de commande à distance pour le robot Khepera.

1.5.4 Rhino et Xavier :

Dans la catégorie des interfaces pour le contrôle de robots mobiles sur le Web, d'autres plates-formes ont été développées. Un des travaux les plus achevés est celui mené par Dirk Schultz pour la visite virtuelle d'un musée [40]. Le système proposé a été implanté au "Deutsches Museum" à Bonn en Allemagne et au "Smithsonian's national museum of American history" à Washington aux USA. Le but était de permettre à des utilisateurs distants de visiter les musées virtuellement en visionnant les images fournies par le robot Rhino (Figure 10), le robot se déplaçant en fonction des instructions des visiteurs [41 et 42]. Il est à noter que ces visites virtuelles pouvaient se dérouler soit pendant les horaires de fermeture du musée, soit pendant les heures d'ouvertures. Cela impliquait donc la présence éventuelle de visiteurs réels dans l'environnement du robot.



Figure 10: Rhino au travail (à gauche) et le robot Xavier et son interface de contrôle (à droite).

1.5.5 Puma-Paint :

Le projet Puma-Paint vient de l'Université de Wilkes aux Etats-Unis et date de 1998, ce projet est un robot en ligne permettant à l'utilisateur de contrôler un bras manipulateur de type PUMA 760 équipé d'un pinceau. Le visiteur peut ainsi dessiner à distance sur une feuille de papier réelle au moyen de pinceaux et de pots de peinture. Le bras manipulateur pouvait saisir des pinceaux imbibés de peinture de différentes couleurs et réaliser sur une feuille de papier le dessin ordonné par l'utilisateur distant, voir Figure 11. L'interface de contrôle était entièrement en Java. Cette interface permettait à l'utilisateur de se connecter directement avec le robot et de recevoir une rétroaction immédiate.



Figure 11: Le robot Puma-Paint dans son environnement de travail.

La Téléopération sur Internet

1.5.6 ARITI :

Le laboratoire CEMIF Systèmes complexes, situé à l'université d'Évry dans le Val d'Essonne (France), a développé une plate-forme de télérobotique via Internet [43 et 44]. La plate-forme ARITI (Augmented Reality Interface for Telerobotic application via Internet) présente une interface de réalité augmentée pour téléopération via Internet. Le ARITI est une application client / serveur, ce qui permet la visualisation et la commande d'un robot de 6 DDL en utilisant n'importe quel ordinateur distant.

Le système ARITI est basé sur une applet Java où l'interface utilisateur est divisée en 4 parties (Figure 12) : Dans la partie de réalité augmentée, un robot virtuel est superposé sur le robot réel pour permettre à l'utilisateur de commander d'abord le robot virtuel et après validation, de contrôler le robot réel (retour prédictif). A l'aide du tableau de bord, l'utilisateur peut choisir son mode de contrôle (télé-programmation ou téléopération), d'activer ou pas les guides virtuels, etc. Les deux dernières parties permettent de donner à l'utilisateur d'autres points de vue de l'environnement virtuel pour lui faciliter la manipulation du robot.

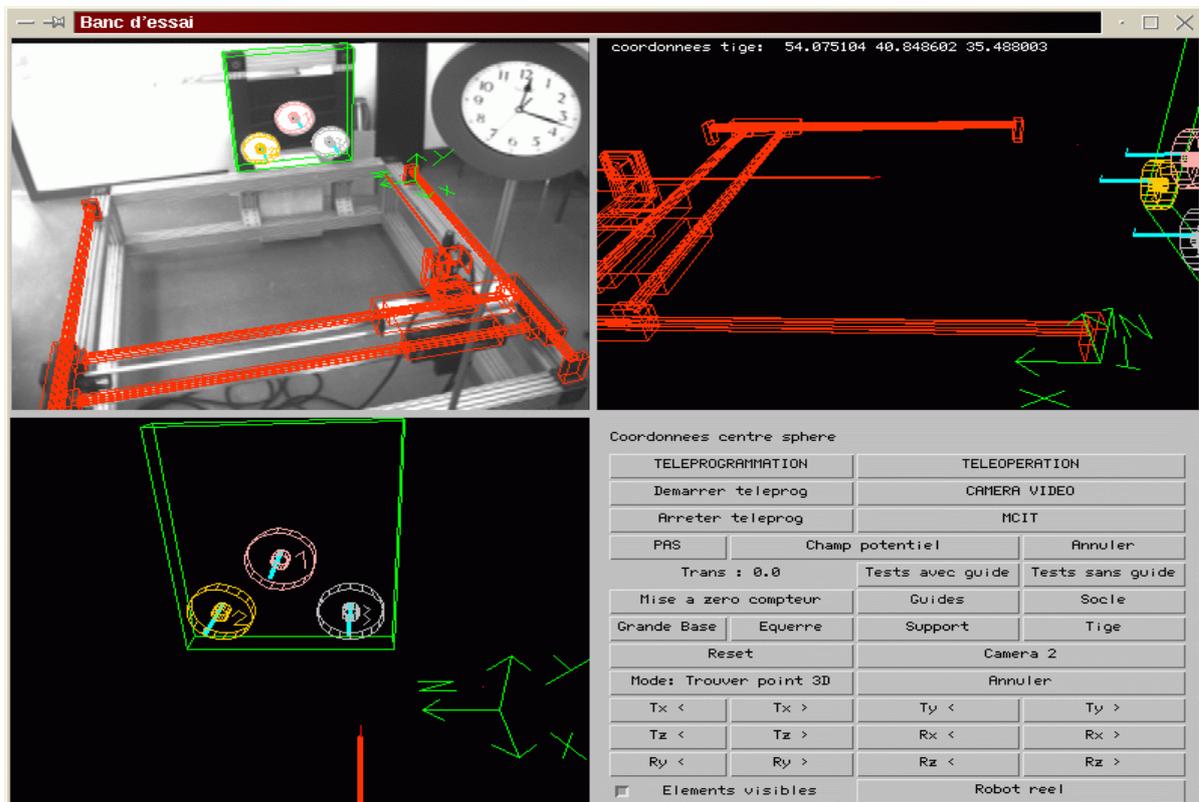


Figure 12 : L'interface client de la plate-forme ARITI

La Téléopération sur Internet

1.5.7 Plateforme de télé-enseignement du laboratoire LARES I :

Cette plateforme (Figure 13) a été développée au niveau du laboratoire LARES I en 2007 [2 et 3], par le langage de programmation PHP, ce travail est considéré comme la première plateforme algérienne permettant des travaux pratiques à distance en robotique.

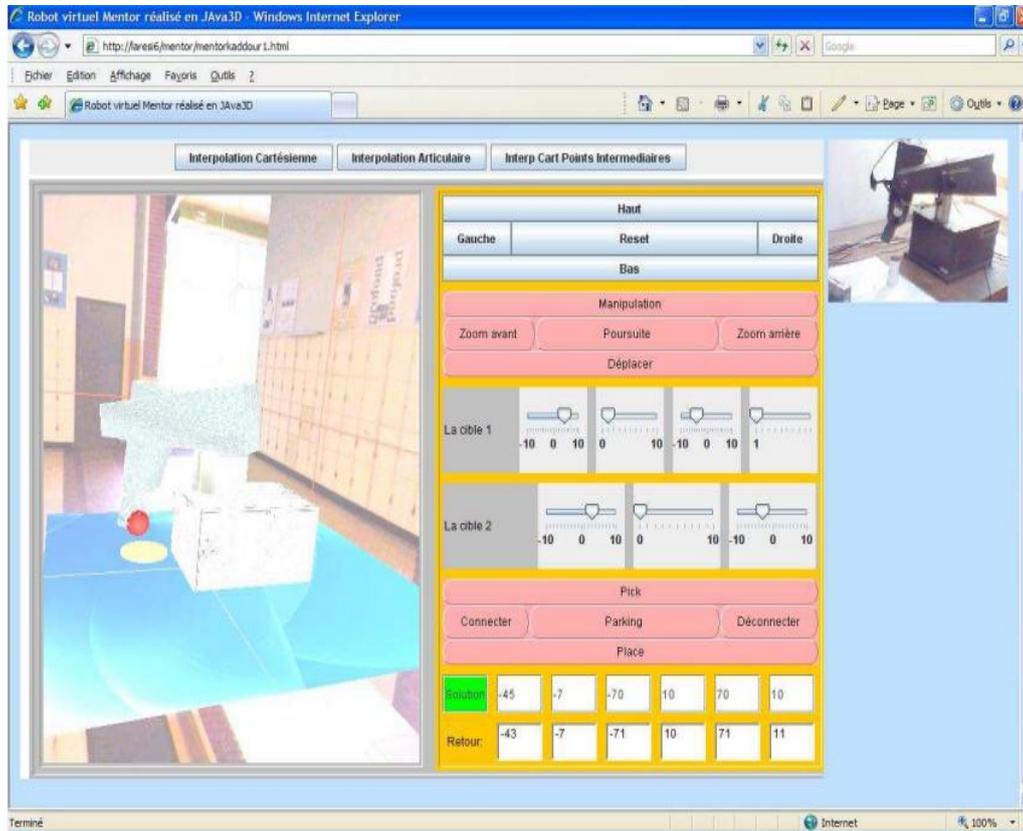


Figure 13 Plateforme de télé-enseignement du laboratoire LARES I

1.6 Conclusion

Au début dans ce chapitre nous avons présenté une définition de la téléopération et la télérobotique, puis un aperçu sur la réalité virtuelle et la réalité augmentée et montré leurs domaines d'application et spécialement dans le domaine de la téléopération pour améliorer la perception visuelle ou l'anticipation d'une situation réelle et la prévention contre d'éventuels dangers. Nous avons aussi cité les avantages liés à l'emploi de ces systèmes pour montrer leurs intérêts dans différents domaines (médecine, nucléaire, armée, divertissement, l'enseignement, robotique et téléopération, ...). Ainsi nous avons présenté quelques plates-formes de télérobotique existantes sur le Web.

Dans le chapitre suivant on présentera les facteurs qui peuvent influencer sur la téléopération, ensuite un état de l'art sur les méthodes qui ont été utilisées pour surmonter la problématique de la variation de délais sur internet.

CHAPITRE 2

Facteurs pouvant influencer la téléopération

Introduction

Dans ce chapitre nous allons traiter de la téléopération en présence de délais, nous avons utilisé l'Internet pour assurer la communication entre l'opérateur et le robot. La présence d'un réseau de communication dans une boucle de commande conduit à de nombreuses imperfections telles que la variation des retards de transmission. On s'attend donc à avoir des délais qui pourraient perturber l'opérateur s'ils ne sont pas traités par le système.

Pour mieux montrer le concept de QoS, nous présentons dans ce chapitre la notion de service fourni par un réseau informatique. Une étude bibliographique sur cet aspect est faite au début de ce chapitre. On a voulu établir quels sont les facteurs qui pourraient perturber une session de téléopération. Ensuite, on a étudié comment la problématique des délais est prise en compte dans la littérature. Comme on a envisagé l'utilisation de l'Internet, on a examiné s'il serait possible de déterminer des caractéristiques pour les délais qui apparaissent pour ce type de réseau. On a également examiné les aides existantes. Ce chapitre présente aussi les méthodes proposées pour évaluer la qualité du service d'un réseau internet.

2.1 Le service fourni par un réseau informatique :

Un réseau informatique est un ensemble d'équipements reliés entre eux pour échanger des informations (routeurs, hubs, switches, ordinateur, modems ...). Le service principal fourni par ce réseau est l'acheminement des données depuis un dispositif source vers une destination précise. La nature hétérogène des données véhiculées par le réseau et la diversité des tâches effectuées imposent l'existence de plusieurs services (service de messagerie, voix sur IP, transfert de fichiers audio, vidéo... etc.).

2.2 La qualité de service d'un réseau informatique :

La qualité de service est la capacité à véhiculer toutes les données dans de bonnes conditions, en termes de disponibilité, débit, délais de transmission, gigue et taux de perte de paquets.

La QoS est un concept de gestion qui a pour but d'optimiser les ressources d'un réseau et de garantir de bonnes performances. Elle offre des débits et des temps de réponse différenciés par applications suivant les protocoles mis en œuvre au niveau de la structure. Elle permet ainsi aux fournisseurs de services (départements réseaux des entreprises, opérateurs ...) de s'engager

Facteurs pouvant influencer la téléopération

formellement auprès de leurs clients sur les caractéristiques de transport des données applicatives (exemple : débit de la connexion, temps de réponse ... etc.).

2.3 Métriques de mesure de la qualité de service du réseau :

Les performances du réseau peuvent être caractérisées par plusieurs métriques, les protocoles de routages dynamiques utilisent ces métriques [18] pour garantir le bon acheminement des données :

- **Débit** : est le nombre de bits que le réseau est capable d'accepter ou de délivrer par unité de temps (Bits/s, Paquets/s,...). On distingue un débit binaire et un débit utile.

Le débit binaire est le taux de transfert maximal du réseau, il est égal à $\frac{Qd}{T}$ où **Qd** est la quantité totale des données transmises et **T** le temps écoulé.

Le débit utile est la capacité utile du lien égal à $\frac{Qc}{T}$ où **Qc** est la quantité totale des données correctement transmises.

- **Nombre de sauts entre deux nœuds du réseau** : nombre de routeurs que doit parcourir la donnée pour arriver à la destination.
- **Délai** : Temps **D** mis entre l'émetteur et le récepteur (en ms). Il est composé d'une partie fixe D_f et d'une partie variable D_v , où $D_f = D_p + D_s + D_t$ et $D_v = D_q + D_j$

Avec :

D_p : délai de propagation qui est égal à 5 à 6 microsecondes par K_m sur une ligne filaire.

D_s : délai de transmission qui est en fonction du débit et de la taille des paquets émis.

D_t : temps de traitement, correspondant aux opérations effectuées sur les données (codage-décodage, cryptage-décryptage, ... etc.).

D_q : délai cumulé dans les files d'attente des routeurs parcourus.

D_j : délai introduit par le buffer de compensation (lissage) pour assurer la synchronisation.

- **Gigue (latence)** : La variation de la latence dans le temps est appelée (gigue) (*jitter* en anglais). Une gigue élevée signifie que les délais sont fortement variables, ce qui perturbe les protocoles en temps réel.
- **Perte** : taux des paquets perdus qui mesure la fiabilité du réseau.

2.4 Mesure de QoS sur Internet :

Bien que les outils de mesure sur Internet doivent encore être améliorés, certains outils permettent d'appréhender la qualité d'une connexion. En suivant la proposition de R. Oboe et P. Fiorini [19] sur la caractérisation d'une connexion Internet par les délais et nombre de paquets

Facteurs pouvant influencer la téléopération

perdus, la mesure de la qualité d'une connexion Internet peut être réduite à la mesure de ces deux critères.

L'outil PingER se base sur le mécanisme d'écho ICMP (Internet Control Message Protocol) qui est celui utilisé dans l'outil système "ping" [20]. Ce protocole a été instancié pour permettre aux machines de détecter les problèmes sur le réseau. PingER mesure le temps de réponse, les pourcentages de paquets perdus et la gigue sur le temps de réponse. Se basant sur les valeurs obtenues, les auteurs proposent une qualification des connexions (Table 1 et 2). Obraczka et Silva enrichissent l'usage du "ping" par la fonction système "traceroute" qui permet d'identifier les différents nœuds d'une connexion Internet [9]. Toutefois le calcul du RTT est encore la méthode principale de caractérisation de la connexion [120].

Tableau 1 Classification de la qualité en fonction des giges dans PingER [120]

Valeur maximum	Qualité
0 ms	Parfaite
75 ms	Bonne
125 ms	Acceptable
225 ms	Faible

Tableau 2 Classification de la qualité en fonction des taux de pertes dans PingER [120]

Valeur	Qualité
0 - 1 %	Bon
1 - 2.5 %	Acceptable
2.5 - 5 %	Faible
5 - 12 %	Très faible
> 12 %	Mauvais

2.5 Facteurs pouvant influencer la téléopération :

Le principal problème qui sera rencontré est le délai. Ce dernier est principalement dû à deux causes : la distance (physique) entre les deux parties et la congestion du réseau.

Il est impossible de réduire le délai dû à la distance entre les deux postes (et au temps de traitement lié au passage à travers différents routeurs). Mais il est possible de faire des mesures avant d'entamer la session de téléopération pour avoir une idée approchante sur la valeur du délai, mais il est probable que, pendant la même session, des modifications interviennent provoquant un changement du chemin jusqu'au moment du transfert des données.

Les problèmes rencontrés à cause de la congestion du réseau peuvent générer des nuisances légères mais importantes. Il est possible d'observer un pic dans le délai moyen ou

Facteurs pouvant influencer la téléopération

d'avoir un temps trop long entre les deux parties, qui causera l'impossibilité de la session de téléopération (time out). D'autres problèmes existent aussi comme l'arrivée désordonnée des paquets de données ou la perte ponctuelle de paquets.

Il est possible d'avoir des prévisions sur l'évolution de la congestion (on peut supposer, par exemple, qu'elle sera plus importante le matin, quand les gens arrivent au travail, et le soir, quand ils rentrent chez eux), mais on ne peut pas avoir des indications avec précision. Il est possible pour certains paquets d'être dirigés par des chemins plus longs (en traversant d'autres continents, par exemple), mais ces liaisons ont une capacité restreinte, qui est vite saturée si trop de paquets y sont redirigés.

Un troisième facteur entre en compte mais, moindre que la qualité du réseau, est le matériel utilisé pour le poste de commande et le robot. Une étude empirique [47] a trouvé que le temps écoulé entre le moment où l'opérateur appuie sur un bouton et l'affichage de cet événement à l'écran est, avec un système de test légèrement en dessus de la moyenne, de 65 ms. Avec une configuration non, il peut atteindre 110 ms. Cette valeur est interne au système Homme - interface de contrôle, le délai entre le site de l'opérateur et celui du robot vient s'ajouter dessus. Ceci peut faire qu'une situation acceptable se transforme en une expérience frustrante pour l'opérateur.

Pour des tâches qui demandent des réponses très rapides, des études ont trouvé que les performances de l'opérateur humain commencent à diminuer si le délai dépasse 180 ms [47] ou 250 ms [48]. Ceci ne veut pas dire que l'opérateur ne pourra pas accomplir ses tâches, mais uniquement que ses performances seront dégradées, en tendant vers zéro. [49] a trouvé que, même avec un délai de 1,5 s les opérateurs étaient capables d'accomplir leurs tâches.

Le délai maximal qui n'empêchera pas le fonctionnement normal du système téléopéré n'est pas fixe. Il dépend d'une multitude de facteurs. La tâche à accomplir est un élément important. Avec le même robot, les contraintes seront différentes s'il faut naviguer dans un environnement ou chercher un certain objet. Les caractéristiques du robot et de l'environnement influenceront aussi sa valeur. Un robot capable de mouvements rapides dans un environnement où les obstacles sont près les uns des autres n'aura pas les mêmes contraintes qu'un robot lent, dans un environnement où les obstacles sont espacés. Un facteur non négligeable étant l'opérateur humain lui-même et ses capacités. S'il a une expérience suffisante du système et de son environnement, il est capable de se former un modèle mental et de l'utiliser pour anticiper l'état futur du robot, obtenant ainsi une marge plus large pour le délai. Si le délai dépasse cette valeur limite, la réaction la plus fréquente des opérateurs est d'adopter le comportement nommé « move-and-wait » (avance et attends) [50]. L'opérateur fera avancer le robot sur une petite distance pour laquelle il est sûr de lui et attendra le rafraîchissement des données provenant

Facteurs pouvant influencer la téléopération

du robot. C'est uniquement après avoir reçu ce rafraîchissement (qui lui confirmera la nouvelle position du robot dans l'environnement) qu'il enverra une nouvelle commande au robot.

2.6 Téléopération avec délais dans la littérature :

Le premier problème que j'ai abordé pendant ma thèse a été la téléopération avec délais. Pour rappel, notre cas est assez spécifique : on a un robot mobile (Pioneer P3at), à contrôler à l'intérieur d'un environnement connu (laboratoire LARESI, USTO, Oran). Pour des raisons pratiques (coût, existence du réseau, etc.), on a choisi d'utiliser internet comme milieu de communication entre le robot et l'opérateur.

2.7 Délais sur Internet

Une étude visant l'acquisition des informations concernant les caractéristiques de l'Internet a été menée dans ce chapitre, pour déterminer la possibilité d'identifier des caractéristiques. Des informations concernant la forme du délai ou leur modélisation conduiraient vers la réduction des voies de recherche pour savoir comment limiter leurs effets.

Des séries de mesures de paquets de données ont été analysées par [51]. Les auteurs ont voulu caractériser le délai unidirectionnel. Les paquets de données ont été aussi modifiés après leur création, pour s'assurer que le moment de l'émission de la trame est bon.

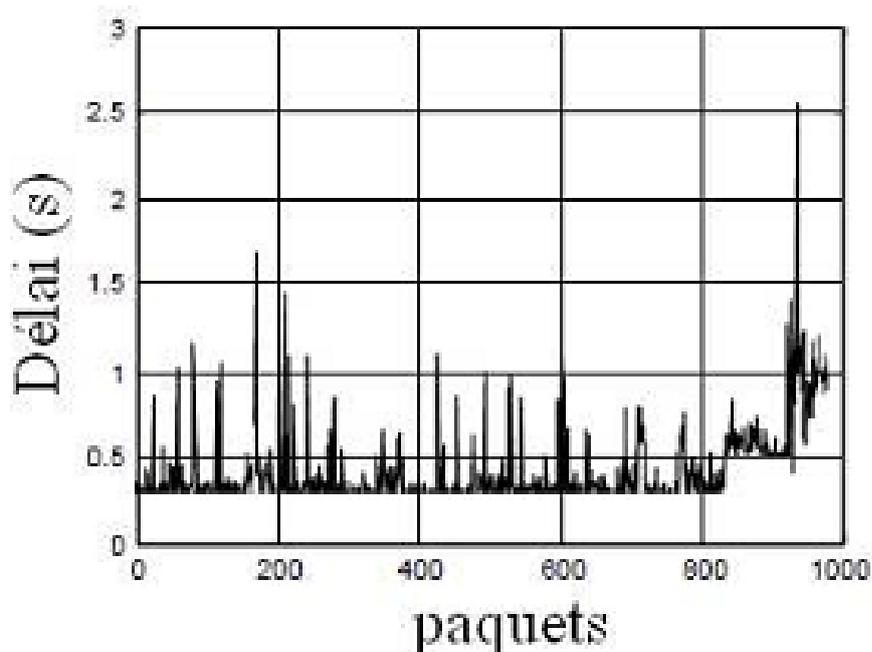


Figure 14 Délais samedi après-midi [52]

Facteurs pouvant influencer la téléopération

Les résultats obtenus montrent une dépendance linéaire du délai de la taille des paquets. Des mesures empiriques du délai Internet ont été faites dans [52]. Deux exemples sont reproduits sur la Figure 14 et la Figure 15.

Dans la Figure 14, les délais ont été mesurés pendant une période de trafic bas, entre les villes de San Juan (Argentine) et Madrid. On observe un délai constant, qui a une valeur de 250 ms environ, et des pics, qui apparaissent avec une fréquence variable. La fréquence de réception des paquets de données n'est pas précisée.

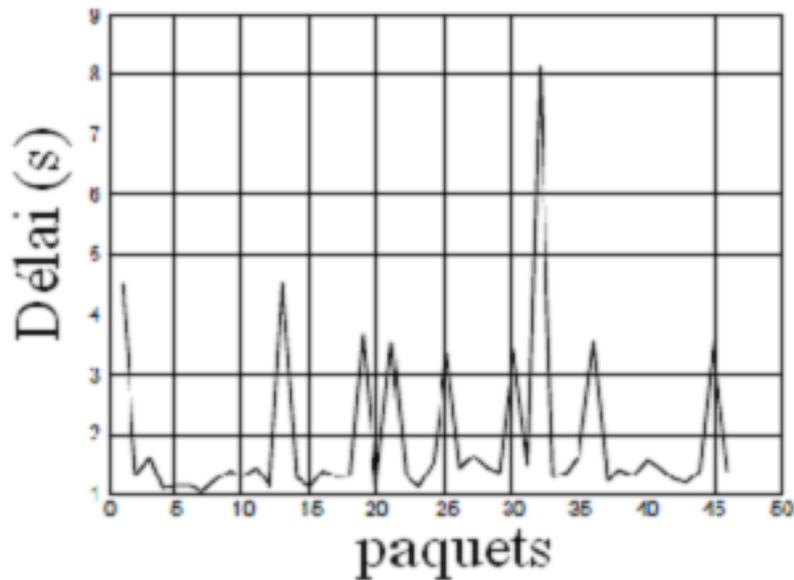


Figure 15 Délais Lundi matin [52]

Dans la Figure 15, la période choisie pour effectuer les enregistrements est une période de pointe (lundi matin), quand le trafic est important (les villes impliquées étaient les mêmes). La cause de ceci est la reprise du travail par les gens. Cette fois-ci, la partie constante du délai dépasse une seconde (1300 ms environ), et le caractère variable des pics est toujours présent. La fréquence de réception des paquets de données n'est pas précisée.

Une autre série de mesures est décrite dans [53]. Un exemple est reproduit dans la Figure 16. Une remarque est également faite sur la proportion de paquets qui sont arrivés en désordre à leur destination. Faisant référence à une autre étude [54], qui a trouvé que moins d'un pour cent des paquets arrivaient en désordre, les données examinées témoignent que moins de 0,1% de paquets sont arrivés en désordre.

Une observation commune sur l'ensemble de ces travaux est que les données provenant de la capture de paquets ont la caractéristique d'avoir une partie constante, comprise entre 40 ms et 1,2 s, en fonction de contexte, qui est occasionnellement perturbée par des pics.

Facteurs pouvant influencer la téléopération

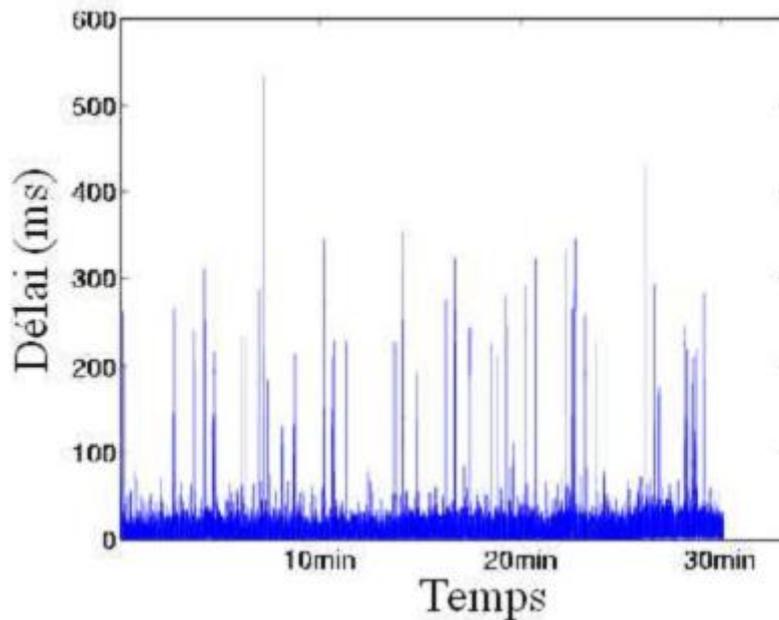


Figure 16 Délais typiques

Si on se concentre sur la partie constante du délai, il est possible d'envisager d'avoir sa valeur en temps réel, à condition que les horloges internes du site maître et du site esclave soient synchronisées. Une solution peut être l'utilisation du NTP (Network Time Protocol) [55]. Il s'agit d'un protocole largement répandu, utilisé pour la synchronisation des horloges des ordinateurs connectés à Internet. L'idée centrale est de prendre quelques mesures concernant le délai présent entre l'ordinateur souhaitant se synchroniser et le serveur de temps (une machine reliée à une horloge très précise, par exemple de type atomique).

Par la suite nous allons présenter une étude visant l'acquisition des informations sur internet, ainsi que la Qualité du service en Algérie.

2.8 Evaluation de la Qualité du service en Algérie :

Une étude récente afin d'évaluer la qualité de service en Algérie a été faite en 2016 entre l'Université des Sciences et de la technologie Oran (USTO-MB, Algérie) et l'Université de Tokyo, Japon (UdT). Nous avons mené une campagne de mesures du temps d'aller-retour entre, (USTO-MB, Algérie) et (UdT) (adresse IP :133.11.93.0). Les données utilisées dans cette étude ont été recueillies entre le nœud source et le nœud de destination à l'aide de l'utilitaire réseau Ping (Packet InterNet Groper) [56].

La figure 17 montre une application, avec laquelle on peut faire des rafales de mesure des Ping (avec un pas = 2 secondes), entre l'émetteur (USTO) qui envoie des paquets de taille fixe, et l'hôte cible (UdT). Ce dernier répond à l'aide d'un autre paquet. Nous avons utilisé le réseau internet pour mesurer le délai d'aller-retour.

Facteurs pouvant influencer la téléopération

L'étude effectuée sur les systèmes automatiques de production à distance [120] et celle sur le contrôle distant de machines supervisé [18] démontre que le RTT est suffisant pour caractériser une connexion internet.

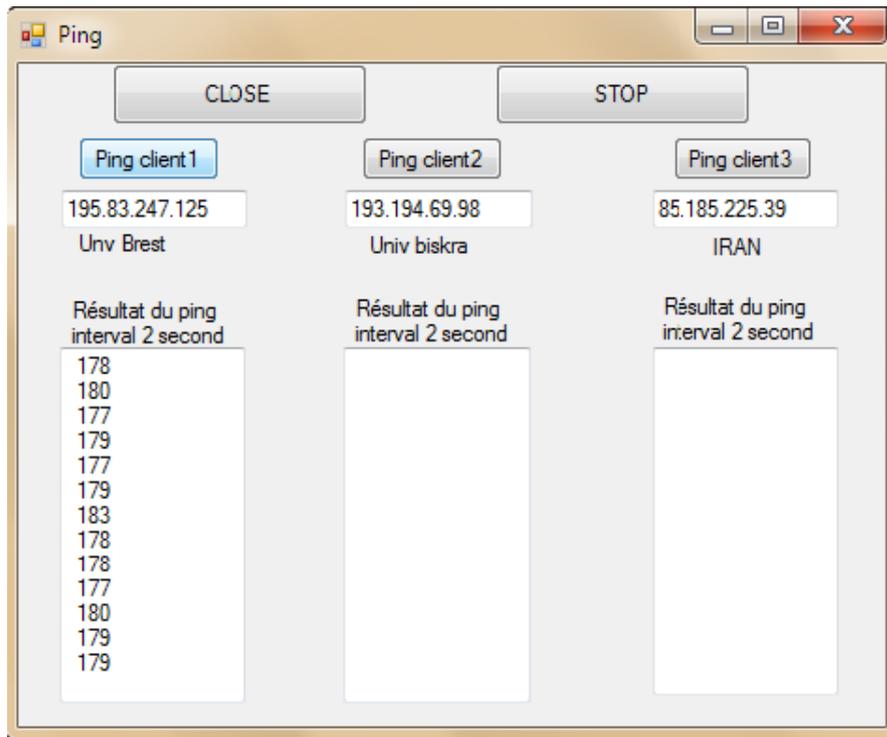


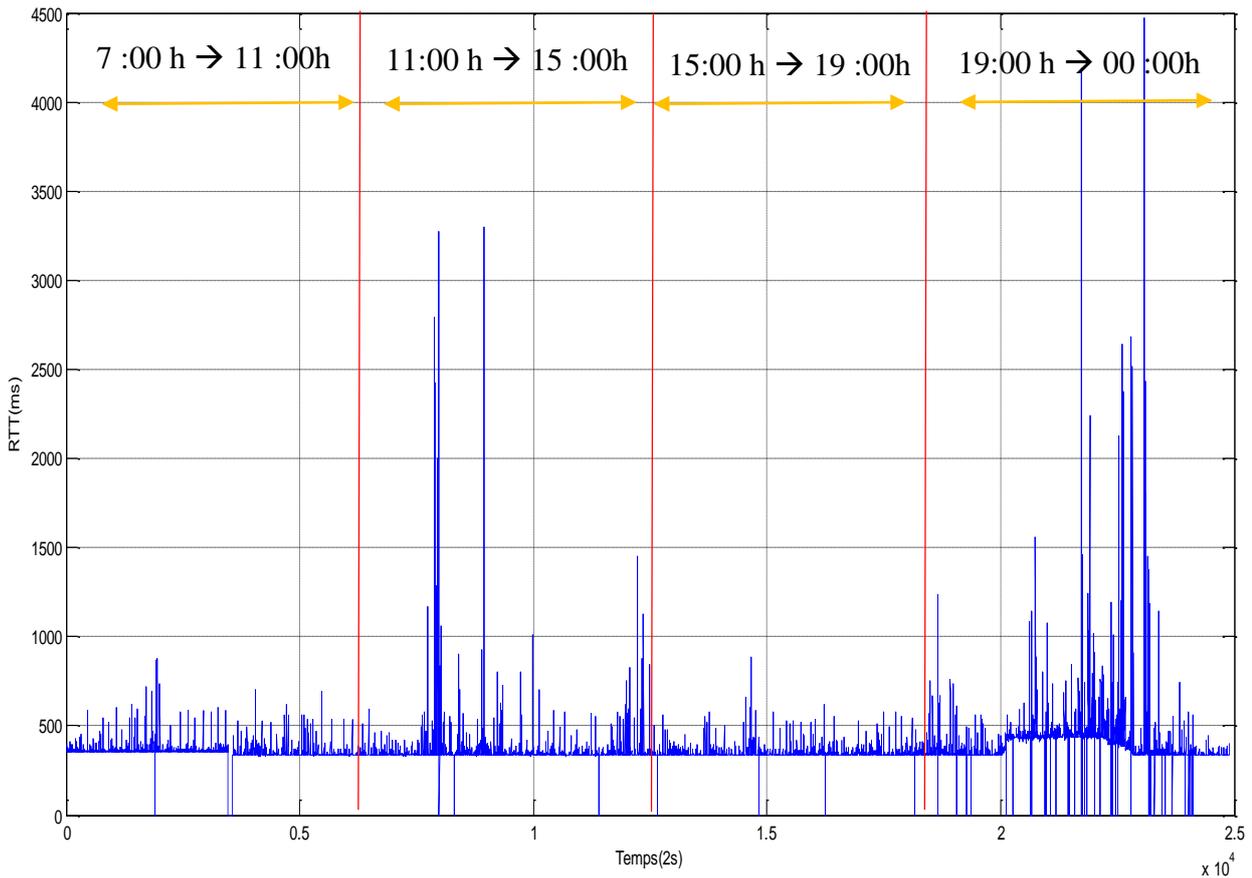
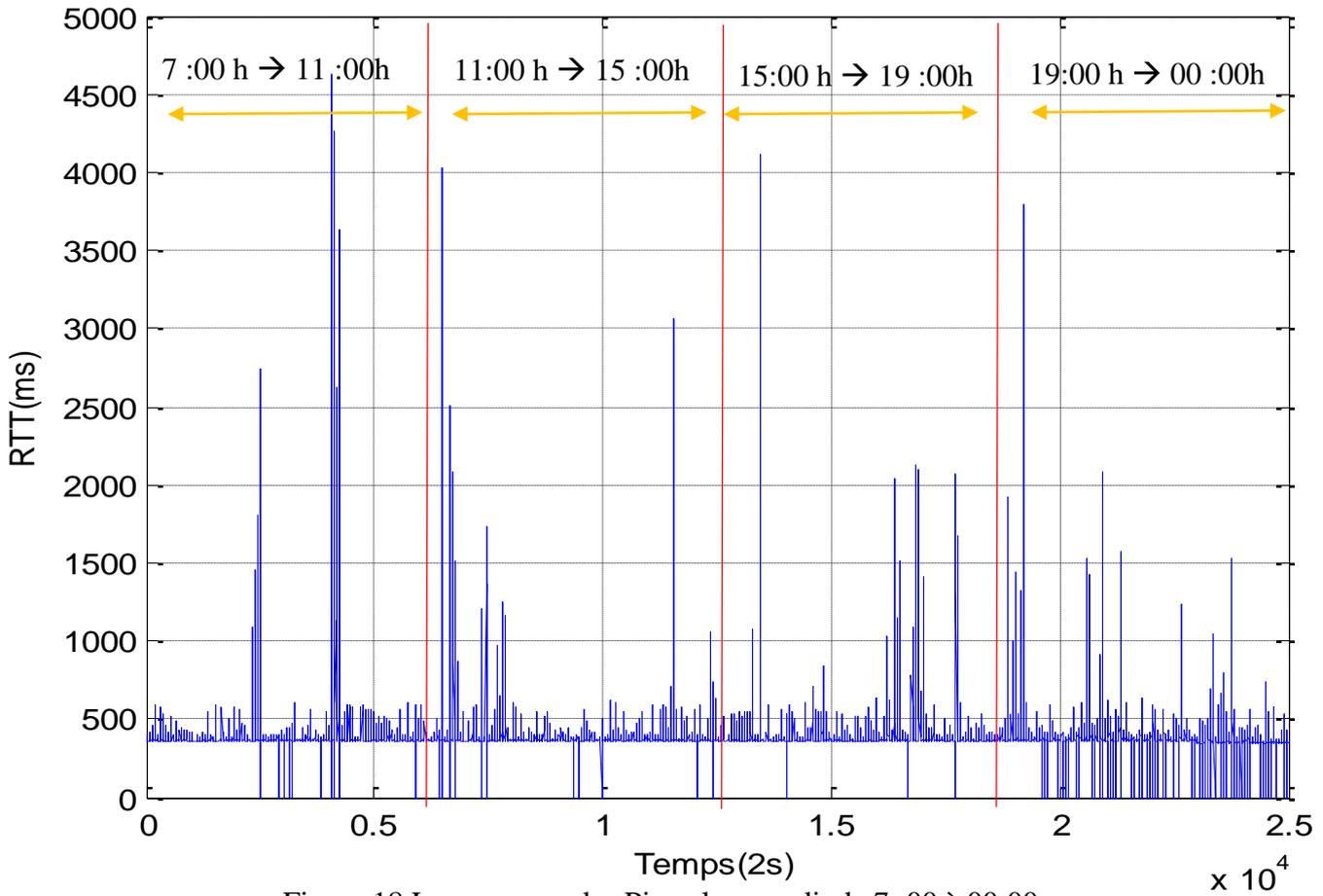
Figure 17 L'application développée pour mesurer les RTT à l'aide de l'utilitaire réseau Ping

Les mesures qui ont été faites entre (USTO) et (UdT), montrent que les RTT varient entre 300 ms et 500 ms. Cela permet le télécontrôle des matériels à distance. Mais il y a certaines heures de la journée pendant lesquelles le réseau est complètement congestionné, la qualité de service s'effondre et la qualité de l'expérience devient désastreuse.

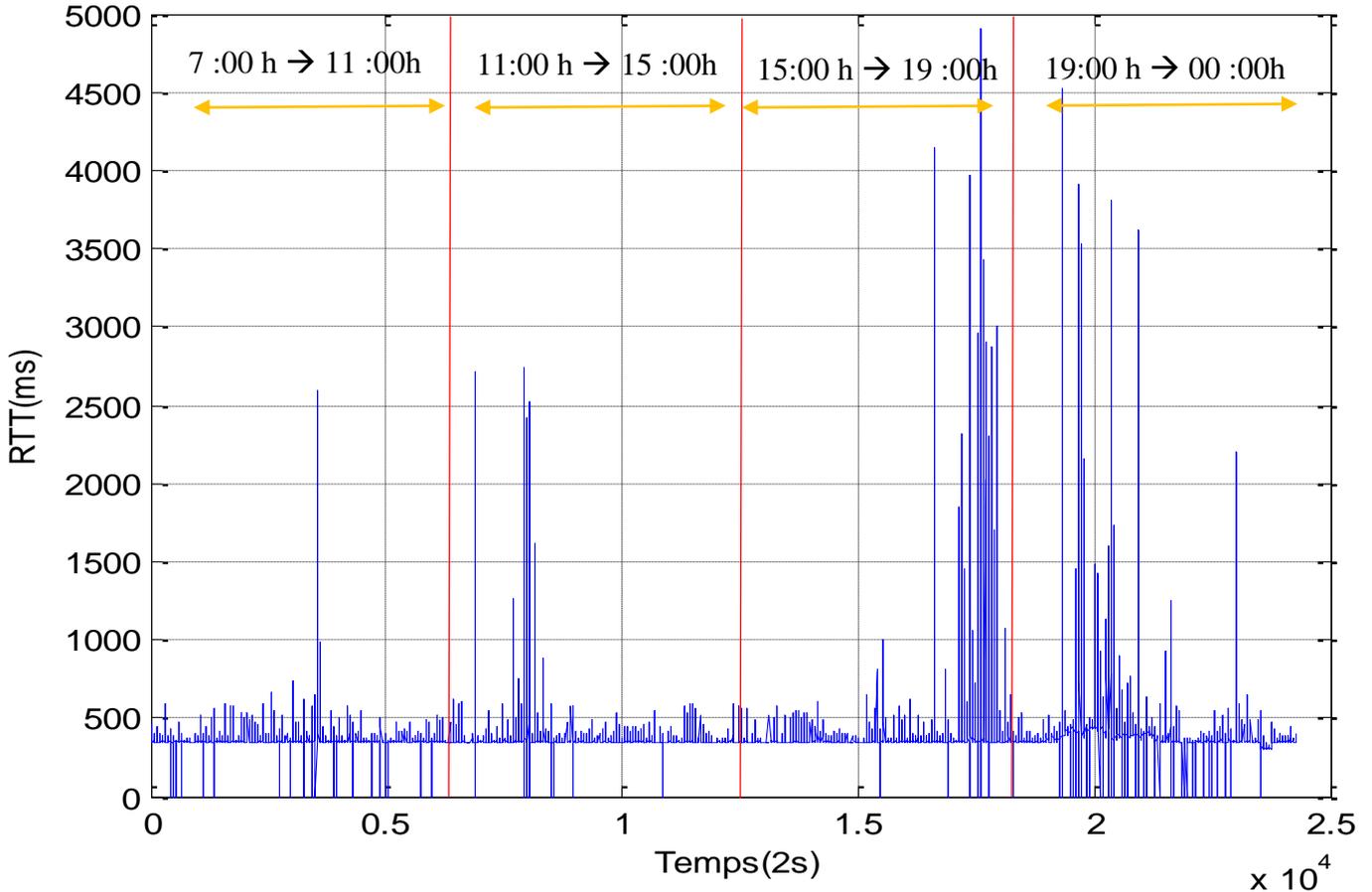
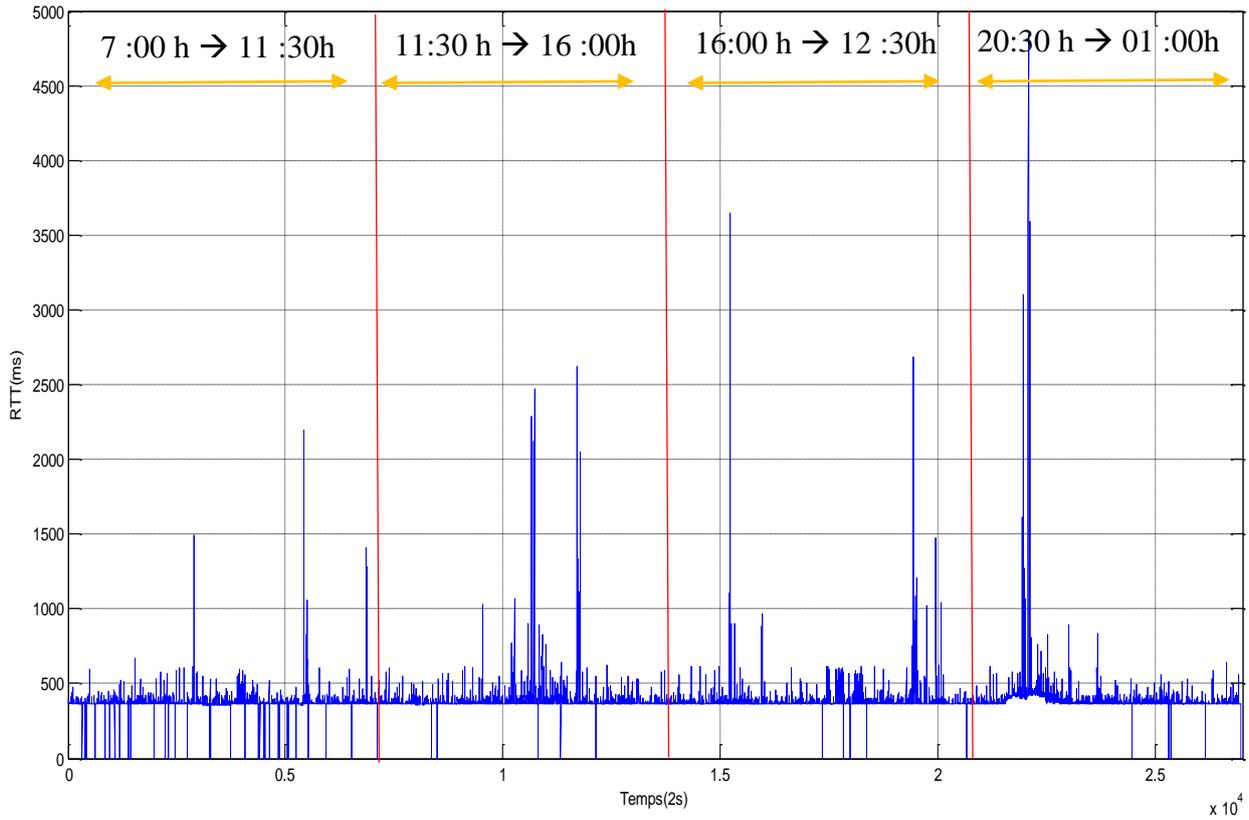
Les figures (18, 19, 20, 21, 22 et 23) montrent les mesures qui ont été faites pendant une semaine. Il est très difficile de connaître les heures où le réseau est congestionné, mais d'après les expériences, on a constaté que les variations des RTT sont légères entre 7 heures du matin et midi, ensuite les RTT varient aléatoirement, avant de revenir aux variations légères. Nous avons aussi constaté que le réseau est complètement congestionné entre 19 heures et minuit : dans cette période le télécontrôle est impossible. En revanche après minuit le télécontrôle redevient possible. D'après les expériences menées, on peut résumer que la qualité du service est bonne le matin entre 7 heures et midi, après minuit et parfois entre 15 heures et 17 heures.

Ces expériences peuvent nous donner une vue générale sur le réseau internet en Algérie, mais on ne peut pas se baser sur ces résultats pour contrôler les matériels à distance, car ces résultats obtenus ne sont pas répétitifs, et on peut trouver d'autres résultats incompatibles aux précédents. C'est pour cette raison que nous avons proposé de prédire les RTT en temps réel afin d'évaluer la QoS.

Facteurs pouvant influencer la téléopération



Facteurs pouvant influencer la téléopération



Facteurs pouvant influencer la téléopération

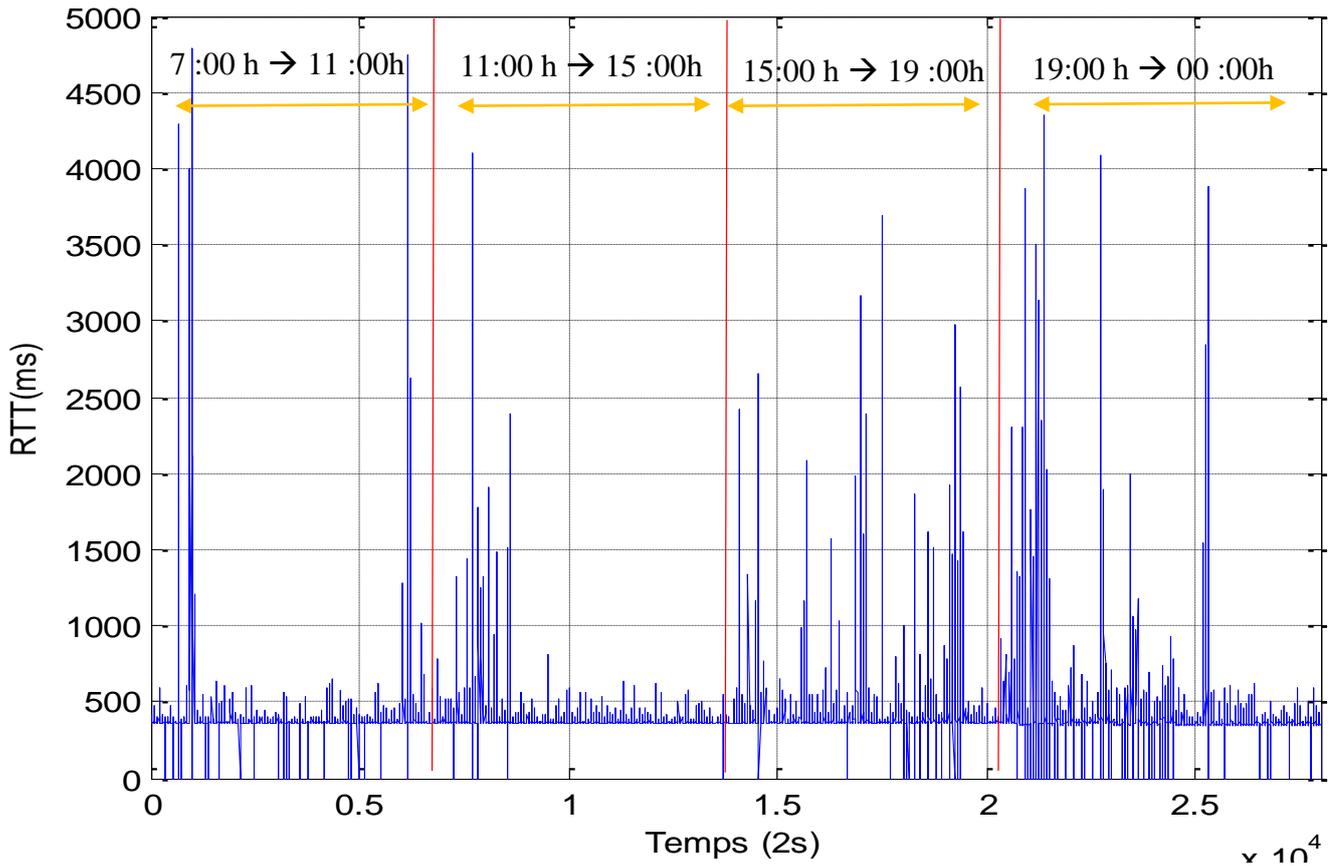


Figure 22 Les mesures des Pings le jeudi de 07:00 à 01:00

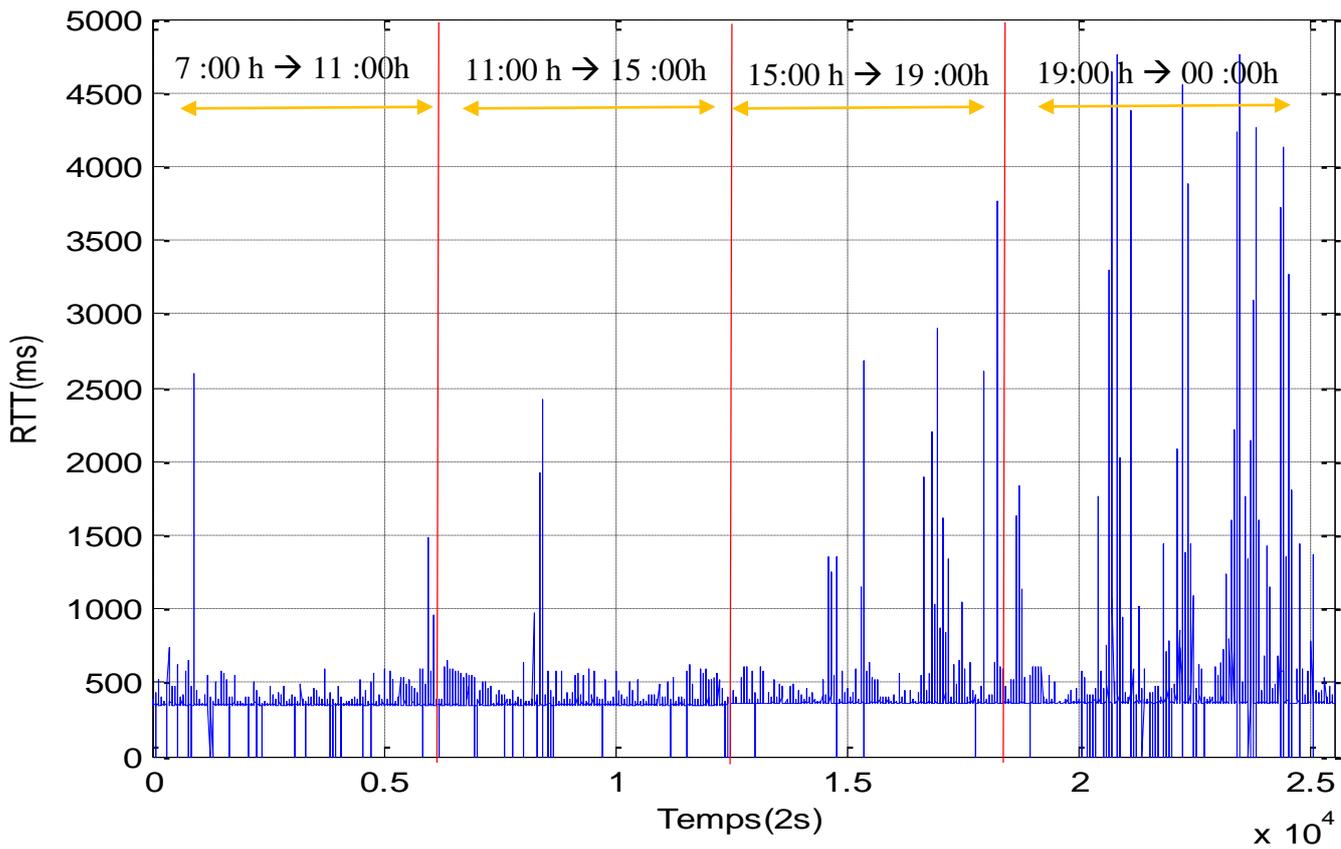


Figure 23 Les mesures des Pings le mercredi de 07:00 à 00:00

Facteurs pouvant influencer la téléopération

Par la suite nous allons présenter un état de l'art concernant les modèles utilisés pour décrire la dynamique des délais, et on terminera par notre contribution vis à vis de la problématique des délais sur internet afin d'évaluer la qualité du service en temps réel, cette contribution est considérée comme étant la nouveauté dans notre travail.

2.9 Aides proposées pour réduire l'influence du délai sur internet :

Le sujet de la thèse est la commande et le suivi de la machine industrielle via le réseau internet quelque soit sa fiabilité. En effet la communication via le réseau internet entre l'homme et la machine peut être perturbée par différents éléments extérieurs, il se peut alors que la communication soit perdue. Il est donc nécessaire de trouver un moyen de communication entre les machines et l'homme, quelque soit la qualité du réseau.

Selon [58 et 59], les chercheurs ont contrôlé à distance les systèmes mécaniques en utilisant les réseaux sans véritable qualité de service car sa prédiction est difficile. Pour cela, ce facteur dégrade les performances du système de téléopération. D'autant plus que ce retard peut provoquer l'instabilité du système [60, 61 et 62].

2.10 État de l'art sur les méthodes de prédiction :

L'influence du retard de communication sur la stabilité des systèmes de téléopération est un problème qui ne cesse d'attirer l'attention des communautés scientifiques [63, 64 et 65]. A cette problématique, des chercheurs par différents types de méthodes de contrôle ont cherché à compenser l'influence du délai sur Internet, en faisant borner ou fixer les valeurs de temps de retard [66 et 67]. Par la suite, de nombreux chercheurs ont trouvé qu'il serait utile que le délai soit connu à l'avance dans le système de contrôle basé sur Internet. Park et Lee [68] ont exploré les caractéristiques de transmission de données, puis ont mis en place un modèle de transmission de données pour leur système de téléopération.

Généralement, il y a deux techniques de prédiction ; la première : il y a des chercheurs qui utilisent les méthodes de prévision basées sur des algorithmes d'apprentissage ; Réseaux de neurones artificiels (Artificial Neuron Network (ANN)), qui sont les méthodes les plus représentatives de l'apprentissage [69]. Ces procédés ont également été proposés par de nombreux chercheurs. L'avantage de cette technique est que la série chronologique porte un terme non linéaire [70] en particulier pour la prédiction du trafic Internet.

Les ANNs ont été utilisés dans : Alarcon-Aquino et Barria [71], Cortez, Rio, Rocha, et Sousa [16], Katris et Daskalaki [73], Wang, Zhang, Yan et Zheng [74], Christos Katris et Sophia Daskalaki [70]. Par ailleurs, la prévision des séries chronologiques par RBF (Radial Basis

Facteurs pouvant influencer la téléopération

Function) peut être trouvée dans Gowrishankar et Satyanarayana [75], Ma et Xu [76], Szmit, Szmit et Kuzia [77]. Autres chercheurs ont utilisé les réseaux de neurones perceptron multicouches, [78] et [79], avaient été formés en mesurant des données de temporisation en cherchant la prédiction du RTT. Belhaj et Tagina ont proposé une approche qui permet de modéliser et de prédire les RTT à grande distance en utilisant des réseaux de neurones récurrents (RNNs) [80]. Ainsi Hanlin Sun, et Yuehui Jin ont présenté un réseau de neurones basé sur la théorie du chaos [81] .

Cependant, les réseaux de neurones ont besoin d'un long apprentissage et aussi de convergence du processus d'apprentissage dont cette dernière est parfois incertaine. En outre, les architectures de réseau sont difficiles à choisir.

La seconde technique utilisée pour prédire le RTT ; sont les méthodes de prédiction fondées sur des modèles mathématiques ; illustrées dans [82,83 et 84], où les chercheurs ont utilisés le modèle autorégressif (AR) pour la prédiction.

D'autres chercheurs ont proposé des méthodes de séries temporelles, en particulier le domaine de la prévision des séries temporelles (PST) [85]. L'objectif de PST est de modéliser un système complexe comme une boîte noire, dont nous ignorons le fonctionnement de son comportement. Par exemple Prasad Calyam et Ananth Devulapalli utilisent le modèle autorégressif à moyenne mobile intégrée (ARIMA), qui est le plus utilisé pour la modélisation de séries temporelles chaotiques [86]. Réfs [89, 90 et 91] ont montré que le modèle ARIMA peut être utilisé pour prédire le trafic Internet. Cependant, le modèle ARIMA traditionnel n'est pas adapté pour la prédiction du RTT, due à la non-stationnarité et non linéarité de ce dernier. [87,16].

D'après cet état de l'art, Nous pouvons diviser les techniques de la prédiction en deux méthodes :

- 1- Les méthodes de prévision basées sur des algorithmes d'apprentissage (Réseaux de neurones artificiels).
- 2- Les méthodes de prédiction fondées sur des modèles mathématiques (la modélisation des séries temporelles).

Dans notre travail nous avons choisi d'utiliser les méthodes statistiques qui sont basées sur des modèles mathématiques. Nous nous sommes basés sur deux facteurs importants afin de choisir la méthode appropriée pour la prédiction :

Facteurs pouvant influencer la téléopération

A. La précision de la prédiction :

Beaucoup de chercheurs ont fait des études comparatives entre le réseau de neurones avec tous ses types et la méthode ARIMA et AR qui sont les techniques fréquemment utilisées pour la modélisation des séries chronologiques. Dans ces travaux les chercheurs ont conclu que la précision de prédiction par les réseaux de neurones est inférieure à celle d'ARIMA et AR. [16].

B. Le temps de calcul :

Ce point est très important, pour la prédiction en temps réel ; les travaux qui ont été cités dans ce bref état de l'art, font la prédiction hors ligne. Cela est dû aux problèmes suivants :

Dans les travaux ayant utilisé les réseaux de neurones, les chercheurs ont besoin de longue formation (la phase d'apprentissage). Par ailleurs, la difficulté est de choisir l'architecture des réseaux pour avoir de bons résultats de prédiction. Pour les autres méthodes (ARIMA et AR) ils ont besoin de beaucoup de calcul afin de choisir le bon modèle pour la prédiction. A cause de ces problèmes, il est très difficile de prédire le RTT en temps réel pour ne pas dire impossible.

Dans notre travail nous avons proposé une méthode statistique (Holt Winter), en raison des caractéristiques de la précision de prédiction et du temps de calcul, car cette méthode réalisait le calcul de la prévision dans un seul traitement. Pour valider notre choix une étude comparative a été faite dans le chapitre 5 entre la méthode proposée (Holt Winters) et la méthode ARIMA. Par la suite nous allons donner les détails sur ces deux méthodes.

2.11 Séries Temporelles :

Une série temporelle est une suite finie (x_1, x_2, \dots, x_n) de données indexées dans le temps. L'indice temps peut être selon les cas : la minute, l'heure, le jour, l'année etc. L'analyse des séries temporelles consiste en opérations de prédiction, de modélisation et caractérisation [92]. L'objectif de la prédiction est de prévoir avec précision l'évolution à court terme de séries temporelles, et la modélisation vise la détermination des caractéristiques du comportement à long terme. La caractérisation a comme but de déterminer les propriétés fondamentales d'une série temporelle. La prédiction est le sujet de ce travail. Nous rappelons que la prédiction des séries temporelles a principalement débuté dans les années 70. De nombreuses techniques de prévision de l'évolution des systèmes dynamiques ont été développées pour des domaines aussi variés que l'agriculture, la météorologie, l'automatique, la finance, etc.

Dans cette thèse, nous nous intéressons à la prédiction du RTT, dans le but d'établir une commande longue distance, soit la téléopération.

La prédiction du RTT sur internet joue un rôle clé dans l'amélioration des performances dynamiques pour de nombreuses applications. Par conséquent, l'approche idéale de la prédiction

Facteurs pouvant influencer la téléopération

du RTT sur Internet doit être étudiée avec insistance. Pour ce faire nous allons examiner deux méthodes (ARIMA et HOLT-WINTER).

2.11.1 Le processus Auto Régressif, Moyenne mobile (ARMA) :

Un processus ARMA est constitué d'une partie autorégressive notée AR (Auto Regressive Process) qui est une combinaison linéaire finie en t des valeurs passées du processus, et d'une partie moyenne mobile notée MA (Moving Average Process) qui est une combinaison linéaire finie en t des valeurs passées d'un bruit blanc.

Un modèle (Auto Regressive Moving Average) ARIMA est étiqueté comme modèle ARIMA (p, d, q) , dans lequel:

p est le nombre de termes auto-régressifs

d est le nombre de différences

q est le nombre de moyennes mobiles.

Un ARMA données modélisées de séries chronologiques peut être représenté comme dans (Eq1). [93].

$$y_t = a_1 y_{t-1} + a_2 y_{t-2} + \dots + a_p y_{t-p} + b_1 e_{t-1} + \dots + b_q e_{t-q} + e_t \quad \text{Eq 1}$$

y_t les valeurs observées de la série.

y_{t-1}, y_{t-2} sont des données aux instants passés.

e_{t-1}, e_{t-2} sont des erreurs à des instants passés et e_t signifie erreur présente.

$a_1, a_2 \dots a_p$ sont les coefficients AR.

$b_1, b_2 \dots b_p$ sont les coefficients MA.

Dans la méthodologie d'analyse des séries chronologiques synthétisée par Box et Jenkins en 1976 [94], on utilise ces trois types de processus pour construire un modèle restituant le mieux possible le comportement d'une série temporelle selon une procédure en trois étapes : identification, estimation et diagnostic, qu'il convient de réitérer jusqu'à ce que le résultat soit jugé satisfaisant. Mais avant de construire le modèle il faut d'abord, vérifier la stationnarité de la série car les données des séries chronologiques ne sont pas nécessairement toujours stationnaires.

2.11.2 Identification :

La première étape dans la méthodologie proposée par Box et Jenkins [94] concerne la décomposition retenue de la série chronologique selon les trois types de processus en spécifiant les trois paramètres p, d et q du modèle ARIMA. On suppose à cet instant que toute composante saisonnière a été éliminée de la série chronologique.

Facteurs pouvant influencer la téléopération

L'identification des processus autorégressifs et de moyennes mobiles susceptibles d'expliquer le comportement de la série temporelle suppose de vérifier tout d'abord la stationnarité de la série puisque les processus de base, qu'ils soient autorégressifs ou de moyennes mobiles, sont essentiellement stationnaires en raison des contraintes pesant sur leurs paramètres. Un processus est dit faiblement stationnaire si son espérance et sa variance sont constantes et si sa covariance ne dépend que de l'intervalle de temps [95]. Si la série n'est pas stationnaire, c'est à dire si la moyenne de la série varie sur le court terme ou que la variabilité de la série est plus élevée sur certaines périodes que sur d'autres, il convient de transformer la série pour obtenir une série stationnaire. La transformation la plus courante est la différenciation de la série, opération où chaque valeur de la série est remplacée par la différence entre cette valeur et celle qui la précède. Transformation logarithmique ou bien racine carrée peuvent être utilisées en situation d'hétéroscédasticité, où la variance de la série n'est pas constante et dépend des valeurs prises, par exemple avec une forte volatilité pour des valeurs élevées et une faible volatilité pour des valeurs faibles.

Une fois obtenue la stationnarité de la série, l'étape suivante consiste à analyser le graphe de la fonction d'autocorrélation (FAC) et celui de la fonction d'autocorrélation partielle (FAP) afin de déterminer les paramètres (p,d,q) du modèle.

Le paramètre d est fixé par le nombre de différenciations effectuées pour rendre la série stationnaire. En règle générale une différenciation suffit : $d \in \{2, 1,0\}$.

Une fois ce paramètre fixé, il convient de spécifier l'ordre p du processus autorégressif et q celui de la moyenne mobile. Les corrélogrammes, graphes de la fonction d'autocorrélation et de la fonction d'autocorrélation partielle permettent selon leurs aspects d'identifier correctement les paramètres p et q dont les valeurs n'excèdent pas deux en règle générale : $p \in \{2, 1,0\}$ et $q \in \{2,1,0\}$.

2.11.3 Estimation :

La procédure ARIMA du module SPSS (Statistical Package for the Social Sciences Séries chronologiques) [97] permet selon un algorithme rapide d'estimation du maximum de vraisemblance [96] d'estimer les coefficients du modèle identifiés au préalable en fournissant les paramètres p , q et d . L'exécution de la procédure ajoute de nouvelles séries chronologiques représentant les valeurs ajustées ou prédites par le modèle, les résidus (erreurs d'ajustement) et les intervalles de confiance de l'ajustement à votre fichier de données courant. Ces séries pourront être utilisées dans une nouvelle itération de type identification-estimation-diagnostic.

Facteurs pouvant influencer la téléopération

2.11.4 Diagnostic :

Dans cette étape finale du triptyque *identification-estimation-diagnostic* de la méthode de Box et Jenkins, on doit vérifier les valeurs des fonctions d'autocorrélation et d'autocorrélation partielle de la série des résidus doivent être toutes nulles ; si les autocorrélations d'ordre 1 ou 2 diffèrent significativement de 0, alors la spécification (p,d,q) du modèle *ARIMA* est probablement inadaptée ; cependant, une ou deux autocorrélations d'ordre supérieur peuvent par aléas dépasser les limites de l'intervalle de confiance à 95 %. [95].

2.12 Méthodes de Holt-Winter :

Ce sont les méthodes privilégiées parmi les techniques de lissage exponentiel dans le cas de séries d'observations, présentant à la fois un terme de tendance et une saisonnalité. Elles opèrent le lissage simultané de trois termes correspondant respectivement à des estimations locales du niveau de la série désaisonnalisée L_t , de la pente, de la tendance B_t et de la saisonnalité S_t . On peut citer au moins deux méthodes, l'une d'elles est adaptée aux séries admettant une décomposition multiplicative et l'autre correspondant aux décompositions additives [98 et 62].

2.12.1 Holt-Winter, version additive :

En notant S la périodicité naturelle de la série, le système d'équations est donné par [98] :

- *Lissage de la moyenne :*

$$L_t = \alpha(x_t - S_{t-s}) + (1 - \alpha)(L_{t-1} + b_{t-1}) \quad \text{Eq 2}$$

- *Lissage de la tendance :*

$$b_t = \beta(L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta)b_{t-1} \quad \text{Eq 3}$$

- *Lissage de la saisonnalité :*

$$S_t = \gamma(x_t - L_t) + (1 - \gamma)S_{t-s} \quad \text{Eq 4}$$

Facteurs pouvant influencer la téléopération

Avec :

L_t : Moyenne lissée de la série en t .

x_t : Valeur observée de la série en t .

S_t : Coefficient saisonnier en t .

b_t : Tendance estimée en t .

2.12.2 Holt-Winters, version multiplicative :

Les équations sont les suivantes :

- *Lissage de la moyenne :*

$$L_t = \alpha \frac{x_t}{S_{t-s}} + (1 - \alpha)(L_{t-1} + b_{t-1}) \quad \text{Eq 5}$$

- *Lissage de la tendance :*

$$b_t = \beta(L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta)b_{t-1} \quad \text{Eq 6}$$

- *Lissage de la saisonnalité :*

$$S_t = \gamma \frac{x_t}{L_t} + (1 - \gamma)S_{t-s} \quad \text{Eq 7}$$

Le modèle de Holt–Winters présente l'avantage d'intégrer une composante saisonnière et donc de réaliser le calcul de la prévision dans un seul traitement. Trois lissages distincts sont effectués [99] :

- Le lissage de la moyenne avec un coefficient de lissage α , avec $\alpha \in [0 ; 1]$,
- Le lissage de la tendance avec un coefficient de lissage β , avec $\beta \in [0 ; 1]$,
- Le lissage de la saisonnalité avec un coefficient de lissage γ , avec $\gamma \in [0 ; 1]$,

Pour obtenir des bons résultats de prédiction, il faut choisir les coefficients avec soin. Les choix des paramètres de lissage feront l'objet de la section suivante.

2.12.3 Choix des paramètres de lissage :

Pour débiter le processus de lissage, il convient de choisir une valeur pour la constante α . Ce choix est très important car il conditionne la prévision future à travers le degré de pondération que l'on affecte au passé récent et au passé lointain. Diverses procédures d'estimation ont été

Facteurs pouvant influencer la téléopération

établies. La plus classique consiste à retenir une valeur de α qui minimise l'écart entre la prévision et la réalisation sur la partie connue de la chronique [99]. Une autre approche consiste à élaborer des procédures de régulation et de contrôle permettant la modification de la constante du lissage. Ainsi, en cas de divergence systématique de la prévision, le coefficient α s'ajuste automatiquement pour s'adapter à ce changement de structure.

Le principe de la technique de calcul la plus employée est simple : pour un intervalle donné de valeurs de α, β et γ avec un pas assez fin (exemple 0,05), les prédictions sont simulées et la somme des carrés des erreurs de prévision est donc calculée. Nous retenons la valeur de α qui rend minimums la somme des carrés des écarts (Eq 8). Cette technique peut être généralisée pour la détermination des trois coefficients (α, β, γ).

$$\sum_{t=1}^s (x_t - S_t)^2. \quad \text{Eq 8}$$

2.12.4 La prédiction :

La méthode de Holt-Winter permet de réaliser des prédictions à partir de données historiques. Cette technique permet de donner une plus grande importance aux données historiques les plus proches de la prévision et une valeur moindre aux plus antérieures. La prévision à l'horizon h est donnée par Eq 10 ; avec laquelle nous prédisons le RTT.

Après les essais accomplis (chapitre 5), les résultats montrent que cette méthode est capable de prédire avec précision si les variations de RTT sont légères, et concernant les variations brusques, c'est difficile d'obtenir des prévisions précises.

Pour résoudre ce problème, il y a des chercheurs qui proposent de négliger les pics dans la série temporelle. Cette solution peut fonctionner dans d'autres domaines, telle que la prédiction de la météo ou l'économie...etc. Mais dans notre cas nous avons besoin de toutes les mesures afin d'obtenir un bon résultat de prédiction.

Nous avons proposé une solution pour traiter le problème de la prédiction en temps réel quelque soit les variations de RTT. La prédiction à l'horizon h est donnée par Eq 10, avec laquelle nous pouvons prédire les RTT. Dans cette équation on se base sur les six dernières valeurs de la série modelée pour faire les prédictions. Ces valeurs sont indiquées dans le lissage de la saisonnalité S_{t-s+h} .

Nous proposons que pour obtenir une valeur prédite plus précise, de calculer la moyenne de la série modelée (Eq 9) au lieu de faire la prédiction avec les six dernières valeurs de la série

Facteurs pouvant influencer la téléopération

modélisée. Donc la nouvelle équation de prédiction est montrée dans Eq 11, qui est presque la même que Eq 10 à l'exception de la valeur de S_{t-s+h} , qui est devenue comme le montre Eq 9.

$$S'_{t-s+h} = \sum_0^t \frac{S_t}{t} \quad \text{Eq 9}$$

$$\hat{x}(t, f) = (L_t + h \cdot b_t) S_{t-s+h} \quad \text{Eq 10}$$

$$\hat{x}(t, f) = (L_t + h \cdot b_t) S'_{t-s+h} \quad \text{Eq 11}$$

L'amélioration proposée nous a donné de meilleurs résultats de prédiction que l'équation de prédiction classique, mais elle est efficace seulement dans le cas d'une variation brusque et inefficace dans le cas d'une légère variation. Encore une fois, pour traiter ce dilemme, nous avons décidé de combiner les deux équations comme l'illustre la deuxième section de l'algorithme proposé. Nous avons déterminé que les variations sont brusques ou légères de la manière suivante :

- Si la différence entre les deux dernières mesures de RTT est inférieure à 20 ms, cela veut dire que les variations sont légères.
- Si la différence entre les deux dernières mesures de RTT est supérieure à 20 ms, cela veut dire que les variations sont brusques.

Choisir le seuil 20 ms pour déterminer si les variations sont brusques ou légères n'était pas un choix aléatoire. Cela a été fait après beaucoup d'expériences, nous avons constaté que la valeur de 20 ms est commode pour faire la différence entre les deux types de variation. Après l'étape de détermination des variations, l'algorithme va choisir automatiquement la bonne équation de prédiction. Enfin, nous avons résolu le problème de la prédiction que ce soit les variations de RTT, brusques ou légères et sans faire trop de calculs. Ceci conduit à un processus de prédiction plus rapide en temps réel.

Avant de calculer les valeurs qui prédisent, nous devons connaître les valeurs initiales $L_1, \dots, L_s, b_1, \dots, b_s$ et S_1, \dots, S_s . Dans notre travail, nous considérons les six premières valeurs de RTT comme déjà connues ($s=6$), ainsi que les valeurs initiales données par les équations suivantes :

Facteurs pouvant influencer la téléopération

$$L_t = \frac{x_1 + \dots + x_s}{s} \quad \text{Eq 12}$$

$$b_t = \frac{1}{s} \left[\frac{x_{1-s} + \dots + x_1}{s} + \dots + \frac{x_{2s} + \dots + x_s}{s} \right] \quad \text{Eq 13}$$

$$S_t = \frac{x_t}{L_t} \quad \text{Eq 14}$$

Dans notre thèse nous nous intéressons à la version multiplicative, car nous obtenons de meilleurs résultats de prédiction par Holt-Winters multiplicative que par l'additive, comme le montrera chapitre 5. Cependant, l'inconvénient de la version multiplicative se produit lorsqu'il y a des mesures nulles dans la série temporelle ($x_t = 0$). Dans ce cas, la version multiplicative est incapable de faire la prédiction à cause de la valeur de lissage de saisonnalité S_t qui devient nulle, et donc c'est impossible de calculer la valeur de L_t comme cela est montré dans Eq 5.

Par contre la version additive ne pose pas ce problème, même s'il y a des valeurs nulles dans la série temporelle, mais l'inconvénient de cette version est la précision de la prédiction, où nous avons trouvé que la prédiction en utilisant la méthode H-W multiplicative est meilleure que l'additive comme il est montré dans chapitre 5. Pour surmonter ces problèmes et prédire le RTT avec précision et quel que soit la QdS, nous avons proposé d'améliorer la méthode H-W. Cette amélioration est résumée dans l'algorithme est montré dans la Fig.24. Ces améliorations sont les suivantes :

- 1- Concernant le problème des mesures nulles, nous avons proposé de combiner les deux versions (l'additive et la multiplicative). Si nous trouvons des observations nulles ($x_t = 0$), l'algorithme proposé va automatiquement modéliser la série avec la version additive dans le cas contraire, on utilise la version multiplicative.
- 2- Concernant le problème de la variation brusque (cité précédemment), s'il y a une différence entre deux observations ($|x_{t-1} - x_t| \geq 20$ ms), on calcule les valeurs prédites avec Eq 11, sachant que S'_{t-s+h} est la moyenne de la série. Si les variations sont légères ($|x_{t-1} - x_t| < 20$ ms), on utilise l'équation classique pour les prédictions Eq10. Dans cette équation on se base sur les six dernières valeurs de la série modelée pour faire les prédictions. Le basculement entre les équations se fait automatiquement.
- 3- La troisième amélioration sur la méthode H-W est l'adaptation des coefficients de lissage pour modeler la série afin d'obtenir de bons résultats de prédiction.

Facteurs pouvant influencer la téléopération

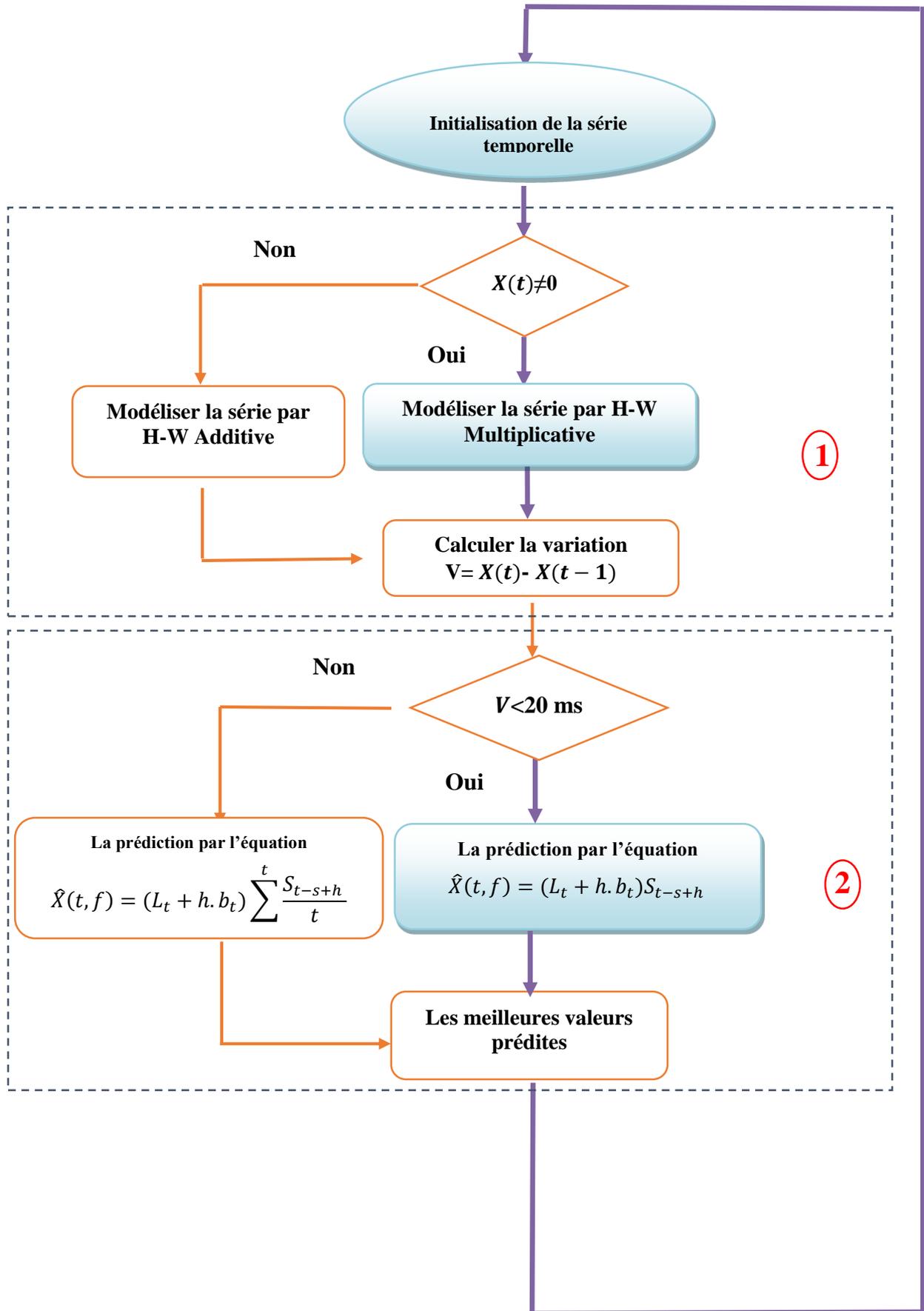


Figure 24 La méthode Holt-Winters améliorée

Facteurs pouvant influencer la téléopération

2.13 Conclusion :

La conclusion qu'on peut tirer de cette étude bibliographique est que le délai sur Internet est principalement dû à la composante physique (la distance entre le poste maître et le poste esclave). Cette composante est à peu près constante dans le temps. Il est possible de rencontrer des pics de délai, principalement dûs à la congestion du réseau (trafic proche de sa capacité maximale). Si on manque de connaissance globale du réseau (architecture et clients connectés), il est difficile d'anticiper les pics avec précision.

Dans ce chapitre, un état de l'art a été présenté concernant les méthodes utilisées pour prédire le RTT, ainsi nous avons cité les avantages et les inconvénients de chaque technique utilisée afin de proposer notre solution vis-à-vis de la problématique du délai sur internet.

CHAPITRE 3

Architectures de téléopération Proposées

Introduction :

Ce chapitre présente la commande à distance d'un robot mobile (Pioneer 3-AX) via internet. Le temps du retard est l'un des plus grands obstacles de nombreuses applications en temps réel, en particulier pour les systèmes de contrôle basés sur Internet.

Pour surmonter cette problématique, nous avons proposé deux architectures afin de contrôler un robot dans un réseau internet sans qualité de service garantie.

Ce chapitre présente aussi l'utilisation de la réalité virtuelle dans le contexte de la commande à distance. La réalité virtuelle peut être utilisée d'une manière classique afin de simuler le comportement d'un système, mais également en parallèle avec le système réel afin d'améliorer la qualité du contrôle.

3.1 Architectures de téléopération via internet (état de l'art) :

La télérobotique est un domaine de la robotique qui a attiré beaucoup d'attention des chercheurs au cours des dernières années [104, 102 et 103]. Le terme de télérobotique via internet se réfère à un système de robot commandé à distance et surveillé à travers Internet. L'intérêt croissant dans ce domaine est stimulé par la promotion d'Internet, qui donne accès à diverses ressources informatiques pratiquement de partout dans le monde. L'augmentation de la demande d'Internet comme moyen de communication pour le système de télérobotique vient aussi du fait qu'il utilise un protocole de communication standard, et que le support physique est disponible pour l'application de télérobotique, éliminant le besoin pour développer un système de communication dédié, exclusif, et cher. Internet ne fournit pas une qualité de service garantie (QoS), il donne un certain nombre de limitations et de difficultés, telles que les contraintes des délais de bout-en-bout, de la limitation de la bande passante, de la congestion, de la disponibilité et des pertes ou erreurs des informations transmises... etc. Ces contraintes influent sur la performance des systèmes de télérobotique basés sur Internet. [101, 104, 105, 106 et 107].

Il y a deux générations de robots commandés par Internet. Le projet Mercury [34] a été l'un des premières implémentations de télérobotique sur Internet, avec l'Australie Télé robot [32] mis en ligne presque en même temps. Depuis, environ 40 de ces systèmes ont été mis en ligne par les équipes de recherche à travers le monde [110]. La première génération de robots commandés par internet est principalement basée sur des bras robotisés ou des robots mobiles simples contrôlés directement par des opérateurs humains [32, 34 et 35]. Ces robots commandés par Internet, opéraient dans un environnement bien structuré avec peu d'incertitude, et n'avaient pas l'intelligence locale. En revanche, la recherche sur la deuxième génération de robots commandés

Architectures de téléopération proposées

par internet a récemment commencé à se concentrer sur les robots mobiles autonomes qui naviguent dans un environnement dynamique et incertain [112,113 et 114]. La principale caractéristique de cette génération est l'autonomie des robots, ce qui leur permet de naviguer et de faire face à l'incertitude dans le monde réel. L'objectif principal dans la construction de cette génération de robots commandés par internet est le contrôle à distance et la surveillance [115 et 116].

La téléopération des systèmes complexes en utilisant Internet comme canal de communication, génère plus de difficultés telles que l'indisponibilité du système, l'imprécision et l'instabilité. Cela est dû à la qualité du service non garantie sur internet et surtout l'instabilité du délai de bout en bout [59, 60 et 61]. Pour résoudre ce problème, de nombreux chercheurs ont développé une architecture client–serveur basée sur la réalité virtuelle pour commander à distance un robot manipulateur à cinq degrés de liberté, appelé Mentor [2, 3 et 119]. Les interfaces basées sur la réalité virtuelle sont capables de compenser les délais de communication, et ceci par la fourniture des retours des informations exemptes du retard à l'opérateur. Ce dernier peut ainsi continuer le cours de manipulations sans faire appel à une précision particulière et sans avoir à attendre le retour réel des informations.

La conception d'un système de contrôle direct qui permet à l'utilisateur de contrôler le mouvement des robots continu peut être difficile. De tels systèmes de contrôle ont été proposés, mais sont insuffisants pour atténuer l'influence du retard sur Internet. Pour pallier ce problème, beaucoup d'approches ont été proposées. La stratégie "Move et Wait" [104], typique pour les robots de l'espace a été appliquée en premier avec la communication à longue distance. Mais cette solution prend beaucoup de temps pour déplacer le robot vers la cible, car l'opérateur doit arrêter le robot chaque fois avant de passer à la tâche suivante. Pour cette raison d'autres solutions ont été proposées, et nous nous intéressons dans ce travail à la stratégie « Speed Limit Module and Delay Approximator » [104] et le GEMMA-Q [120 et 121]. Ces solutions permettent de contrôler la vitesse d'un robot mobile suivant la qualité du service afin que le robot atteigne la position désirée. Mais il n'est pas facile de trouver un SLM uniforme pour tous les utilisateurs.

Notre objectif est mis sur le domaine de la téléopération de robot mobile. Dans ce domaine, certains systèmes de télérobotique sur Internet ont utilisé le contrôle direct [35,122 et 123]. De toute évidence, le contrôle direct n'est pas adapté pour les robots mobiles contrôlés par internet à cause de la limitation de la bande passante et des retards lors de la transmission à longue distance. Afin de surmonter ces problèmes, nous avons proposé deux stratégies pour commander à distance le robot mobile (Pioneer P3AT) dans un réseau sans qualité du service garantie.

Dans la première stratégie nous avons considérablement amélioré notre architecture (client-serveur). L'application client contient une java applet, retour visuel et une application 3D

Architectures de téléopération proposées

pour simuler le comportement de notre system (robot mobile Pioneer P3AT), et l'application serveur contient une architecture qui nous permet de prédire le RTT en temps réel avec la méthode H-W [124] afin d'obtenir une bonne évaluation de la qualité du service (QoS), dans le but de pouvoir contrôler le robot sans risque et avec précision. Dans la deuxième stratégie nous avons utilisé la même interface client, mais l'application serveur contient une architecture qui nous permet de temporiser les commandes envoyées vers le robot avec un retard connu et constant afin d'éviter les variations aléatoires du retard. Dans notre thèse, deux stratégies ont été proposées pour contrôler à distance le robot mobile Pioneer, et on les a comparé à d'autres stratégies, afin d'examiner et répondre à leurs avantages et inconvénients.

3.2 Architectures du système de téléopération :

L'architecture générique de la télérobotique est la même dans la plupart des applications. Le problème principal est d'atténuer l'influence de la variation du retard sur internet. L'impact de la QoS apparait clairement sur un robot mobile, car à travers le réseau internet la commande atteint le robot avec un retard Δt , Le robot qui se déplace à la vitesse V peut se déplacer à une distance supplémentaire Δd avant de recevoir la commande pour tourner ou bien s'arrêter comme illustré sur la Figure 25. On remarque que l'erreur sur la trajectoire s'accumule, le robot n'atteint pas la position désirée.

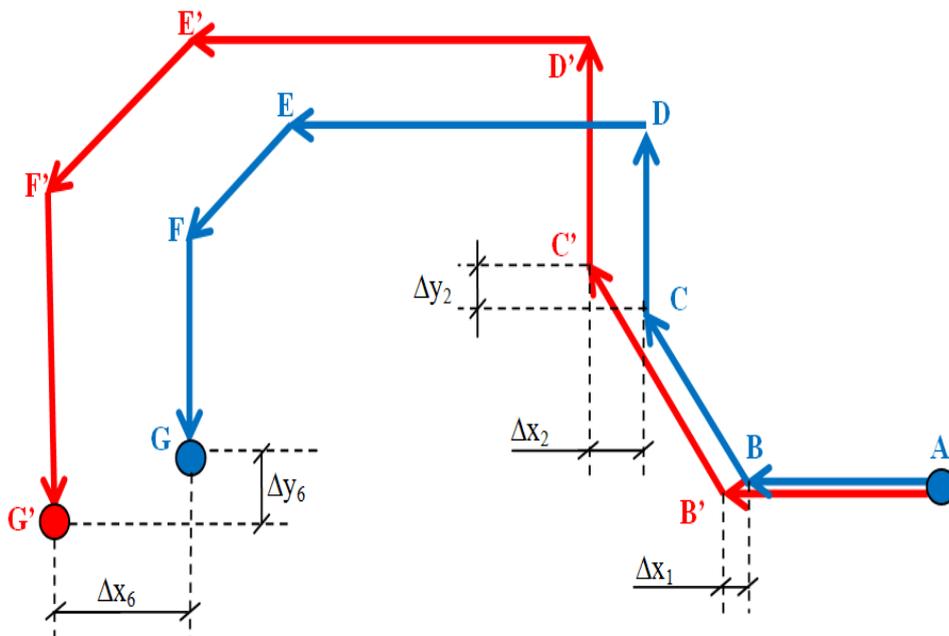


Figure 25 Résultat de chemin avec un contrôle direct et les fluctuations de RTT

Architectures de téléopération proposées

3.3 La réalité virtuelle et la commande à distance :

Les problèmes principaux de la télérobotique sont les délais, la bande passante et la qualité du signal vidéo. Les technologies de la Réalité Virtuelle (RV) et Augmentée (RA) peuvent être utilisées pour prévenir ces problèmes. Dans [118 et 117], les auteurs ont utilisé la RA pour limiter l'effet du délai dans une application industrielle de télérobotique. De même, la RV a été utilisée dans [46, 72, 88 et 111] montrant que des cartes 3D peuvent être plus efficaces dans une tâche de localisation, même si cela prend plus du temps à réaliser. Les robots utilisés dans [108, 109, 5 et 6] sont des robots mobiles. Les avantages de l'interface de la réalité virtuelle de téléopération pour les auteurs sont la capacité à utiliser des aides visuelles, la personnalisation des données d'affichage et la présentation attrayante des données.

En télérobotique, la vidéo est généralement mauvaise, Pour cette raison, la RV peut aider les utilisateurs à avoir une meilleure vue et une bonne compréhension du système à distance qu'ils veulent contrôler. Elle peut également être utilisée pour compenser les retards induits par les réseaux.

Dans la partie suivante, on va examiner trois stratégies de contrôle et répondre à leurs avantages et inconvénients.

3.4 Speed Limit Module (SLM) :

Le speed Limit Module (SLM), est une stratégie utilisée afin de contrôler un robot mobile simple, par l'utilisation de l'idée du niveau de qualité de GEMMA-Q (Figure 26) pour concevoir SLM [104], c'est-à-dire qu'on varie la vitesse du robot selon le RTT mesuré à l'instant t_n (le RTT actuel). Cette solution est efficace seulement quand on a des variations légères dans le RTT, donc c'est difficile de trouver un SLM uniforme pour tous les utilisateurs. A cette problématique nous avons proposé deux stratégies pour commander à distance le robot mobile (Pioneer P3AT) dans un réseau sans que la qualité du service ne soit garantie.

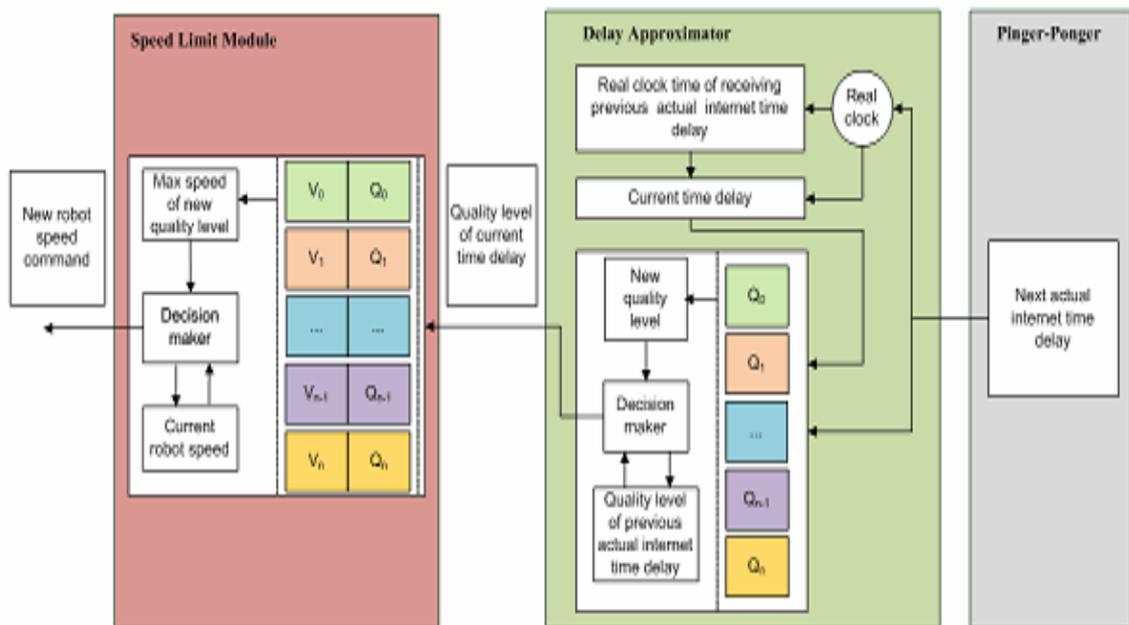


Figure 26 L'architecture globale de SLM [17]

3.5 Les Stratégies Proposées :

3.5.1 Improved Speed Limit Module (ISLM) [62] :

Notre proposition est une architecture client-serveur (figure 27) à travers laquelle l'opérateur (utilisateur) peut envoyer les commandes et recevoir des informations de et au système distant. L'utilisateur, à partir de simulateur graphique envoie les commandes (avant, arrière, gauche et droite) au média serveur à travers le réseau internet (étape1). Des prétraitement doivent se faire avant d'envoyer les commandes vers le robot (étape 2). Cette étape est la plus importante, où nous évaluons l'état d'Internet (bon, faible ou mauvais) (tableau 3). Ceci est fait par la mesure du RTT entre le client et le média serveur, puis stocker ces mesures dans une base de données, afin de les extraire pour prédire la prochaine RTT par la méthode de H-W (chapitre 2). L'opération de mesure, stockage et extraction des données se produisent toutes les 2 secondes. Après l'opération de prédiction on variera la vitesse du robot selon le RTT prédit (étape 3). Beaucoup d'expériences ont été menées au milieu du travail afin de choisir la vitesse appropriée pour chaque niveau. Cette étape permet de définir le fonctionnement du robot suivant quatre niveaux de QoS établis :

Architectures de téléopération proposées

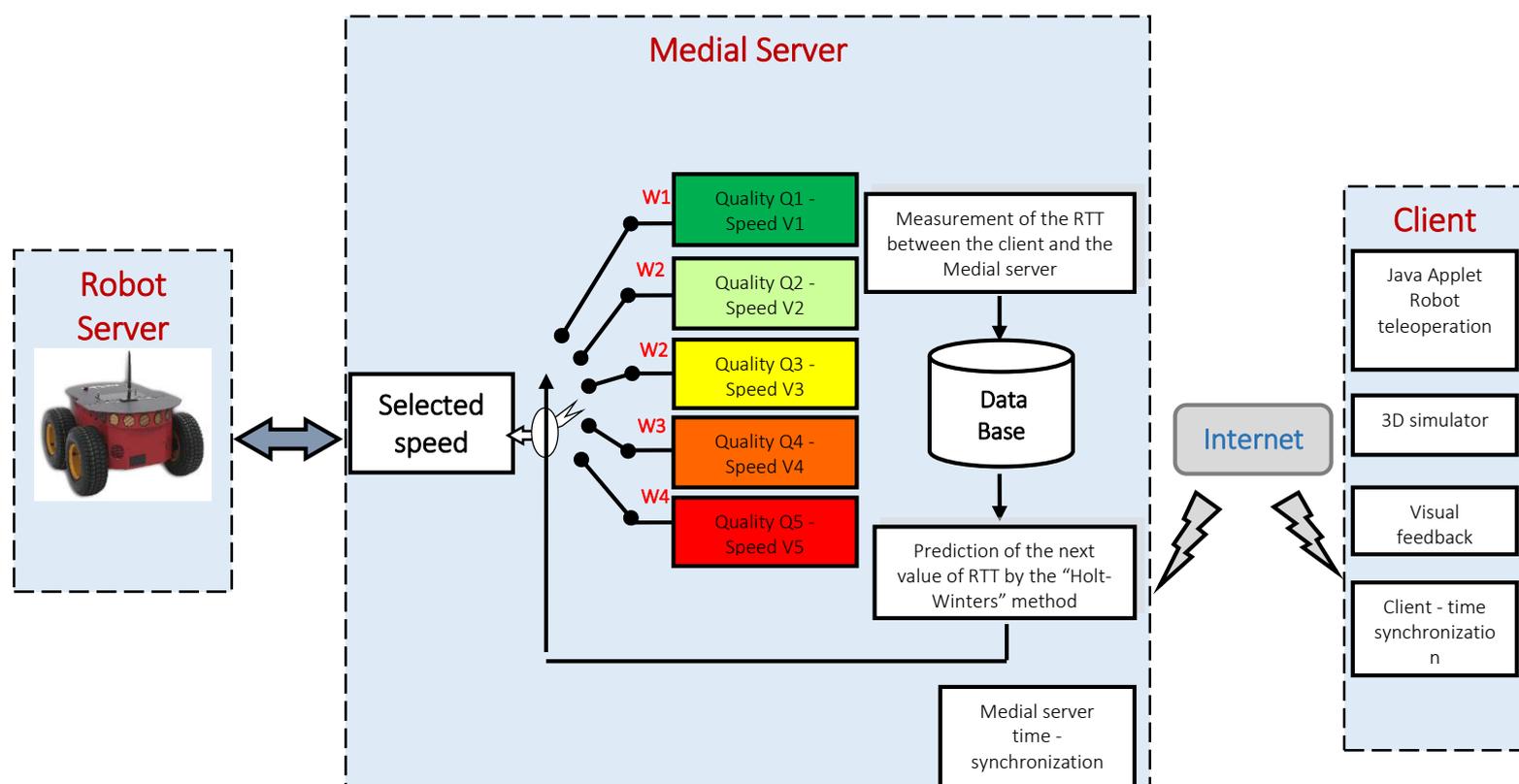


Figure 27 Vue globale de l'architecture proposée

- **Niveau W1** : fonctionnement normal, et la possibilité de contrôler le robot en sécurité, avec le RTT prédit, entre 1ms et 300 ms.
- **Niveau W2** : fonctionnement avec mouvement ralenti, avec le RTT prédit, entre 301ms et 700 ms.
- **Niveau W3** : fonctionnement avec mouvement très ralenti, à ce niveau, il est difficile de contrôler avec précision le robot. On va arrêter le mouvement du robot si cette phase dure longtemps. Avec le RTT prédit, entre 701ms et 1000 ms.
- **Niveau W4** : arrêt immédiat du robot. Avec le RTT prédit, supérieur à 1000 ms.

Tableau 3 Clasiffication de la qualité du service en fonction des RTT prédits

RTT prédit	Vitesse	Niveau	Qualité	
			Q ₁	Q ₂
1 → 300ms	400 mm/s	W1	Q ₁	bonne
301 → 500ms	325 mm/s	W2	Q ₂	Acceptable
501 → 700ms	310 mm/s	W2	Q ₃	faible
701 → 1000ms	300 mm/s	W3	Q ₄	Très faible
>1000ms	290 mm/s	W4	Q ₅	Mauvaise

Architectures de téléopération proposées

Comme dans le cas d'une rupture de la communication entre le client et le médial serveur ou le médial serveur et le robot, ce dernier s'arrêtera automatiquement, pour un contrôle plus sécurisé.

3.5.2 La Temporisation Des Commandes (TDC) [111] :

Les deux stratégies précédentes (SLM et ISLM) sont capables de contrôler le robot via internet, mais il n'est pas facile d'atteindre la position désirée avec précision quand on a des variations brusques dans le RTT. En particulier dans la stratégie SLM. A ce problème, nous avons proposé une autre architecture qui nous permet de minimiser l'erreur sur la trajectoire du robot commandé via internet, le principe est d'atteindre la position désirée « G » (figure 25). Il faut avoir une valeur constante pour la vitesse du robot « V » et le temps d'aller de l'information de client vers le robot « T », (Eq 15).

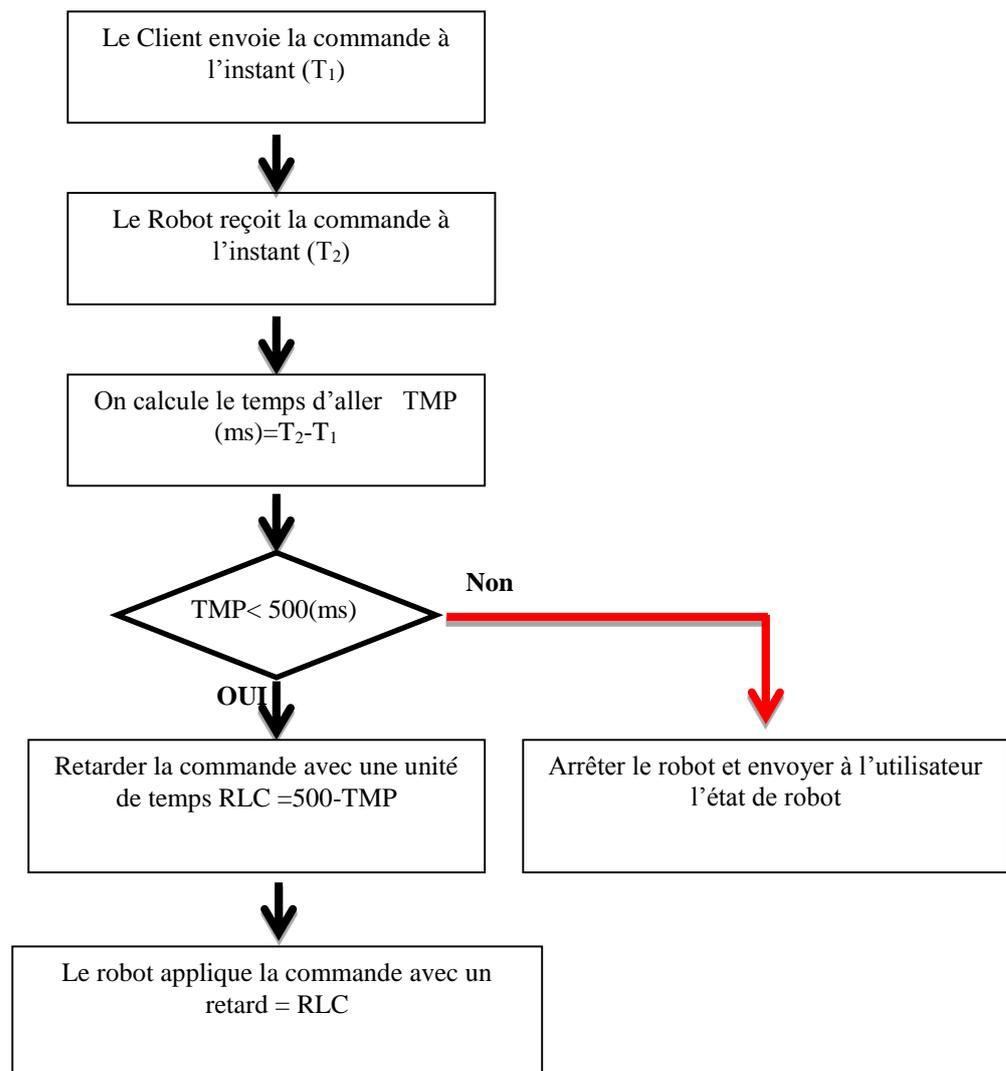


Figure 28 Procédé et système de retardement des commandes

Architectures de téléopération proposées

Pour la vitesse du robot, c'est facile de donner une valeur fixe, mais le problème dans la valeur « T » est qu'elle varie en fonction du temps et de façon aléatoire. Afin de la fixer nous avons proposé un algorithme qui nous permet de retarder les commandes envoyées vers le robot avec un temps de retard constant (TMC=500ms), comme le montre dans Figure 28.

$$\Delta d = V \cdot \Delta t \quad (\text{Eq 15})$$

Tout d'abord le client envoie à distance les commandes (Avant, Arrière, Gauche et Droite) à l'instant T1 puis le robot les reçoit à l'instant T2. Ensuite on calcule le temps d'aller de la commande (TMP=T1- T2) au niveau du serveur (Robot) puis on teste si TMP<500 (ms), on retardera la commande avec un temps (RLC= 500-TMP), sinon on arrêtera le robot. Par la suite, nous donnerons une explication de chaque module de notre interface de communication homme-robot.

3.6 L'interface de communication homme-robot :

Notre plateforme est composée d'un PC hôte distant et le PC médial communiquant entre eux par internet du type client-serveur, en utilisant le protocole de communication Internet TCP/IP (figure 27). L'opérateur via une interface graphique de communication homme-robot contrôle à distance les mouvements du robot mobile Pioneer 3AT (avant ,arrière ,gauche et Droite) à travers un PC intermédiaire (médial serveur) qui communique avec le robot via le réseau internet, tout en ayant la possibilité de voir la scène grâce à la caméra et qui est transmise via le canal de transmission (internet).

L'interface homme-robot assure pour l'opérateur trois tâches essentielles : il prend en charge les commandes de l'utilisateur, affiche les images vidéo et gère le simulateur virtuel du robot pour permettre à l'utilisateur de voir les tâches que le robot doit exécuter. La figure 56 dans le (chapitre 5) illustre bien la fenêtre principale de l'interface développée. Cette dernière se compose de deux parties.

3.6.1 Le client :

L'application client a été développée par le langage de programmation Java (NetBeans), qui est installée sur le PC hôte. Elle assure à son tour les fonctions suivantes :

- La gestion d'une interface de communication graphique homme-robot
- La gestion de la communication depuis et vers le robot, par l'envoi de consignes de l'utilisateur.
- La prise en charge et l'interprétation des commandes données par l'utilisateur.

Architectures de téléopération proposées

3.6.2 La simulation du robot :

Nous avons développé un simulateur graphique (figure 29) de notre système robotique, que l'on a appelé (simulateur du robot mobile Pioneer P3T). Ce simulateur a été développé, avec le logiciel de moteur du jeu Unity 3D [100]. On a conçu ce simulateur dans le but de pouvoir tester les différentes stratégies possibles dans les conditions réelles d'utilisation. Le robot virtuel reproduit fidèlement le comportement réel du robot, avec une vitesse constante qui correspond à la vitesse maximale du robot réel (400 mm/s). Ce simulateur a été développé dans le but de compenser le retard induit par le réseau, entraînant un retard dans le transfert des vidéos au client (utilisateur). C'est pour ces raisons que nous nous appuyons beaucoup sur ce simulateur pour contrôler le robot à distance.

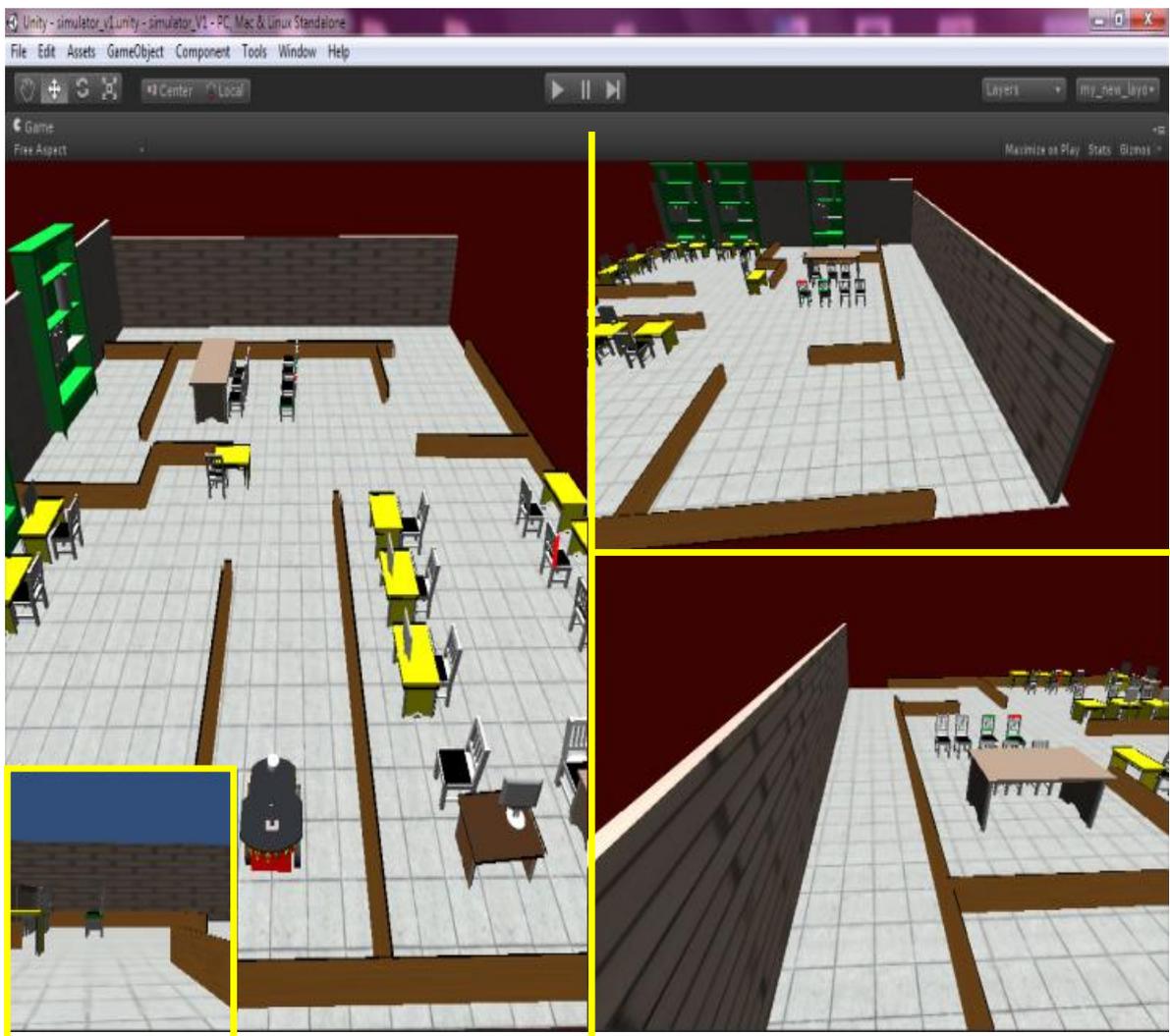


Figure 29 Le simulateur développé par Unity 3D

Architectures de téléopération proposées

3.6.3 Le serveur intermédiaire :

Nous avons développé deux architectures pour contrôler le robot. Ces architectures ont été installées dans le PC intermédiaire entre le client et le robot. Nos architectures sont constituées de quatre parties importantes :

A. Synchronisation du temps :

C'est une application qui a été développée en C au niveau de notre laboratoire (LARESI) dans le but de synchroniser le temps entre le client et le serveur pour s'assurer que le temps soit le même dans les deux PC.

B. Retour visuel :

La caméra délivre en permanence des images vidéo de la scène au client par la technique streaming vidéo.

C. Evaluation de la qualité du service :

Dans cette partie nous évaluons la QoS par la méthode statistique (Holt-Winters). Cette dernière nous permet de prédire en temps réel le RTT afin de varier la vitesse du robot selon les valeurs prédites. Cette partie concerne la stratégie **ISLM**.

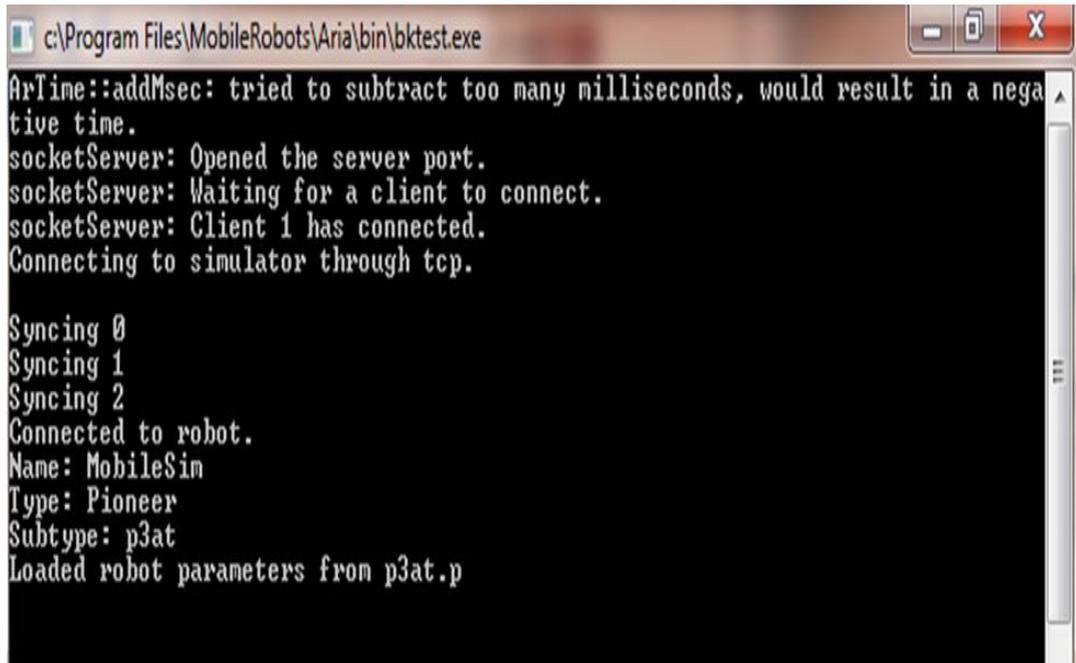
D. Temporisation des commandes:

Le principe pour la deuxième stratégie (**TDC**) est, que pour atteindre la position désirée « A », il faut avoir une valeur constante pour la vitesse du robot « V » et le temps d'aller « t », c'est pour cette raison que nous avons proposé un algorithme pour fixer la valeur de « t ».

E. Le serveur :

Nous avons développé une application serveur par le langage de programmation C++. Cette application est installée sur le PC embarqué dans le robot (figure 30). Elle assure les fonctions suivantes :

- La gestion de la communication depuis et vers le Médial serveur, par l'envoi d'informations sur l'état du robot et la réception des consignes de l'utilisateur.
- Le contrôle du mouvement du robot.



```
c:\Program Files\MobileRobots\Aria\bin\bktest.exe
ArTime::addMsec: tried to subtract too many milliseconds, would result in a negative time.
socketServer: Opened the server port.
socketServer: Waiting for a client to connect.
socketServer: Client 1 has connected.
Connecting to simulator through tcp.

Syncing 0
Syncing 1
Syncing 2
Connected to robot.
Name: MobileSim
Type: Pioneer
Subtype: p3at
Loaded robot parameters from p3at.p
```

Figure 30 Interface serveur du Pionner-3AT

F. Communication internet :

Le principal problème des applications de télérobotique est la limitation de la bande passante et des retards lors de la transmission à longue distance. Afin de surmonter ces problèmes, nous devons améliorer considérablement nos architectures du système et de l'interface homme-robot. Nous avons utilisé une architecture client-serveur avec un protocole TCP / IP [57]. Tous les liens entre l'opérateur et le lieu de travail sont mis en œuvre en utilisant les sockets TCP / IP pour permettre une téléopération de longue distance grâce à Internet.

G. Choix du protocole de transmission :

TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) est le protocole standard utilisé sur Internet pour la transmission d'informations entre les ordinateurs connectés au réseau.

Pour des raisons pratiques, nous avons choisi d'utiliser des protocoles de la famille TCP/IP. Il existe deux protocoles couramment utilisés pour connecter deux programmes reliés par un réseau informatique sur lequel est implanté l'ensemble des protocoles TCP/IP tel que l'Internet : TCP et UDP (User Datagram Protocol). Nous avons préféré TCP à UDP pour les raisons suivantes [17] :

- Le protocole TCP est capable de détecter les ruptures de connexion.

Architectures de téléopération proposées

- TCP est un protocole fiable : il s'assure que la livraison de données a lieu dans une séquence correcte (UDP ne garantit ni la livraison ni l'ordre d'arrivée des flots de données)
- TCP est un protocole de bout de bout dont la vocation est de compenser les faiblesses du protocole IP et de fournir aux applications un transport fiable, c'est à dire avec un taux d'erreur et de perte résiduel nul [18].

Architectures de téléopération proposées

3.7 Conclusion :

Cette partie présente deux architectures qui ont été proposées pour améliorer la qualité du contrôle d'un système à distance.

Nous avons établi une communication entre le client et le robot Pioneer P3AT. Pour compenser le retard induit par le réseau, nous avons mis en œuvre deux stratégies :

- la première stratégie est une architecture qui nous permet de varier la vitesse du robot selon le RTT prédit par la méthode de H-W. Celle-ci a été choisie afin d'obtenir une bonne évaluation de la qualité du service.
- la deuxième stratégie nous permet de temporiser les commandes qui ont été envoyées de client vers le robot avec une unité de temps connue, pour éviter la variation du temps du retard.

Nous avons aussi développé un simulateur, qui est un banc d'essai virtuel. Il suscite pour nous beaucoup d'intérêt, il nous a permis de voir la configuration du robot avant, après et lors l'exécution d'une tâche. L'opérateur aura donc une idée complète des actions à faire par le robot.

CHAPITRE 4

Couche Matérielle

Introduction :

Dans ce chapitre nous allons décrire brièvement le robot mobile Pioneer 3-AT, ainsi que les logiciels utilisés pour les différents types de commandes réalisées.

4.1 Hardware utilisé dans ce projet :

Le principal matériel utilisé dans ce projet est le robot Pioneer 3AT. Utilisé lors des simulations et expériences. Une brève description du robot Pioneer 3AT est détaillée dans ce qui suit.

4.2 Le Robot mobile P3AT [8] :

La Plateforme mobile utilisée dans ce projet est le robot mobile Pioneer 3AT (Figure 31) (*ActiveMedia 2003*). Le Pioneer 3AT est une Plateforme mobile intelligente à usages multiples utilisée principalement pour la recherche scientifique et en engineering. Il est devenu une Plateforme de référence pour implémenter et comparer différents algorithmes.



Figure 31 : Pioneer 3AT au sein de laboratoire LARESI

Le P3-AT a un ordinateur embarqué, ce qui offre la possibilité de traiter les images sur un ordinateur de bord, communication Ethernet et d'autres fonctions autonomes.

L'avantage principal du robot mobile Pioneer 3AT est sa fiabilité qui le rend convenable pour faire différents tests et expériences. Le P3-AT est muni d'un microcontrôleur *Hitachi H8S*. Le Pioneer 3AT peut monter des pentes de 45% et sa vitesse peut atteindre le 0.7m/s. Il est équipé

Couche Matérielle

d'un système de perception qui inclue 16 sondes acoustique (pour éviter les obstacles), deux encodeurs optiques (pour calculer les coordonnées de position et la vitesse). Pour plus d'informations voir la description technique du robot dans la Figure 32.

<p>Construction Body: 1.6 mm aluminum (powder-coated) Tires: Reenforced Pneumatic</p> <p>Operation Robot Weight: 12 Kg</p>	<p>Batteries Supports up to 3 at time</p> <p>Microcontroller I/O System serial 32 digital inputs 8 digital outputs 7 analog inputs 3 serial expansion ports</p>
<p>Skid Steering Drive Max. Forward/ Backward Speed: 0.7 m/s Traversable Terrain: Asphalt, flooring, sand, and dirt. (Low friction tires available for carpet/ indoor use)</p>	<p>User Control Panel MIDI programmable piezo buzzer Main power indicator Battery charge indicator 2 AUX power switches System reset Motor enable pushbutton</p>
<p>Power Run Time: 2-4 hours w/3 batteries (with no accessories) Charge Time: 12 hours (standard) or 2.4 hrs (optional high-capacity charger) Available Power Supplies: 5 V @ 1.5 A switched 12 V @ 2.5 A switched</p>	

Figure 32 : Description technique du robot mobile P3AT

4.3 Software utilisé dans cette thèse :

4.3.1 ARCOS [12] :

A. Qu'est-ce que ARCOS :

- **Une Architecture Client / Serveur :**

Le robot repose sur une architecture client-serveur (Figure 33). En outre, il dispose d'un contrôleur embarqué, fonctionnant en tant que serveur et est dédié à la manipulation des informations de bas niveau (capteurs et actionneurs).

Couche Matérielle

- **Interface :**

ARCOS (*ActivMedia Robot Control & Operation Software*) est une interface client-serveur, initialisée au démarrage du robot, au travers laquelle il est possible de contrôler le robot et de collecter des informations, ce qui comprend les mouvements des roues, les valeurs retournées par les sonars, etc...

Les paramètres d'ARCOS (temps de cycle, durée du watchdog, paramètres du PID...) sont contenus dans la mémoire Flash du robot et peuvent être modifiés par l'envoi d'une commande. (Par ARCOScf ou toute autre application cliente.)

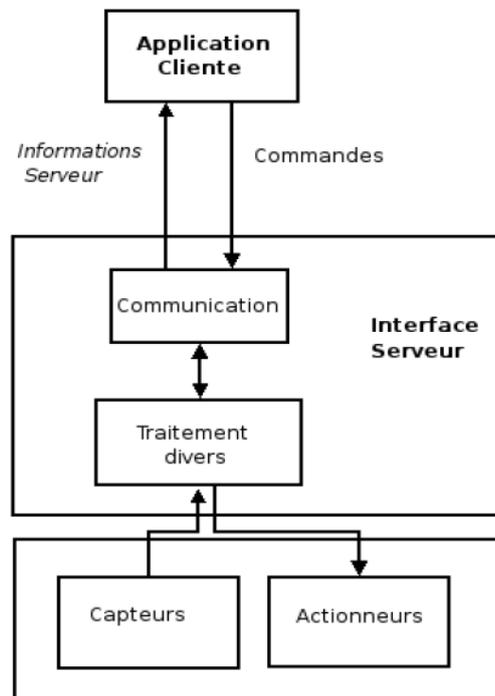


Figure 33 : Architecture Client - Serveur.

4.3.2 ARIA [12] :

Le manufacturier du robot a mis au point un outil logiciel de commande haut niveau. On dispose d'un environnement de développement Open Source nommé **ARIA** (*Activmedia Robotic Interface for Applications*) qui permet de créer une interface efficace avec le robot et ses accessoires (Figure 34).

La librairie qu'elle contient est codée en langage C++. Il est cependant possible de programmer en d'autres langages tels que Java ou Python.

En plus de gérer les commandes du robot, la librairie **ARIA** dispose également de différentes classes génériques sur la gestion des sockets, des threads, etc... Les programmes développés à partir de ces classes pourront être indifféremment compilés sous Linux ou sous Microsoft Windows.

Couche Matérielle

La librairie *ARIA* est "open source". Il est donc possible de modifier une de ses sources, ou même de rajouter une classe, puis de recompiler la librairie.

Enfin il existe une multitude de classes citant ainsi :

- **ArRobot** : la classe la plus importante. Elle est utilisée pour communiquer avec le robot en envoyant des commandes et recevoir des données (y compris l'odométrie des roues, les données des sonars etc...).
- **ArRangeDevice** : Classe qui permet de se connecter à tout dispositif monté sur le robot.

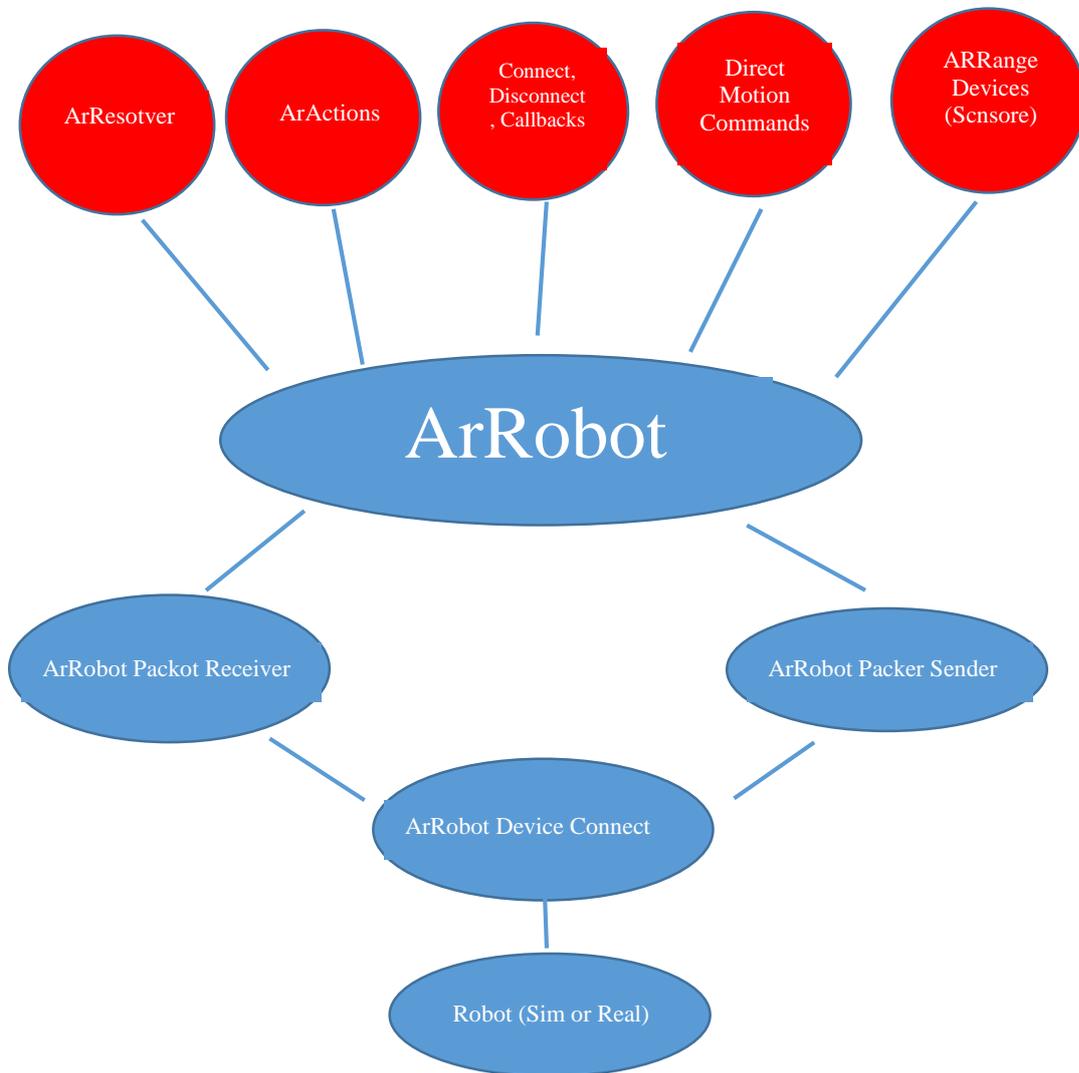


Figure 34 : Structure ARIA

4.3.3 Les langages de programmations utilisées dans ce travail :

Les langages de programmation utilisée dans ce travail sont :

- Visuel studio C++ pour programmer les différentes tâches réalisées par le robot mobile.
- Matlab pour programmer la méthode H-W.
- Stata 12 [7] pour programmer la méthode ARMA.

Couche Matérielle

- Java pour développer un applet qui nous permet de contrôler le robot à distance.
- C# pour développer l'application de mesure des RTT (figure 17).

4.4 Les langages de programmations utilisées pour développer le simulateur du robot :

4.4.1 Unity 3d :

La réalité virtuelle est une technique, a été utilisé dans divers domaines tels que, les jeux vidéo, l'architecture et la télérobotique...etc, dans le but de créer des environnements virtuels en 3D ou des simulateurs dans le domaine robotique. À cet effet, beaucoup des logicielles ont été utilisés, tels que Java 3d, Blender et Unity 3d, ce dernier a été utilisé dans notre travail pour réaliser un simulateur de robot mobile (Figure 35).

Unity est un moteur de jeu multiplateformes (smartphone, Mac, PC, consoles de jeux vidéo et web) développé par Unity Technologies [100]. Il est l'un des plus répandus dans l'industrie du jeu vidéo, du fait de sa rapidité aux prototypages pour les très gros studios. Unity comprend 3 langages de programmation intégrés : le Boo (dérivé du Python), le java script (ou Uniscript) et le C#.

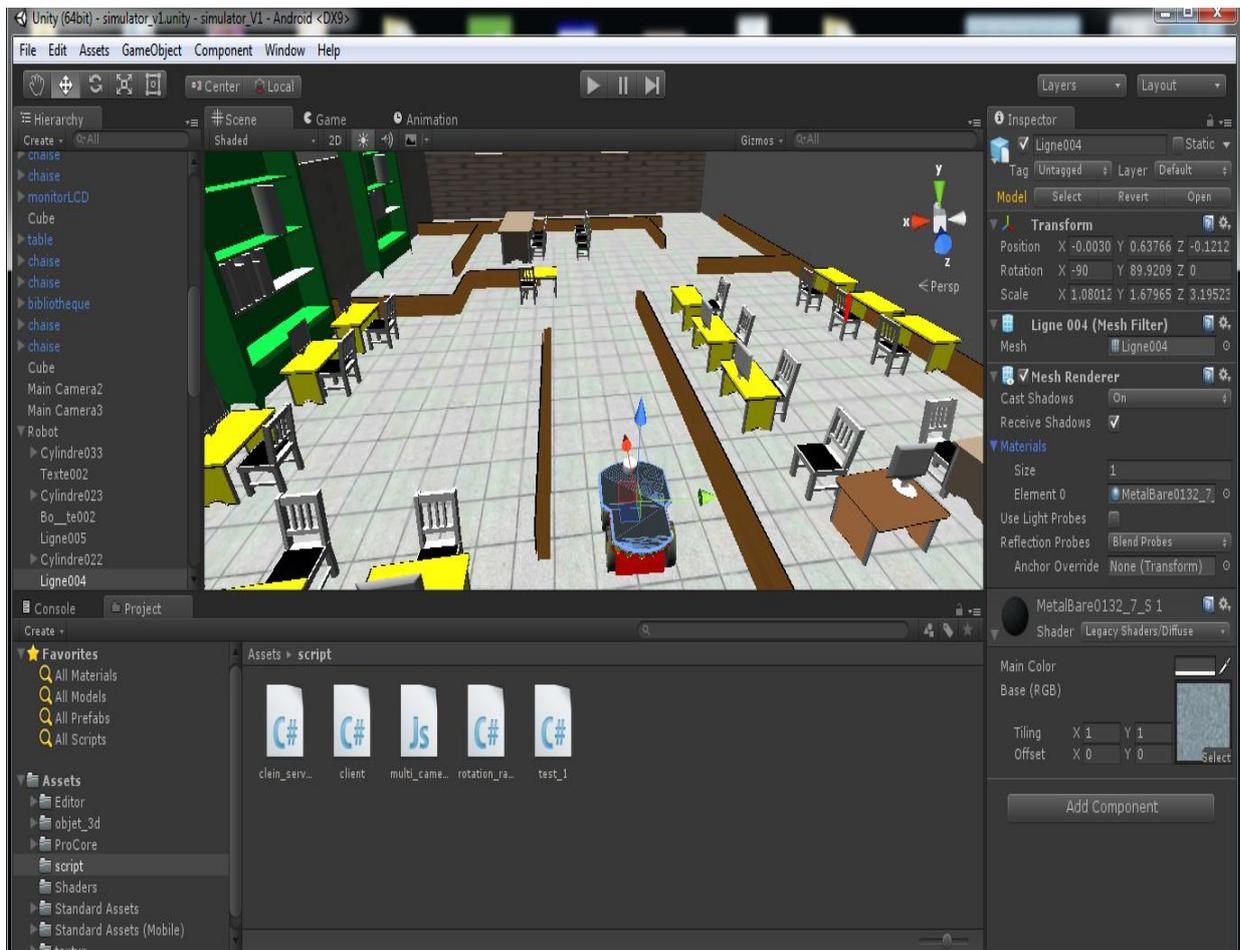


Figure 35 L'interface de réalité virtuelle du robot P3 AT

4.5 Conclusion :

Ce chapitre est consacré à la description du robot utilisé pour nos tests, Nous avons jugé utile de présenter quelques détails sur les composants mécaniques et électriques et leurs caractéristiques particulières. Nous avons présenté aussi les logiciels que nous avons utilisé pour développer notre plateforme.

Le chapitre qui suit décrira les expériences et résultats élaborés tout au long de notre travail, ainsi que les interprétations des différents résultats obtenus durant cette thèse.

CHAPITRE 5

Expérimentations et résultats

Introduction

Pour une validation pratique de la méthode proposée pour prédire le RTT, ainsi que les architectures de téléopération proposée, nous avons mené des expériences en 4 étapes :

- Dans la première étape, nous avons mis en œuvre la procédure de prédiction du RTT proposé, en utilisant la méthode H-W et la méthode de H-W améliorée, puis nous avons établi une comparaison entre ces deux méthodes afin de montrer la contribution que nous avons apportée.
- Dans la deuxième étape, une comparaison a été faite entre la méthode H-W améliorée et la méthode ARIMA, pour justifier le choix de notre méthode.
- La troisième étape est la téléopération de notre robot mobile via Internet à l'aide des architectures proposées (ISLM et TDC).
- La dernière étape consiste en une comparaison entre les stratégies proposées et d'autres stratégies, afin d'évaluer leurs avantages et leurs inconvénients dans le cas d'une téléopération.

5.1 Évaluations des résultats de prédictions :

5.1.1 Discussion des résultats :

Dans ce travail, nous avons proposé une approche pour la prédiction de RTT en temps réel, basée sur la méthode de Holt-Winter (chapitre 2), et pour tester l'efficacité de cette méthode nous avons mené une campagne de mesure du temps d'aller-retour entre quatre nœuds, qui sont les suivants :

- **Client** : l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran - Mohamed-Boudiaf (USTO, Algérie), www.univ-usto.dz, 193.194.88.4
- **Server 1** : l'Université de Bretagne occidentale, Brest, France (UBO, France), 195.83.247.125
- **Server 2** : le site web de l'Université Mohamed khider Biskra (UMKB, Algérie), www.univ-biskra.dz 193.194.69.98.
- **Server 3** : Ahwaz Newnet Internet Service Provider, www.newnetisp.com 85.185.225.39, (AN ISP).

Expérimentations et Résultats

Puis stocker les mesures de RTT dans une base de données, afin d'extraire les mesures et prédire la prochaine RTT. Chaque expérience contient 600 points avec un intervalle d'échantillonnage de 2 secondes. La figure 36 montre l'architecture de prédiction en temps réel par la méthode de H-W.

On peut citer au moins deux méthodes, l'une d'elles est adaptée aux séries admettant une décomposition multiplicative et l'autre correspondant aux décompositions additives REF [98 et 62]. Dans cette thèse nous nous intéressons à la version multiplicative, car nous obtenons de meilleurs résultats de prédiction par H-W multiplicative que par l'additive. La figure 52 montre la comparaison de résultats de prédiction entre les deux versions. Ainsi, nous avons calculé l'erreur relative dans les deux versions, afin de les comparer, et organiser les résultats dans le tableau 7.

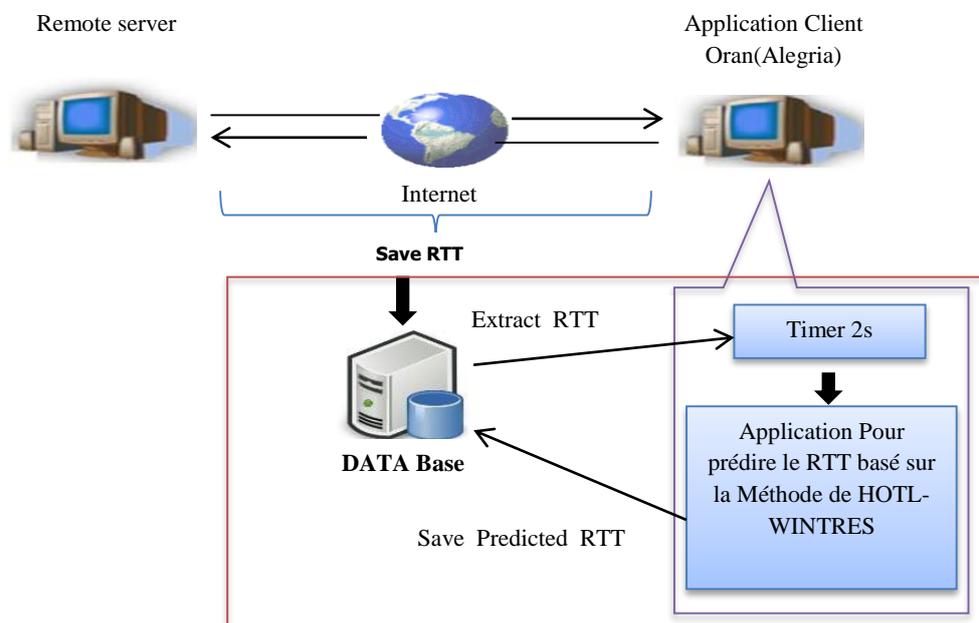


Figure 36 L'architecture de prédiction de la QoS en temps réel en utilisant la méthode H-W

Dans cette partie, nous montrons aussi les résultats des prédictions obtenues. Les figures 43, 46 et 49 montrent les modélisations du RTT par la méthode de H-W. Si nous avons de bonnes modélisations nous obtiendrions de bons résultats des prédictions, car la valeur prédite a une relation avec la dernière valeur de $s(t)$; de même la précision de la prédiction est en relation avec la variation de RTT. Pour cela, nous divisons la variation du RTT en deux composants :

- la variation légère.
- la variation brusque.

Expérimentations et Résultats

Avant de montrer les résultats de prédictions, nous allons présenter l'efficacité de l'algorithme proposé pour choisir les coefficients de lissage. Ce choix est très important pour avoir de bons résultats de prédiction. La solution proposée (section 2) est simple, et n'a pas besoin de beaucoup de calcul pour obtenir la valeur appropriée du coefficient de lissage, et c'est considéré comme un avantage pour les applications en temps réel.

Dans notre expérience nous avons fixé les valeurs des coefficients de lissage β et γ . Par ailleurs nous avons appliqué l'algorithme pour obtenir la valeur appropriée du coefficient α . Pour montrer l'efficacité de cet algorithme, nous avons donné à chaque fois une valeur constante pour α (0.1, 0.3, 0.5 et 0.7), puis comparer les résultats de prédiction avec la même méthode (H-W), mais cette fois le coefficient α s'adapte avec le changement de RTT.

Les résultats montrent que le modèle H-W adaptative suit bien les variations des RTTs, en revanche le modèle H-W qui a le coefficient α constant ne les suit pas, donc il ne donne pas des résultats acceptables (Figure 37). Comme nous l'avons cité dans le chapitre 2, pour avoir des bons résultats de prédiction il faut avoir un bon modèle de la série chronologique (RTT), comme il est montré dans la figure 38, qui présente les résultats de prédiction de RTT. Nous voyons que la prédiction avec la méthode H-W adaptative est meilleure que la méthode classique (les coefficients de lissage sont constants). La figure 39 montre les erreurs de prédiction.

Pour bien voir la grande différence entre les résultats, le tableau 4 donne les distributions d'erreur de prédiction pour une série contenant 600 mesures. L'erreur de prédiction est la valeur absolue de la différence entre la valeur réelle et la valeur prédite. La distribution des erreurs de prédiction inférieure à 10 ms, avec la méthode adaptative constitue 83.33% ; et pour la méthode classique, la distribution des erreurs constituent 23.4, 16.66, 15.78 et 20.53% pour $\alpha = 0.1, 0.3, 0.5$ et 0.7 respectivement. Le reste des résultats sont présentés dans le tableau 4. Après les expériences, nous avons conclu que la méthode H-W adaptative est la mieux adaptée pour prédire une série chronologique qui varie en fonction du temps. Par la suite une comparaison entre la méthode H-W améliorée et H-W classique est faite afin de montrer l'efficacité des améliorations proposées.

Expérimentations et Résultats

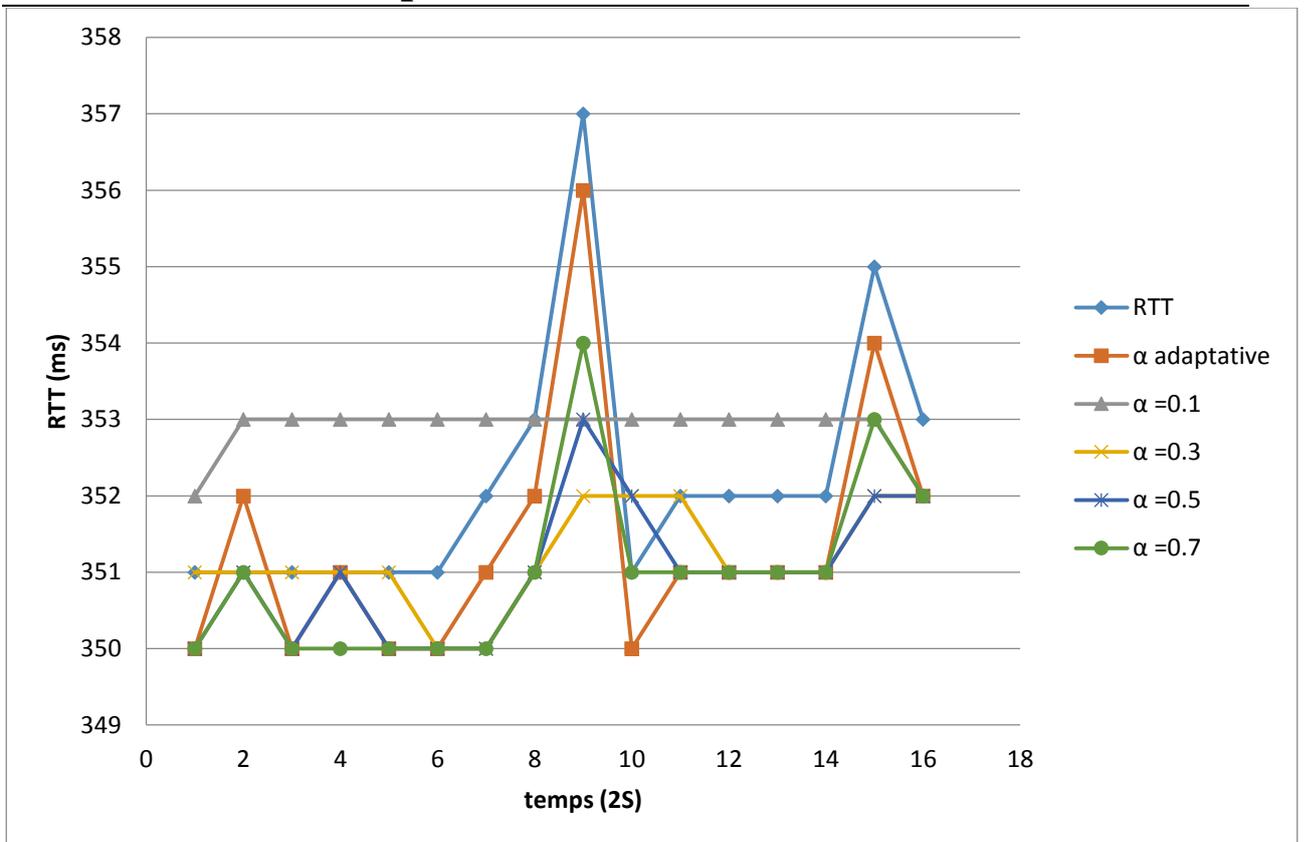


Figure 37 Comparaison entre les résultats de modélisations par la méthode H-W classique et l'adaptative

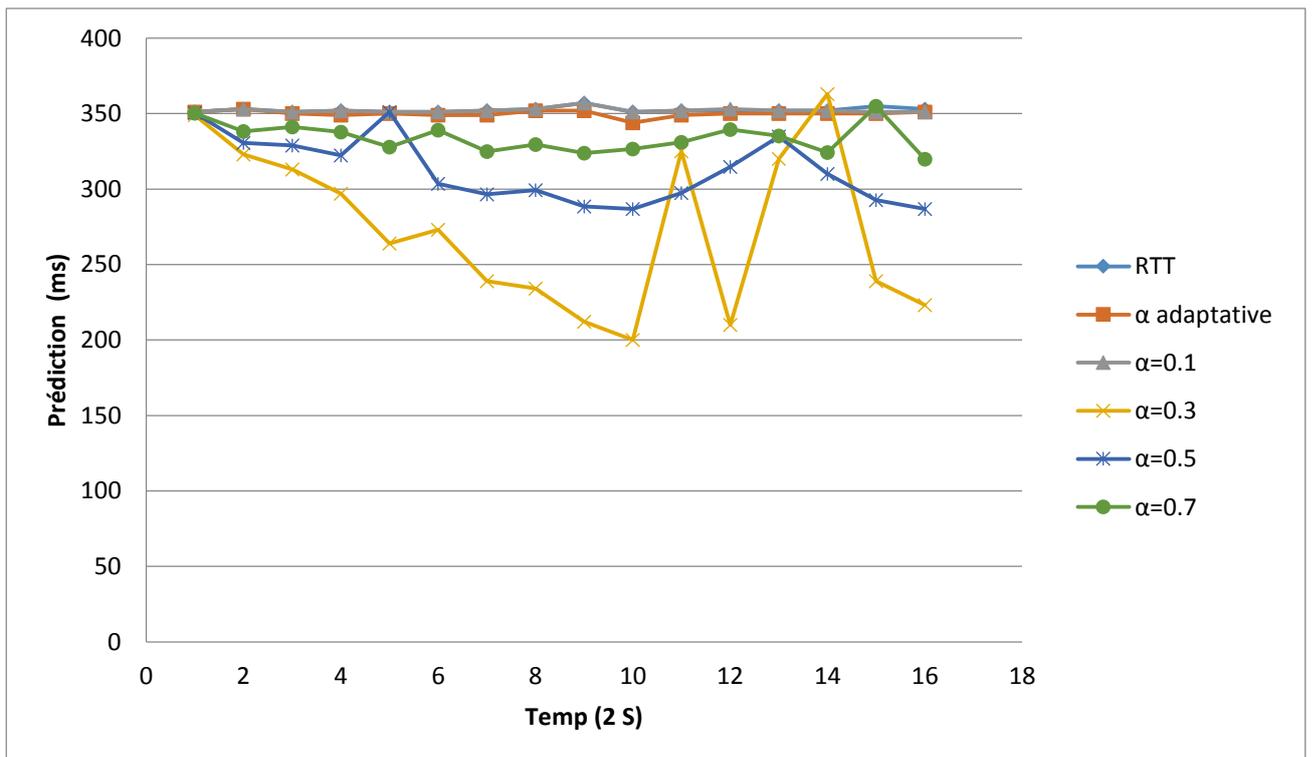


Figure 38 Comparaison entre les résultats de prédictions par H-W classique et l'adaptative

Expérimentations et Résultats

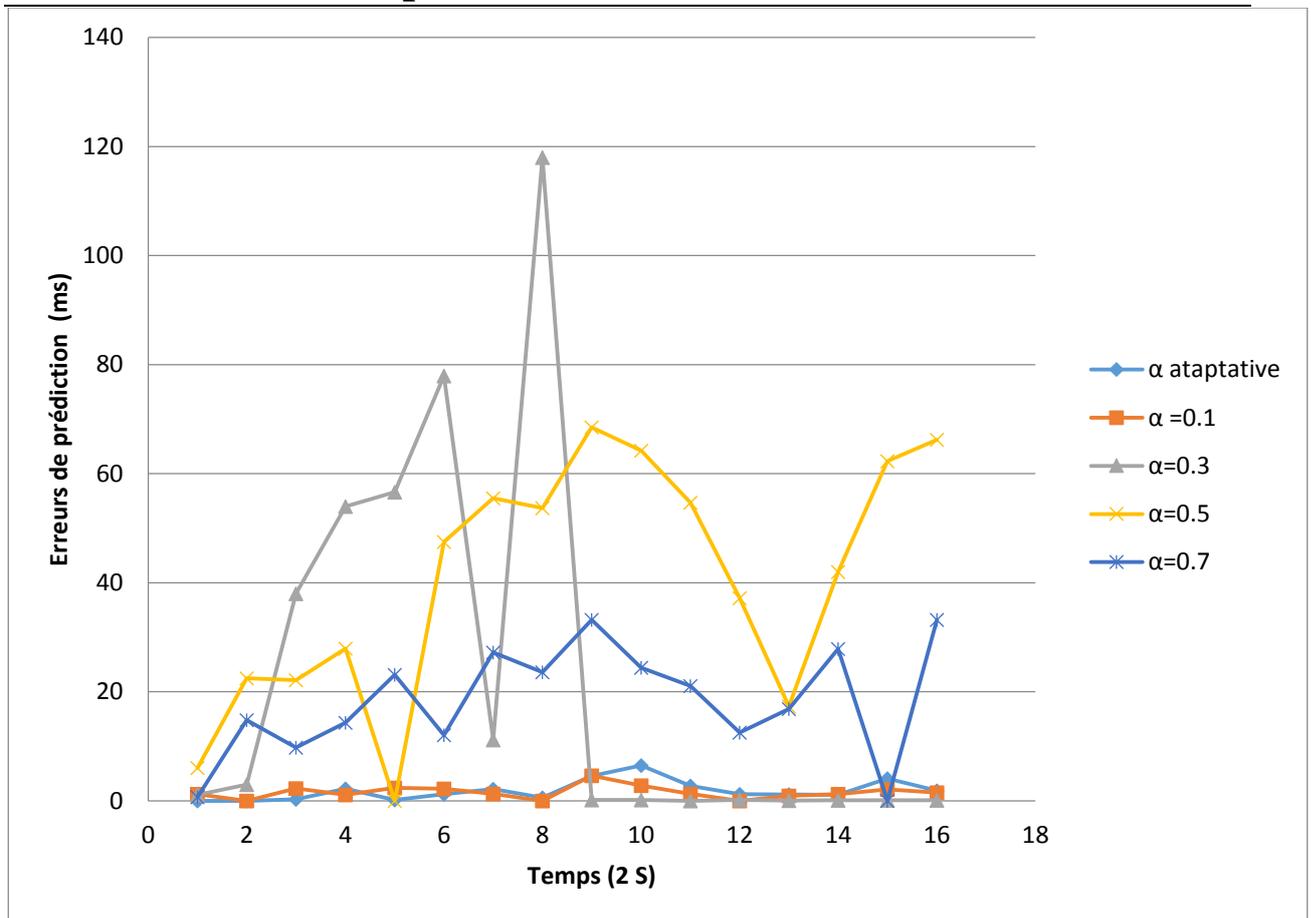


Figure 39 Comparaison entre les erreurs de prédictions par H-W classique et l'adaptative

Tableau 4 Distributions des erreurs de prédiction entre la méthode H-W classique et H-W adaptative

Le coefficient α	$\leq 1\text{ms}$	$\leq 2\text{ms}$	$\leq 3\text{ms}$	$\leq 5\text{ms}$	$\leq 10\text{ms}$	$> 10\text{ms}$
α adaptative	24.5614	47.3684	60.5263	77.1930	83.3333	16.6667
$\alpha = 0.1$	20.5674	20.5674	20.5674	21.2766	23.4043	76.5957
$\alpha = 0.3$	3.1579	14.0351	14.0351	14.0351	16.6667	83.3333
$\alpha = 0.5$	13.1579	14.0351	14.0351	14.0351	15.7895	84.2105
$\alpha = 0.7$	14.2857	16.0714	16.0714	16.0714	20.5357	79.4643

5.2 La comparaison entre la méthode H-W classique et la méthode proposée :

Dans cette section une comparaison a été faite entre la méthode H-W améliorée et H-W classique. Les améliorations ajoutées sur la méthode classique est dans le but de prédire le RTT quelque soit la qualité du service.

Au début, nous avons appliqué les deux méthodes sur la même série temporelle qui contient 600 points. Comme on le voit sur les figures 40, 41 et 42. Elles illustrent une partie de

Expérimentations et Résultats

la comparaison des résultats de prédiction entre H-W classique et l'améliorée, et ces résultats ont prouvé l'efficacité de l'amélioration proposée.

Par exemple, la distribution des erreurs de prédiction entre USTO et UBO indiqués dans le tableau 5, montre que la distribution des erreurs relatives de prédiction sont inférieurs à 10 ms, sont 79,33% pour H-W améliorée et 73.66% pour la méthode classique. Concernant la distribution des erreurs relatives qui sont supérieures à 10 ms, elles constituent 20.66% pour la méthode classique et 26.33% pour l'améliorée. Le reste des résultats est présenté dans la même table. Ces résultats montrent que la méthode H-W améliorée est plus précise que la classique particulièrement quand les variations sont brusques.

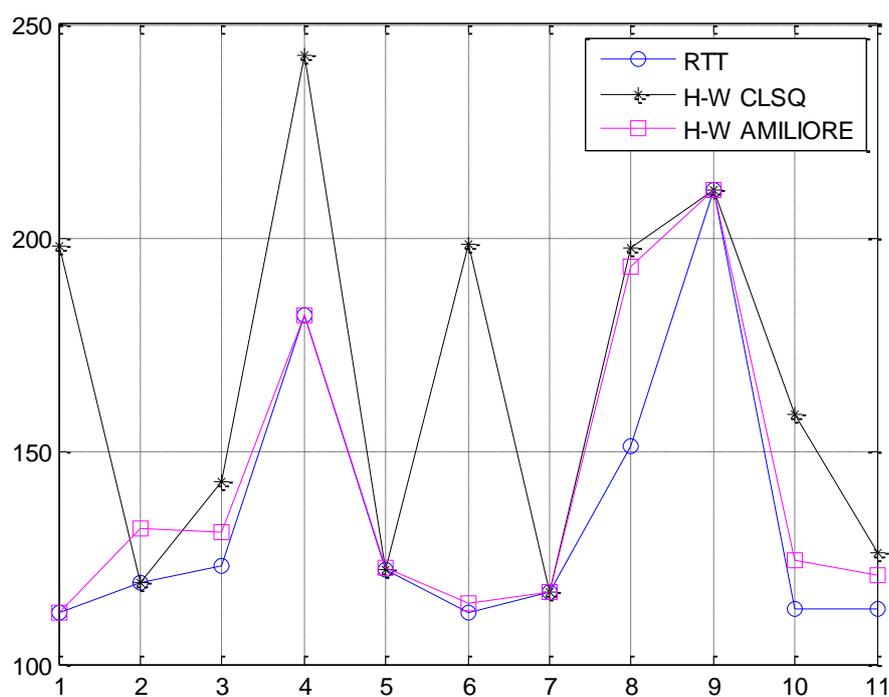


Figure 40 Comparaison des résultats de prédiction entre H-W classique et H-W améliorée (entre USTO et UBO)

Expérimentations et Résultats

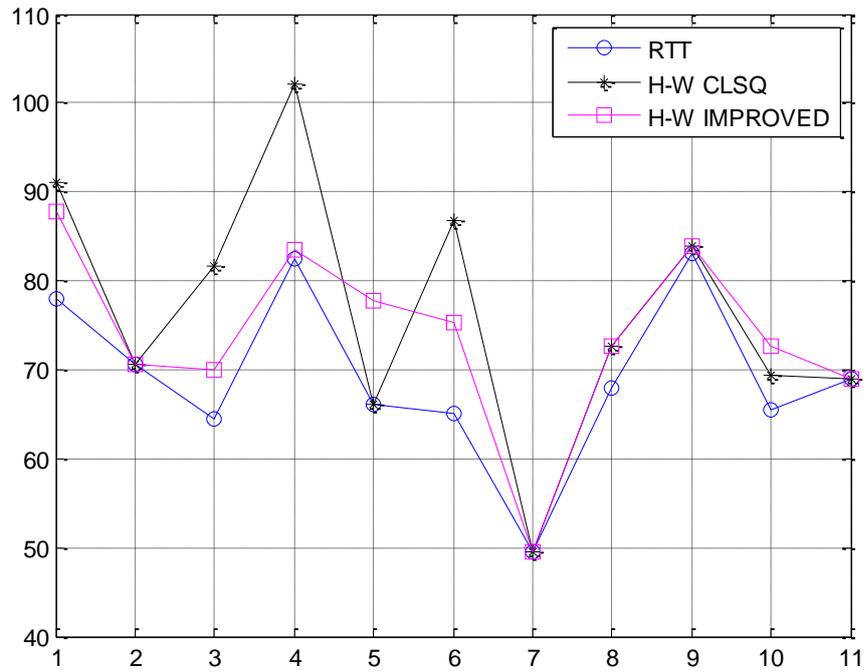


Figure 41 Comparaison des résultats de prédiction entre H-W classique et H-W améliorée (entre USTO et UMKB)

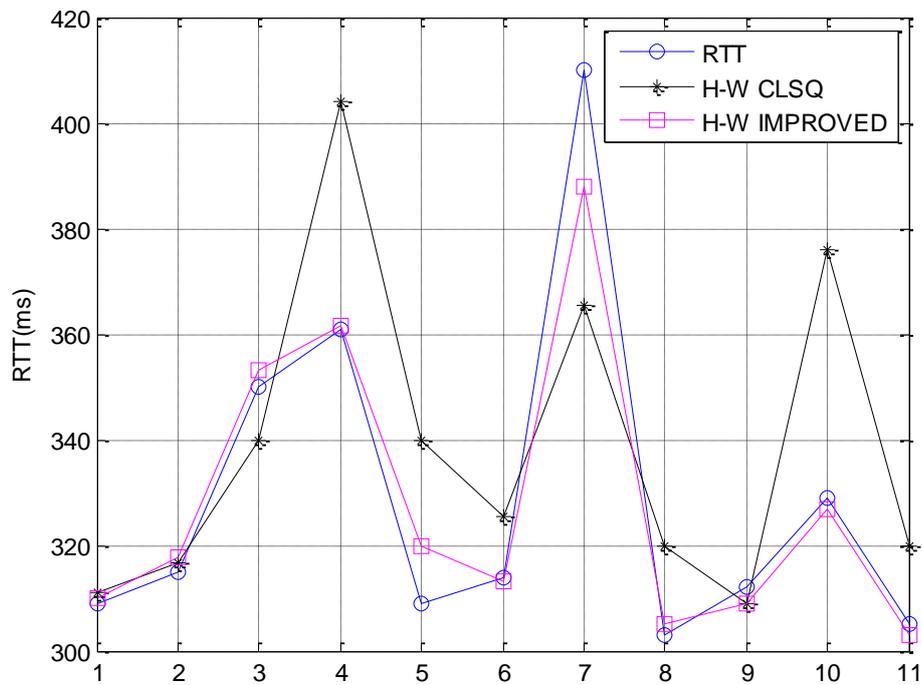


Figure 42 Comparaison des résultats de prédiction entre H-W classique et H-W améliorée (entre USTO et server 3)

Expérimentations et Résultats

Tableau 5 Distributions des erreurs de prédiction entre H-W classique et H-W améliorée

Nœuds	H-W Model	$\leq 2\text{ms}$	$\leq 3\text{ms}$	$\leq 5\text{ms}$	$\leq 10\text{ms}$	$> 10\text{ms}$
Server1	classique %	63	63.33	67	73.66	26.33
	améliorée %	65.66	67.33	70	79.33	20.66
Server2	classique %	68.12	76.51	81.87	92.62	7.37
	améliorée %	64.35	72.93	82.83	94.05	5.94
Server3	classique %	73.75	75.91	80.39	86.04	13.95
	améliorée %	74.33	78.66	84.05	91.52	8.48

Après avoir montré les efficacités des améliorations proposées, nous allons par la suite présenter des expériences sur la méthode améliorée, par les mesures de RTT entre 4 nœuds ; chaque mesure contient 600 points avec un pas de 2 secondes. Pour une bonne évaluation de la prédiction des RTT par la méthode H-W améliorée, nous avons choisi des mesures qui varient de façon légère et aléatoire.

A. Prédiction du RTT avec les variations légères :

Selon les expériences faites, les figures 44 et 47 mettent en lumière les résultats de la prédiction entre USTO et des deux nœuds (UBO et UMKB). Ces résultats montrent que la méthode proposée est capable de prédire le RTT avec précision.

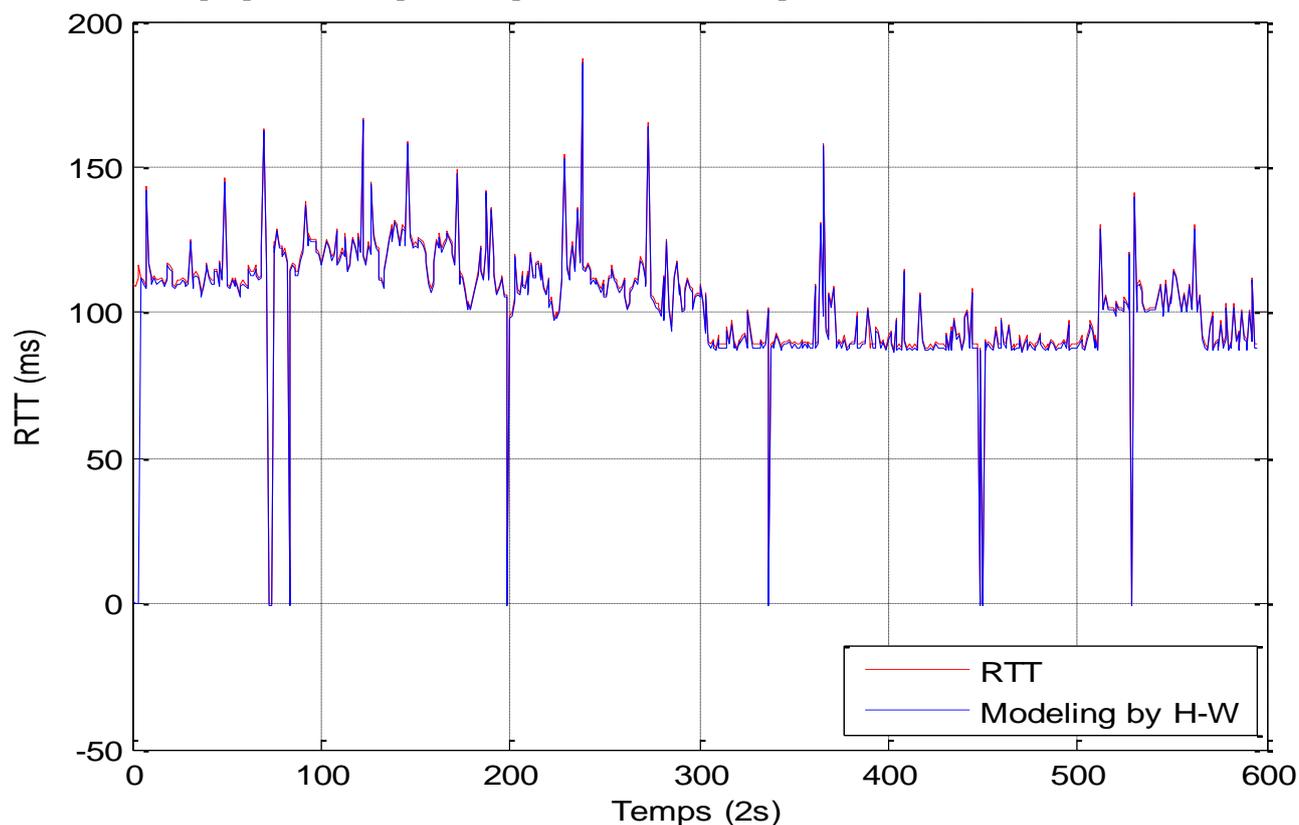


Figure 43: Modélisation des RTT par la méthode H-W améliorée entre USTO (Algérie) et UBO (France)

Expérimentations et Résultats

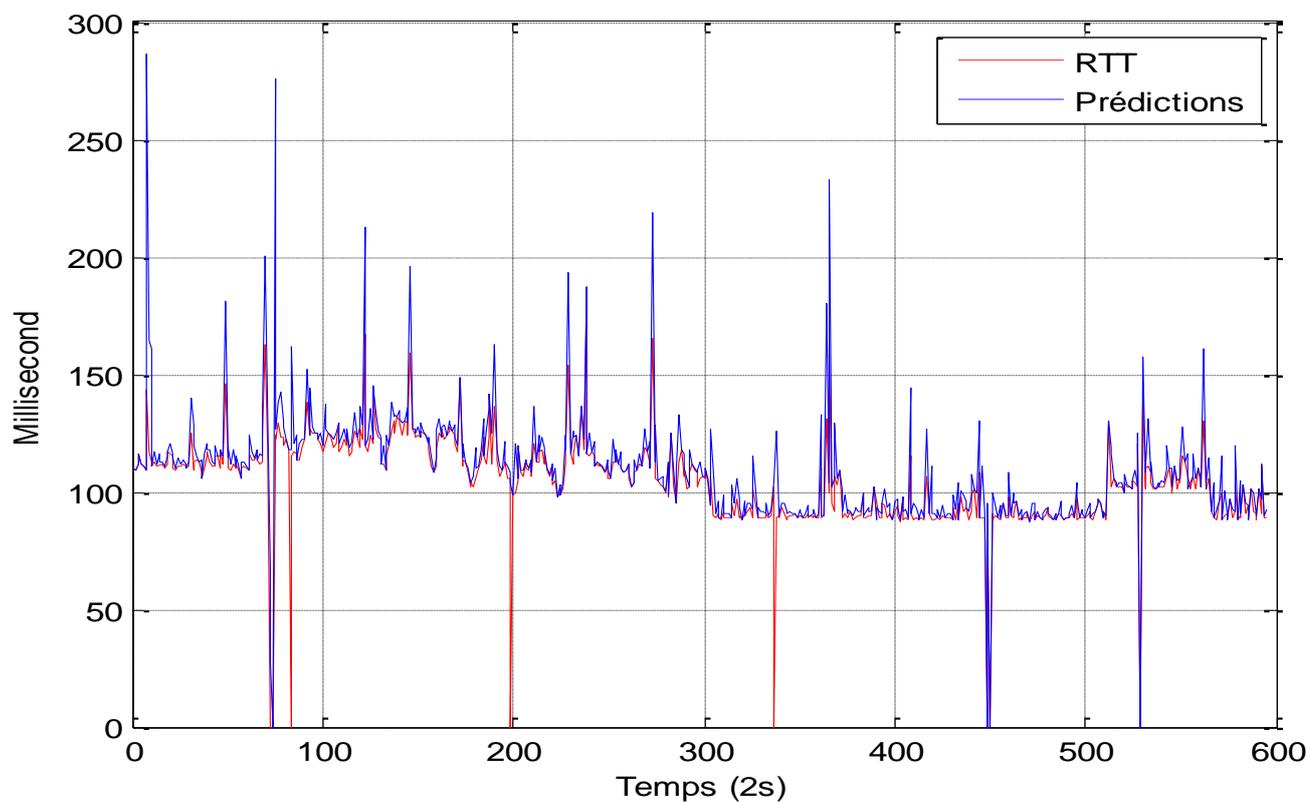


Figure 44 : Résultats des prédictions du RTT par H-W améliorée entre USTO(Algérie) et UBO (France)

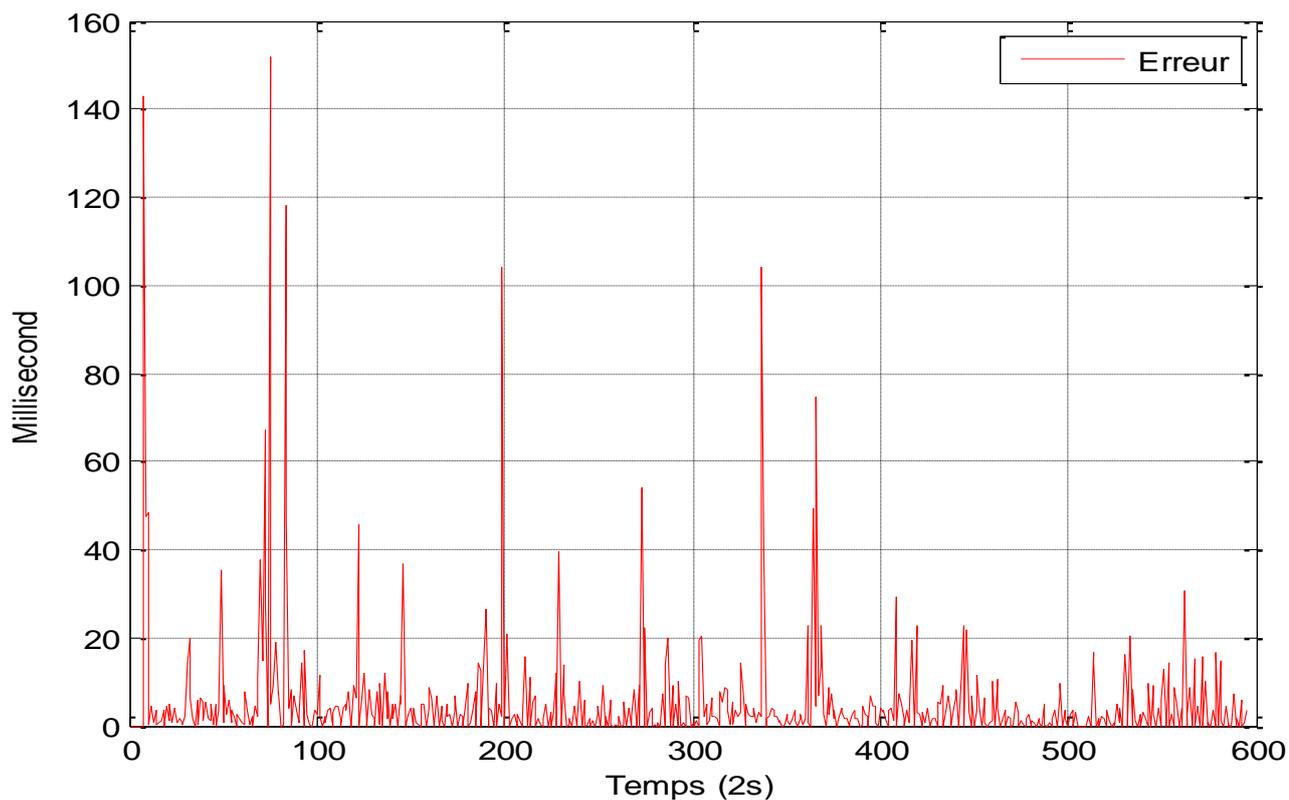


Figure 45 : Erreur de prédiction entre USTO (Algérie) et UBO (France)

Expérimentations et Résultats

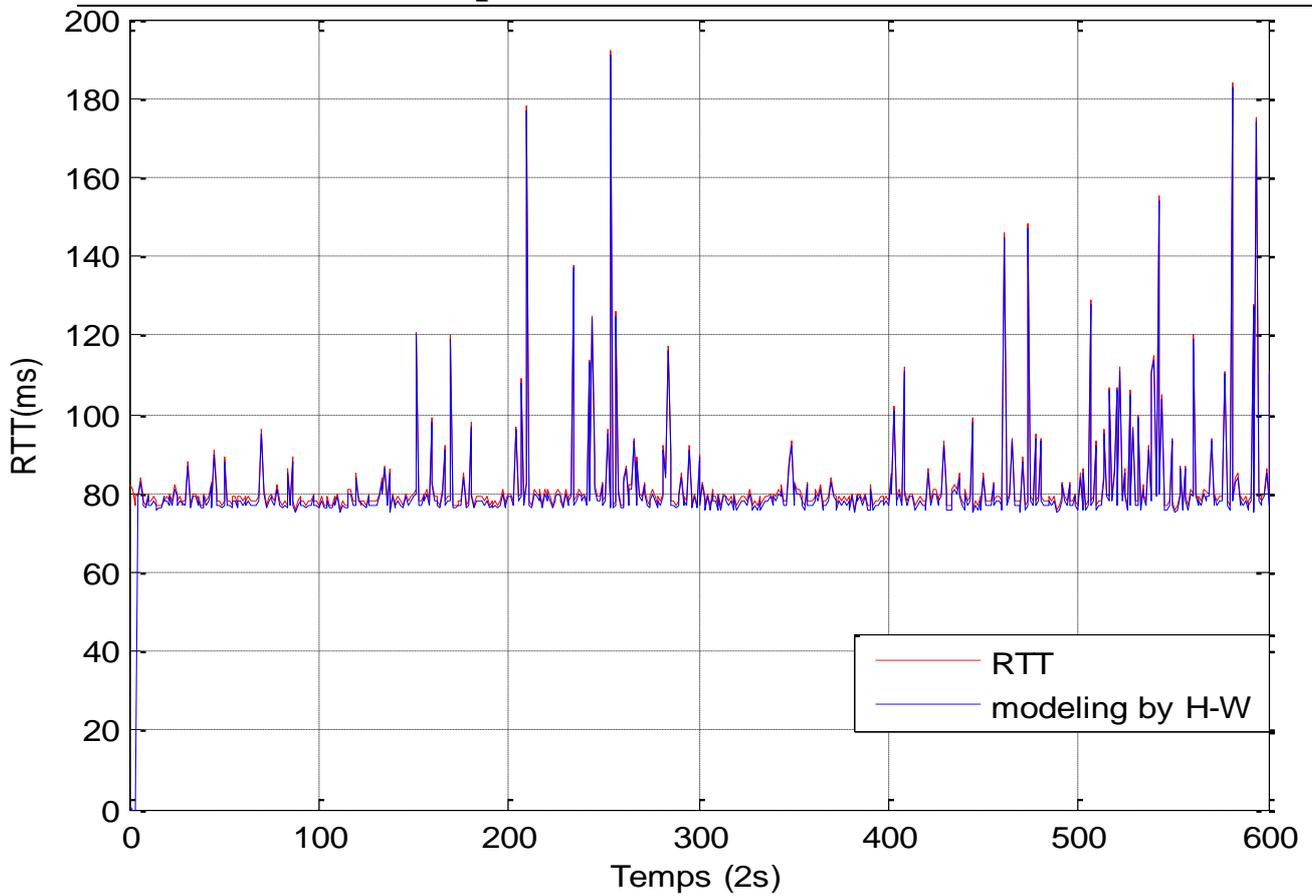


Figure 47: Modélisation des RTT par la méthode H-W améliorée entre USTO (Algérie) et UMKB (Algérie)

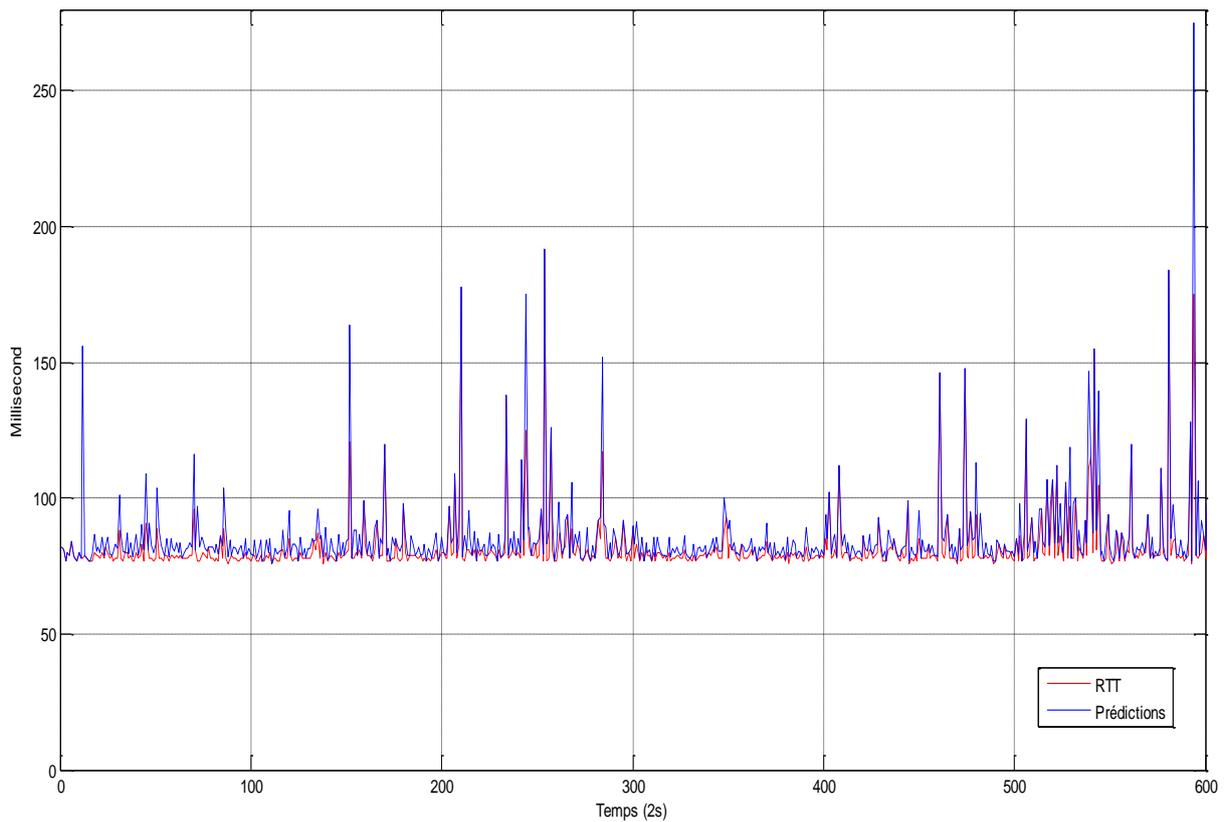


Figure 46 : Résultats des Prédications du RTT par H-W améliorée entre USTO (Algérie) et UMKB (Algérie)

Expérimentations et Résultats

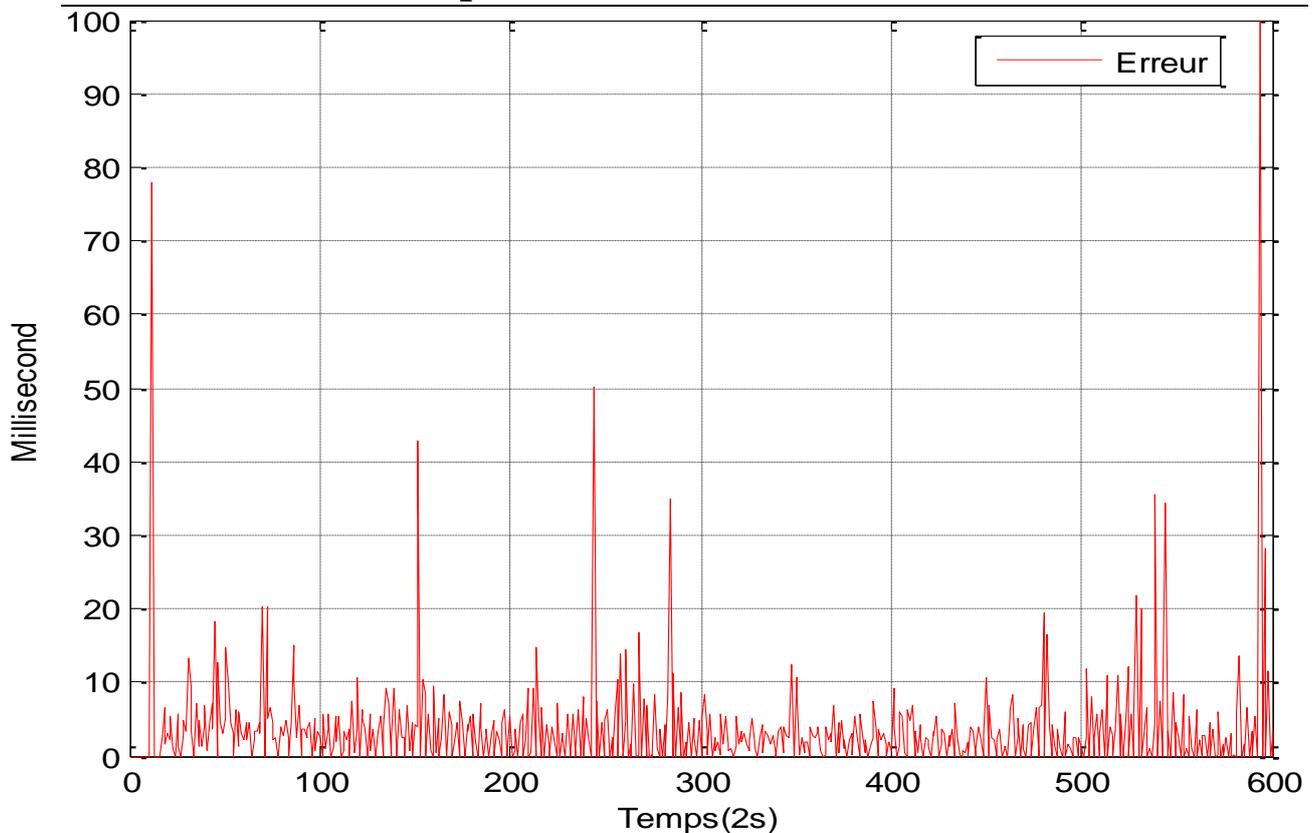


Figure 48 : Erreur de prédiction entre USTO (Algérie) et UMKB (Algérie)

Tableau 6 donne une certaine distribution des erreurs de prédiction. Par exemple, la distribution des erreurs relatives de prédiction entre USTO et le serveur 1 qui est inférieure à 3 ms constituent 59.49%. Les distributions des erreurs supérieures à 10 ms constituent 11.42%. En ce qui concerne les distributions des erreurs de prédiction du serveur 2, les erreurs inférieures à 3 ms constituent 56.62%, et celles supérieures à 10 ms constituent 6.29%. Le reste des résultats présentés dans le Tableau 6, montre que la majorité des erreurs sont inférieures à 10ms. À cet effet, la prédiction est très bonne.

On peut également observé sur la figure. 48 et 45 que l'erreur de prédiction est faible car les variations du RTT sont légères. Dans ce cas, la méthode de H-W améliorée est capable de prédire le RTT avec précision, d'ailleurs les erreurs de prédiction dans certaines valeurs sont grandes, dû aux pics brusques dans les RTT.

B. Prédiction du RTT avec les variations brusques :

La mesure du RTT entre USTO (Algérie) et le serveur 3 (Iran) montre que la variation du RTT est brusque (Figure 49), affectant ainsi sur la précision de la prédiction. Le Tableau 6 donne une certaine distribution des erreurs de prédiction. Comme on peut le constater, la plupart des erreurs sont inférieures à 5ms, estimées en pourcentage à 66.71%, et 24.81% pour la distribution des erreurs supérieures à 10 ms. Ces valeurs sont inférieures en précision aux valeurs précédentes

Expérimentations et Résultats

(les variations légères), dues à la variation brusque du RTT. En revanche la précision de prédiction des RTT est acceptable.

La figure 49 montre que les RTT varient au départ entre 300 et 600 millisecondes de façon aléatoire, ceci réduit la précision de la prédiction, puis le RTT est stabilisé avec quelques pics , engendrant une bonne précision de prédiction . La figure 50 montre l'erreur de prédiction entre USTO et Iran.

Dans ces expériences, nous présentons trois séries différentes. Malgré ça, la méthode de H-W améliorée nous procure des résultats de prédiction acceptables.

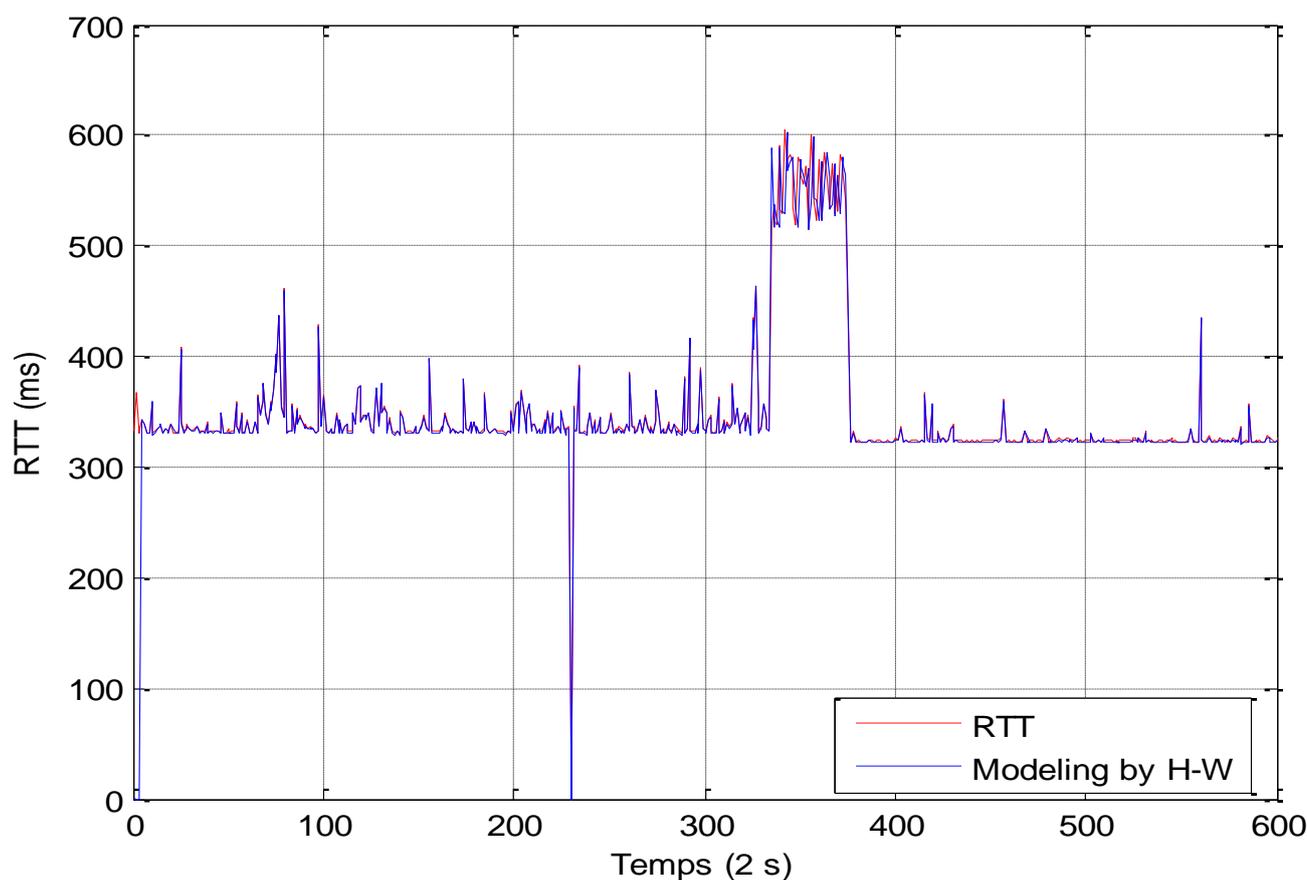


Figure 49 : Modélisation des RTT par la méthode H-W améliorée entre USTO et Iran

Expérimentations et Résultats

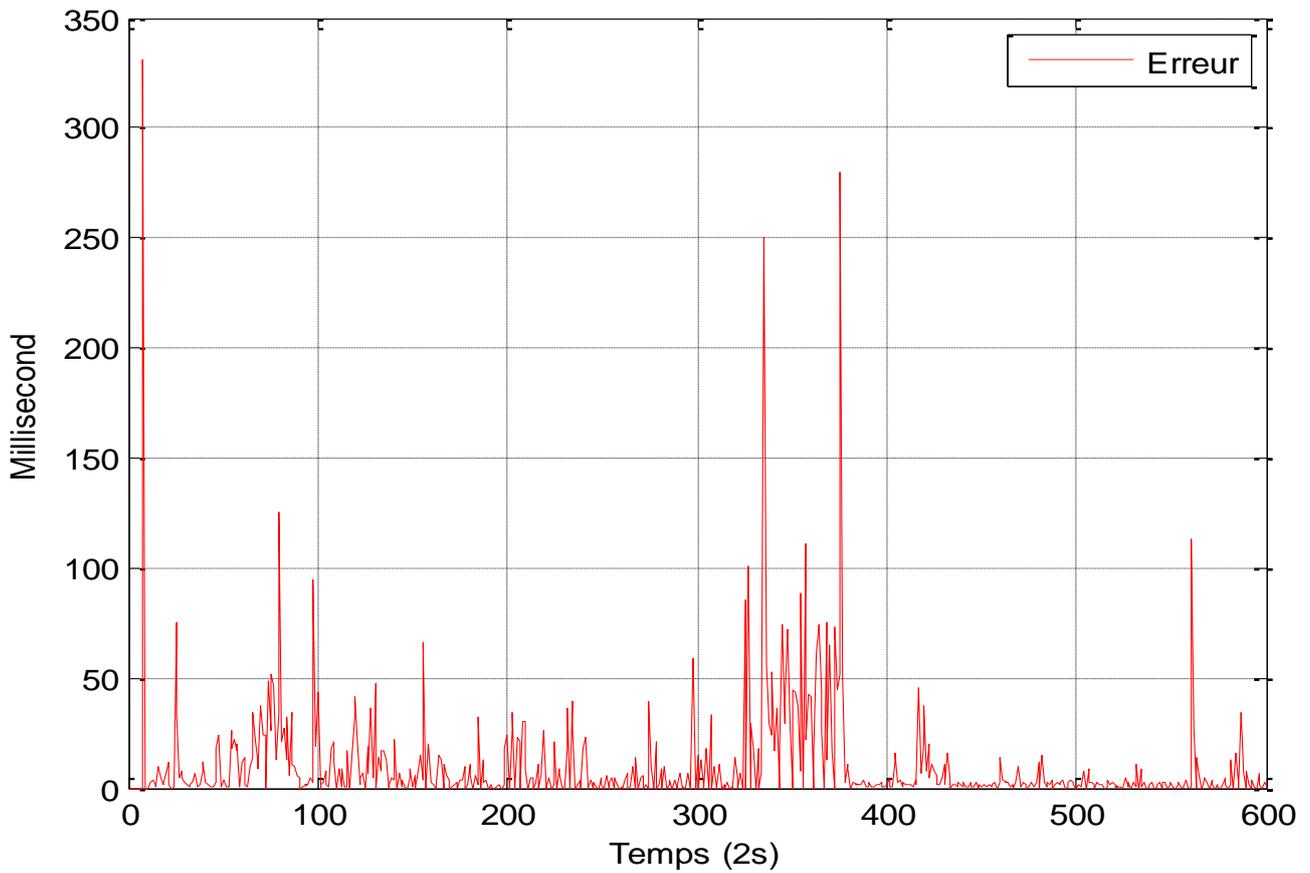


Figure 50 : Erreur de prédiction entre USTO et Iran

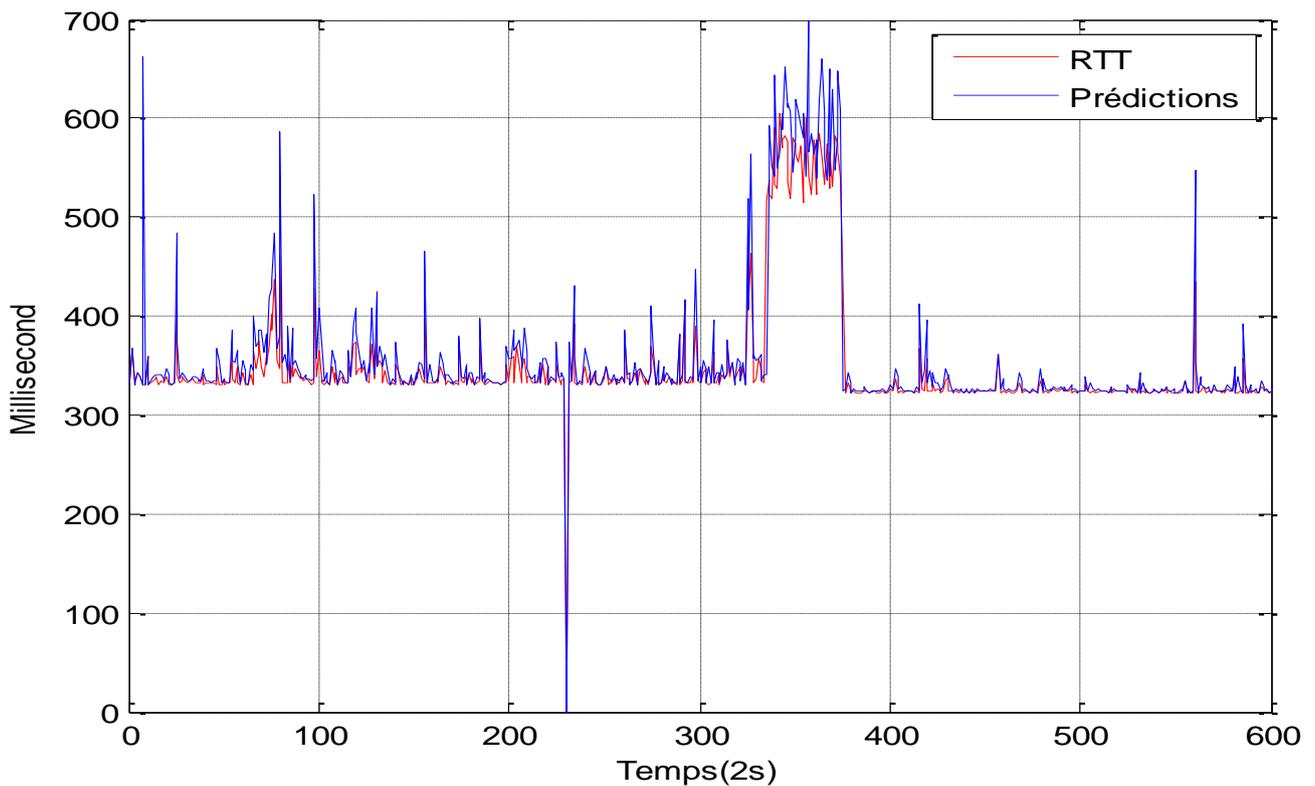


Figure 51 : Résultats des prédictions du RTT par H-W améliorée entre USTO et Iran

Expérimentations et Résultats

Tableau 6: Distributions des erreurs de prédiction par la méthode H-W améliorée entre USTO et 3 serveurs

Nœuds	$\leq 1\text{ms}$	$\leq 2\text{ms}$	$\leq 3\text{ms}$	$\leq 5\text{ms}$	$\leq 10\text{ms}$	$>10\text{ms}$
Server1	40.16	50.58	59.49	74.78	88.57	11.42
Server2	37.58	45.19	56.62	75.66	93.70	6.29
Server3	35.25	48.48	57.75	66.71	75.86	24.81

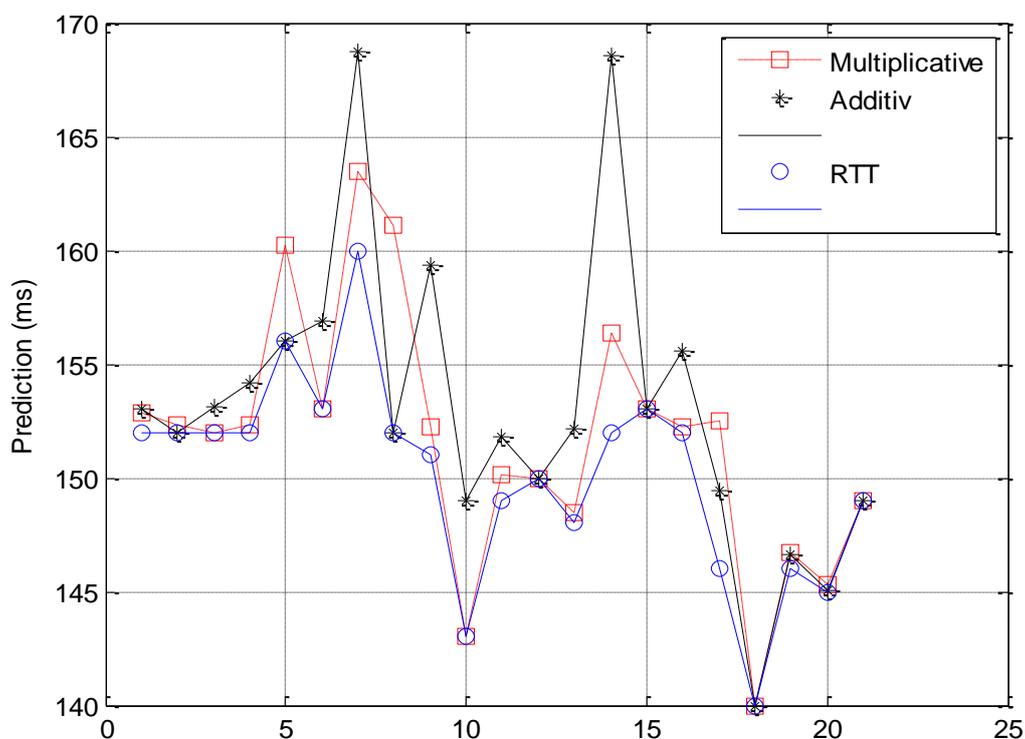


Figure 52: Comparaison des résultats de prédiction entre H-W version additive vs H-W version Multiplicative

Tableau 7: Distributions des erreurs de prédiction entre la méthode H-W version additive et H-W version multiplicative

Model	$\leq 2\text{ms}$	$\leq 3\text{ms}$	$\leq 5\text{ms}$	$\leq 10\text{ms}$	$>10\text{ms}$
Additive %	61.6	68	76	88.4	10.8
Multiplicative%	68.4	74.4	81.6	93.2	6

Expérimentations et Résultats

5.3 La comparaison entre la méthode H-W et le modèle ARIMA :

Dans cette partie on va comparer la méthode proposée (H-W améliorée) [124] avec la méthode ARIMA qui a été utilisée dans les travaux suivants [86, 89 et 90].

Dans notre thèse nous avons utilisé MATLAB pour programmer la méthode H-W, et le logiciel STATA 12 [7] concernant la méthode ARIMA.

La figure 53 présente les résultats de prédiction entre la méthode H-W et le modèle ARIMA ; et dans cette expérience nous avons fait la collection des données entre l'université d'Oran et Brest. Comme le montre la figure 53, les variations de RTT sont légères, sauf qu'il y a quelques pics. Selon les expériences qui ont été faites, nous avons conclu que les résultats de prédiction de la méthode H-W améliorée et le modèle ARIMA sont très proches, comme cela est montré dans Tableau 8 (Brest), qui présente les distributions des erreurs relatives de prédiction. Exemple, la distribution des erreurs de prédiction par H-W, entre USTO et Brest, est inférieure à 3 ms, constitue 27.3%. En revanche le modèle ARIMA constitue 26.10%. Pour la distribution d'erreurs qui sont inférieures à 10 ms, on trouve 38.55 % pour H-W, et 45.38% pour ARIMA.

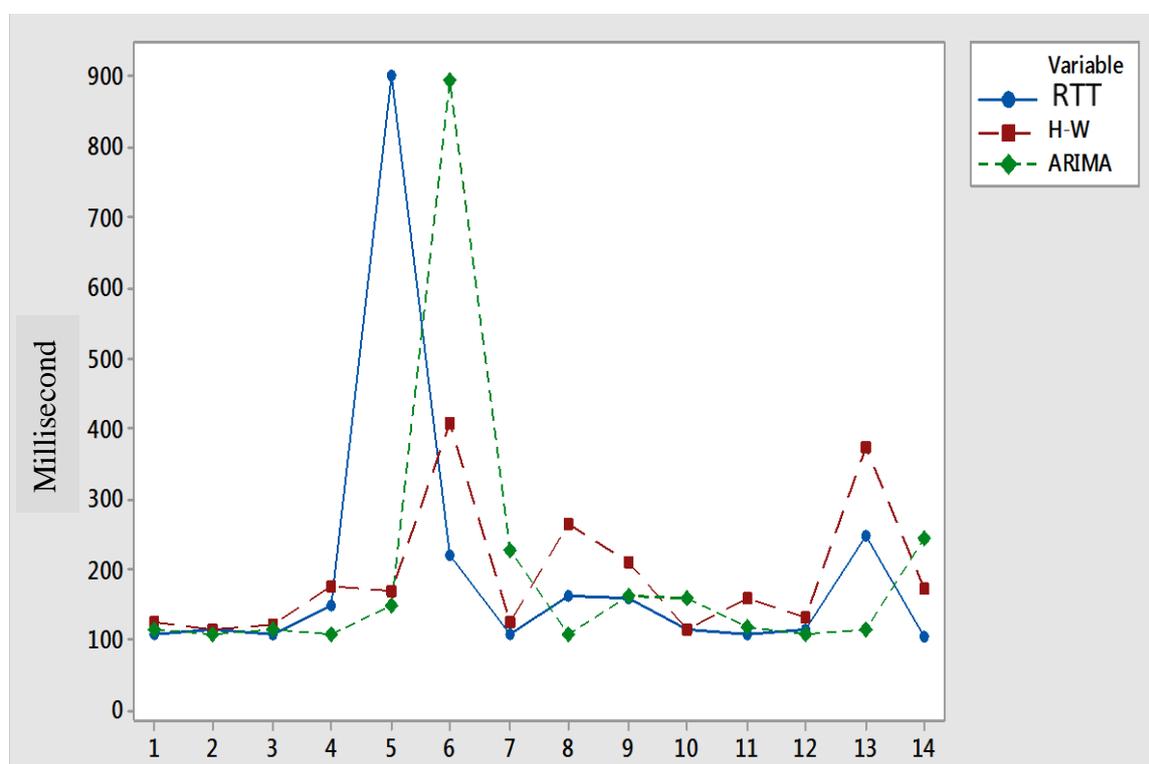


Figure 53 : Comparaison des résultats de prédiction entre la méthode H-W et le modèle ARIMA (entre USTO et Brest)

Expérimentations et Résultats

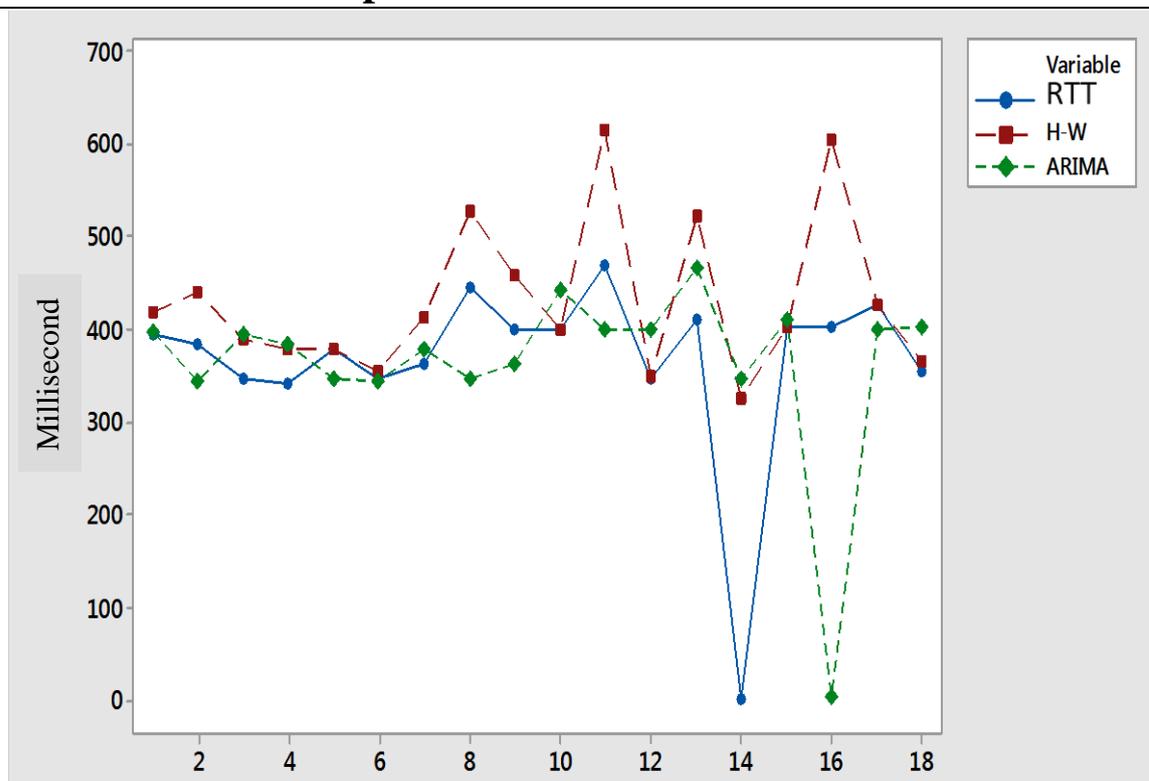


Figure 54 : Comparaison des résultats de prédiction entre la méthode H-W et le modèle ARIMA (entre USTO et Iran)

Tableau 8 : Distributions de l'erreur relative entre la méthode H-W et ARIMA

Nœuds	H-W Model	≤3ms	≤5ms	≤10ms	≤20ms	≤50ms	>50ms
IRAN (variation brusque)	Holt-Winters %	48.33	50	53.83	59	71	29
	ARIMA (1, 1,1) %	13.83	19.5	25	30	59.66	40.33
BREST (variation légère)	Holt-Winters %	27.30	32.53	38.55	65.06	86.74	13.26
	ARIMA (1, 1,1) %	26.10	33.33	45.38	64.25	85.14	14.86

De manière générale, les résultats de prédiction sont proches quand la variation de RTT est légère. Cependant, dans le cas où nous avons des variations brusques (Figure 54), la méthode de H-W est plus précise que ARIMA. Comme le montre Tableau 8 (Iran), la distribution des erreurs de prédiction par de H-W, entre USTO et Iran, qui est inférieure à 10 ms constitue 53.83%, et 25% pour la modèle ARIMA.

Expérimentations et Résultats

5.4 Évaluations des résultats de comparaisons entre la méthode H-W améliorée et le modèle ARIMA :

Dans cette thèse, deux méthodes des séries chronologiques sont présentées pour prévoir le RTT, la méthode de H-W et le modèle ARIMA. Ces méthodes ont été évaluées sur des données en ligne entre USTO et deux nœuds différents (Université de Brest et Iran). Les résultats montrent également que la méthode ARIMA est capable de prédire le RTT, mais la précision de la prédiction a une relation avec la variation de RTT, où nous avons trouvé que la méthode H-W améliorée nous fournit de meilleurs résultats de prédiction dans la variation brusque qu'ARIMA. Le modèle ARIMA est aussi impraticable pour les systèmes de prévision en ligne, car il nécessite beaucoup de calculs. Pour cette raison nous avons préféré utiliser la méthode H-W. Ce choix nous permet de prédire le RTT en temps réel.

5.5 Évaluations des stratégies de télérobotique via internet :

5.5.1 La stratégie Improved Speed Limit Module (ISLM) :

Nos expérimentations présentent l'efficacité de l'architecture proposée ISLM (chapitre 3) vis à vis de l'influence du retard du temps sur la trajectoire des robots mobiles. Nous avons mené des expériences de téléopération sur différentes distances entre éloigner l'opérateur et le matériel, où l'opérateur humain contrôle à distance à travers l'internet le robot réel qui se trouve dans une grande salle complexe (voir Figure 55). L'opérateur distant observe l'environnement du travail, grâce au feedback de streaming vidéo (caméra IP). Lorsque la distance entre l'opérateur et le robot est grande, la qualité de signal vidéo va se dégrader, dans ce cas on ne peut pas connaître la position exacte du robot, c'est pour cette raison que nous avons développé le simulateur 3D (Figure 56) dans lequel le robot réel et le robot virtuel peuvent se déplacer constamment sans ajustement, avec une vitesse constante pour le robot virtuel et variable pour le réel. Cette solution permet d'atteindre la cible avec précision. Par exemple L'opérateur distant envoie la commande 'Marche en avant' au robot réel. A ce moment-là, le robot virtuel va avancer avant le réel avec une unité de temps ' t ' celle-ci est induite par le réseau. Pour compenser ce temps on varie la vitesse du robot selon quatre niveaux, chaque niveau est attribué en fonction du RTT prédit comme il est montré dans le tableau 3(chapitre 3). Chaque fois que la valeur de RTT prédit augmente, la vitesse du robot va diminuer automatiquement, et c'est réciproque. Donc lorsqu'on envoie la commande 'STOP' le robot réel va s'arrêter au point souhaitable dans lequel le robot virtuel s'est arrêté.

Expérimentations et Résultats

La principale nouveauté de ce travail est l'architecture qui nous garantit le contrôle du robot en toute sécurité, c'est grâce à la bonne évaluation des niveaux de la qualité du service. Cette évaluation est réalisée par la prédiction du RTT avec la méthode de H-W améliorée, cette méthode est capable de prédire le RTT avec une précision acceptable [124]. Par la suite le robot va fonctionner avec la vitesse appropriée. Toutes ces opérations (stockage des données, la prédiction, le choix du niveau et la vitesse appropriée) fonctionnent de façon automatique. Les résultats expérimentaux montrent l'efficacité de l'architecture proposée. Cependant, nous avons trouvé un problème, pour contrôler la trajectoire du robot avec précision, dans le cas où les interruptions sur internet sont fréquentes. Les expériences montrent que cette architecture (ISLM) a une bonne praticabilité et une bonne sécurité.



Figure 55: Résultats de la téléopération

Expérimentations et Résultats

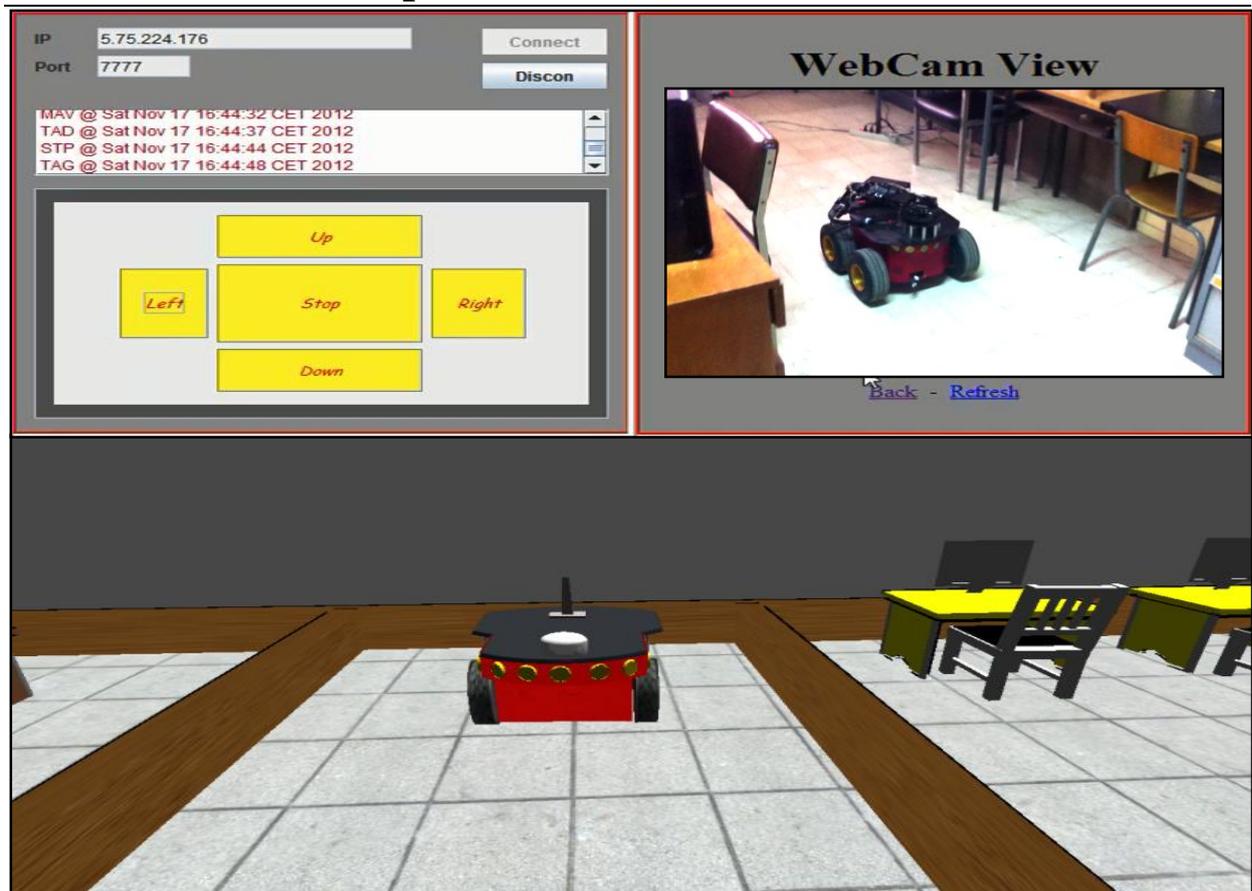


Figure 56: Commande basée sur un modèle virtuel

5.5.2 La stratégie de la Temporisation Des Commandes (TDC) :

La deuxième solution proposée pour atténuer l'impact du retard induit par le réseau, est l'architecture qui nous permet de temporiser les commandes qui sont envoyés, du client vers le serveur (robot) avec une unité de temps connu (500 ms). Cette solution nous permet de connaître avec une très petite erreur le temps du retard afin que l'opérateur ajuste et localise la position du robot. Par la suite on a comparé les trois stratégies de contrôle (SLM, ISLM et TDC), afin de répondre à leurs avantages et leurs inconvénients.

5.6 Résumé de la comparaison avec d'autres approches [24] :

Dans cette thèse nous avons proposé deux architectures (ISLM et TDC) pour contrôler le robot mobile Pioneer 3AT dans un réseau sans qualité de service garanti, puis nous les avons comparés avec d'autres stratégies (SLM). Nous nous sommes basés sur deux paramètres pour faire cette comparaison, la variation du RTT et la distance physique entre l'utilisateur et le robot, comme le montré Tableau 9.

Expérimentations et Résultats

La stratégie de **SLM** est capable de contrôler le robot avec sécurité, dans deux cas. Le cas où on a des variations légères du RTT et la deuxième a une relation avec la distance entre l'utilisateur et le robot. Il est difficile de trouver un SLM uniforme pour tous les utilisateurs [104]. A cette problématique nous avons proposé la stratégie **ISLM**, la principale nouveauté de cette stratégie est l'architecture qui nous garantit de contrôler le robot avec sécurité, grâce à la bonne évaluation des niveaux de la qualité du service ; cette évaluation est réalisée par la prédiction de RTT avec la méthode de H-W. Cette méthode est capable de prédire le RTT avec une précision très acceptable [24,124], par la suite le robot va fonctionner avec la vitesse appropriée. Le tableau 9 montre l'efficacité de la stratégie **ISLM** dans les variations brusques du RTT, même si les utilisateurs sont situés loin du robot. Cependant, nous avons trouvé des problèmes, pour contrôler le robot avec précision et sécurité, dans le cas où les interruptions sur internet sont fréquentes. Mais ce problème a été résolu par la stratégie **TDC**, cette dernière nous permet de fixer le temps du retard c'est-à-dire, le robot a une vitesse constante contrairement aux deux autres stratégies, ce qui réduit le risque de contrôler le robot via internet. Mais cette stratégie reste toujours limitée, car quand le temps de retard dépasse le seuil de 500 (ms), ou en d'autres termes la distance entre l'utilisateur et le robot est grande, on ne peut pas contrôler le robot.

Tableau 9: Comparaison des performances des diverses stratégies de téléopération

Les stratégies	La variation Légère	La variation brusque	Petite distance	Long distance
SLM	Good and Safe	Poor and Dangerous	Good and Safe	Low
ISLM	Good and Safe	Feasible	Good and Safe	Feasible
TDC	Feasible	Impossible	High and Safe	Impossible

5.7 Conclusion :

Au début de ce chapitre une comparaison a été faite entre la méthode H-W classique et la méthode améliorée. Les résultats montrent que la méthode améliorée fonctionne mieux que la méthode classique. Nous avons ensuite comparé la méthode H-W améliorée avec la méthode ARIMA, nous avons montré l'efficacité de la méthode que nous avons proposé.

Nous avons proposé deux architectures pour améliorer la qualité du contrôle d'un système à distance. Dans un premier temps, nous avons établi une communication réseau entre le client et le robot Pioneer P3AT, pour compenser la latence induite par le réseau, nous avons implémenté deux architectures :

- la première nous permet de temporiser les commandes qui sont envoyés, du client vers le robot avec une unité de temps connue, pour éviter la variation du temps de retard.
- la deuxième est une architecture qui nous permet de varier la vitesse du robot selon le RTT prédit par la méthode de H-W améliorée. Cette méthode a été choisie afin d'obtenir une bonne évaluation de la qualité de service en temps réel.

Nous avons ensuite fait des comparaisons entre les architectures proposées ISLM, TDC et SLM, pour montrer leurs avantages et inconvénients.

Conclusion Générale et Perspectives :

Tout au long de cette thèse, nous avons essayé d'atteindre nos objectifs. En effet, des réponses aux problématiques posées ont été apportées et présentent ainsi notre contribution, à savoir :

- Dans le premier chapitre, nous avons mené une étude concernant les systèmes commandés à distance et des petits historiques sur la téléopération. Nous avons aussi présenté un état de l'art concernant la réalité virtuelle et la réalité augmentée avec leurs domaines d'utilisation.
- Dans le second chapitre, nous avons présenté les méthodes et les outils nécessaires qui ont été utilisés, afin d'atténuer l'influence de la variation du retard sur internet, dans le cadre de la commande à distance. Ainsi que nos solutions proposées vis-à-vis de cette problématique.
- Dans le troisième chapitre, nous avons présenté deux architectures pour surmonter la problématique du délai sur internet. Ces architectures nous permettent de contrôler les mouvements du robot avec précision et en toute sécurité. Ce chapitre présente aussi l'utilisation de la réalité virtuelle dans le contexte de la commande à distance. La réalité virtuelle peut être utilisée d'une manière classique afin de simuler le comportement d'un système, mais aussi en parallèle avec le système réel afin d'améliorer la qualité du contrôle.
- Dans le quatrième chapitre, nous avons décrit brièvement les matériels utilisés dans cette thèse, ainsi que les logiciels utilisés.
- Dans le dernier chapitre, nous avons réalisé des expérimentations afin d'évaluer notre système de télérobotique.

Cette conclusion présente un récapitulatif de tous les aspects étudiés en identifiant les apports de cette thèse et les résultats obtenus concernant les essais effectués à longue distance.

L'objectif de cette thèse est la réalisation d'un système de téléopération, qui permet d'effectuer une commande à distance des machines industrielle en utilisant le réseau internet comme support de communication.

En choisissant comme support de transmission le réseau Internet, nous nous sommes heurtés aux problèmes de la QOS qui regroupe les critères suivants : « Débit, Gigue, Latence, délai ou temps de réponse et Perte de paquet »

La problématique principale que nous avons choisi d'étudier dans cette thèse, est la latence ou délai induits par le réseau internet qui varie de façon aléatoire pour plusieurs raisons, parmi lesquelles nous pouvons mentionner : la charge du réseau, le type de réseau utilisé, des distances physiques entre l'opérateur et la machine. Notre solution à cette problématique, est la prédiction du RTT en temps réel. Si on connaissait les valeurs futures des RTT on pourrait évaluer la QoS, cela nous permettrait d'assurer la qualité de contrôle du système distant.

La méthode Holt Winters a été proposée pour prévoir les RTT. Le choix de cette méthode est venu suite à une étude entre les méthodes de prédictions utilisées. Nous avons privilégié le choix de cette méthode à cause de deux facteurs importants qui sont : la précision de la prédiction et le temps de calcul. Nous avons ensuite proposé des améliorations sur la méthode H-W pour bonifier sa performance.

Nous avons comparé la méthode H-W améliorée avec la méthode ARIMA. Les résultats de prédictions montrent que la précision de prédiction en utilisant la méthode H-W améliorée est meilleure que celle de la méthode ARIMA, particulièrement quand les variations de RTT sont brusques. Par ailleurs le temps de calcul de la méthode H-W est le plus adapté pour réaliser une application qui nous permet de prévoir les RTT en temps réel, car cette méthode réalise le calcul de la prévision dans un seul traitement.

Une autre approche a aussi été étudiée dans cette thèse : c'est la commande à distance d'un robot mobile dans un réseau sans qualité de service garantie. Les retards des transmissions des commandes vers le robot apparaissent clairement sur la trajectoire du robot mobile. Pour surmonter cette problématique, deux architectures ont été développées :

- La première solution (ISLM) est une architecture client-serveur avec laquelle on peut varier la vitesse du robot mobile selon les RTT prédits par la méthode H-W.
- Dans la deuxième solution (TDC) nous avons proposé afin d'éviter les variations de délai de transmission sur internet, de fixer la valeur de ce dernier à une valeur constante = 500 milliseconde. L'inconvénient de cette approche est quand les valeurs de délai de transmission dépassent le seuil mentionné précédemment. Dans ce cas on ne peut pas contrôler le robot contrairement à l'autre approche.

Pendant les expériences de téléopération faites sur le robot, un problème apparaît auquel on doit faire face à savoir la qualité du signal vidéo de retour car il nous ne permet pas de suivre les positions exactes du robot. Pour résoudre ce problème nous avons utilisé la réalité virtuelle,

cette solution nous permet de voir la configuration du robot lors l'exécution d'une tâche sans avoir à attendre le retour des informations réelles.

Après l'accomplissement de notre travail, plusieurs points émergés et peuvent être le sujet de travaux future, parmi lesquels on peut citer :

- L'intégration de la méthode de H-W dans une carte Raspberry Pi [13, 14 et 15].
- L'Internet représente un canal non sécurisé pour l'échange d'informations conduisant à un risque élevé d'intrusion ou de fraude. Comme perspective on propose de protéger notre réseaux contre les attaques, afin d'assurer une arrivée sécurisée des commandes au robot.

Références :

- 1- Samir O. "Teletravail robotise et realite augmentee : Applicationa la teleoperation via internet.", Thèse de doctorat en sciences de l'ingénieur, Université d'Evry-Val d'Essonne , 2000, pp.201 .
- 2- Adda Benattia A., and Berrached N. "Etude et réalisation d'une station de télé TP.", Application en robotique, CEMAFORAD, Colloque Euro Med. Et Africain sur la Formation à distance, Strasbourg, France, 9-11 Avril 08.
- 3- Adda Benattia A., and Berrached N. "Design of Remote Practical Station.", Application in Robotic Learning, conference Internationale sur la Productique, CIP'2007 (SETIF), 2007.
- 4- Butner, Steven E., and Moji G. "Transforming a surgical robot for human telesurgery.", IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2003, Vol.19, No.5, pp. 818-824
- 5- Tee, Tiam H., et al. "3D smart user interactive system with real-time responding tele-robotic proprioceptive information.", Intelligent Systems Modelling and Simulation (ISMS), 2013, 4th International Conference on. IEEE, 2013.
- 6- Cui F., Minglu Z., and Shenghui G. "Design of the intelligent control system of telerobot based on virtual reality.", Innovative Computing, Information and Control (ICICIC'06), 2006, First International Conference on. IEEE, 2006, Vol. 1.
- 7- Stata official site [Online], Available: <https://www.stata.com/support/updates/stata12.html>.
- 8- Mobilerobots official site [Online], Available: <http://www.mobilerobots.com/ResearchRobots/P3AT.aspx>.
- 9- Obraczka K., and Fabio S. "Network latency metrics for server proximity.", Global Telecommunications Conference on. IEEE, 2000, Vol. 1.
- 10- Rovetta A., et al. "Remote control in telerobotic surgery.", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A, Systems and Humans,1996, Vol. 26, No.4, pp.38-444.
- 11- Son, Hyoungh I., Tapomayukh B., and Doo Y. "Estimation of environmental force for the haptic interface of robotic surgery.", the international journal of medical robotics and computer assisted surgery, 2010, Vol.6, No.2, pp.221-230.
- 12- Mobile Robots Advanced Robotics Interface for Applications (ARIA), Developer's Reference Manual: <http://robots.mobilerobots.com/docs/api/ARIA/2.9.1/docs/index.html>.
- 13- Official site [Online], Available: <https://www.raspberrypi.org/help/>.

- 14- Wikipedia official site [Online], Available: https://fr.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi.
- 15- Raspberry guide [Online], Available: <http://the-raspberry.com>.
- 16- Cortez P., Miguel R., et al. "Multi-scale Internet traffic forecasting using neural networks and time series methods.", *Expert Systems*, 2012, Vol.29, No.2, pp.143-155.
- 17- Lelevé A. "Contribution à la téléopération de robots en présence de délais de transmission variables.", Thèse de doctorat en automatique, Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc, 2000, pp.1-213.
- 18- El Boudadi, L. Kaddour . "Télé control de machines dans un réseau sans qualité de service garantie", Thèse de doctorat en Electronique, Université des sciences et de la technologie d'Oran – Mohamed Boudiaf, 2007.
- 19- Roberto O, and Paolo F. "Issues on Internet-based teleoperation.", 5th IFAC Symposium on Robot Control (SYROCO), 1997, Vol.30, No.20, pp.591-597.
- 20- Les Cottrell, Warren Matthews, et Connie Logg. Tutorial on internet monitoring and pinger. 2001, <http://www.slac.stanford.edu/comp/net/wan-mon/tutorial.html>.
- 21- Burdea G. "Virtual Reality systems and Applications. ", International conference in Electro, 1993.
- 22- Thibout C. "Réalité Virtuelle et Langages Graphiques : Une application pour la téléopération.", Thèse de doctorat en informatique, Université de Rennes 1, novembre 1996.
- 23- Philippe F. "Les interfaces de la réalité virtuelle. ", Les journées de montpellier, 1996.
- 24- Masmoudi M., El Boudadi, L. Kaddour., and Jean V. "Safe and efficient mobile robot teleoperation via a network with communication delay.", *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 2017, Vol.11, No.1 1-11 p.
- 25- Noyes M., and Sheridan T. "A novel predictor for telemanipulation through a time delay.", *Proceedings of Annual Conference on Manual Control*, California, NASA Ames Research Center, 1984.
- 26- Bejczy, Antal K., and Won S. "Predictive displays and shared compliance control for time-delayed telemanipulation.", *Intelligent Robots and Systems' 90, Towards a New Frontier of Applications, Proceedings(IROS'90)*, IEEE International Workshop on. IEEE, 1990.
- 27- Mallem M., Florent C., and Etienne C. "Computer-assisted visual perception in teleoperated robotics.", *Robotica*, 1992, Vol.10, No.2, pp.93-103.
- 28- Oyama E., et al. "Remote manipulation using virtual environment.", 2nd Int. Symp. on Measurement and Control in Robotics (ISMCR), 1992.
- 29- Urban E. "The information warrior.", In *IEEE Spectrum*, 1995. Vol. 11, pp. 66–70.

- 30- Ken G et Joseph S, The telegarden. <http://www.artwiki.fr/cours/technoromantisme/telegarden.html>.
- 31- Goldberg K., et al. "Collaborative teleoperation via the internet.", Robotics and Automation, 2000, Proceedings (ICRA'00), IEEE International Conference on, 2000, Vol. 2.
- 32- Taylor K., and James T. "Australia's telerobot on the web.", Proceedings of the International Symposium on Industrial Robots, 1995, International Federation of Robotics and Robotic Industries. 1995, Vol. 26.
- 33- Taylor, Anne L., and Jackson T. "A telerobot on the world wide web.", In National Conference of the Australian Robot Association, 1995.
- 34- Goldberg, Ken., et al. "The mercury project: A feasibility study for internet robots.", IEEE Robotics and Automation Magazine, 2000, Vol.7, No.1, pp.35-40.
- 35- Saucy P., and Francesco M. "KhepOnTheWeb: open access to a mobile robot on the internet.", IEEE robotics and automation magazine, 2000, Vol. 7, No.1, pp.41-47.
- 36- Siegwart R., Wannaz C., Garcia P., et al. "Guiding mobile robots through the web.", LSA-CONF, 1998.
- 37- Siegwart R., and Patrick S. "Interacting mobile robots on the web.", IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 1999.
- 38- Schulz, Dirk., et al. "Web interfaces for mobile robots in public places.", IEEE Robotics and Automation Magazine, 2000, Vol. 7, No.1, pp48-56.
- 39- Michel O., Patrick S., and Francesco M. «KhepOnTheWeb: An experimental demonstrator in telerobotics and virtual reality.", Virtual Systems and MultiMedia (VSMM). Proceedings. International Conference on. IEEE, 1997.
- 40- Nehmzow U., Andreas B., and Holger D. "Remote control of mobile robot via Internet.", University of Manchester, Department of Computer Science, 1996.
- 41- Stein, Matthew R. "Painting on the world wide web: The PumaPaint project.", Photonics East (ISAM, VVDC, IEMB). International Society for Optics and Photonics, 1998.
- 42- Otmane S., Mallem M., and Chavand F. "Les guides virtuels actifs pour l'assistance à la téléopération via internet.", Journée des Jeunes Chercheurs en Robotique (JJCR), 2012, pp.118-124 .
- 43- Backes, Paul G., Kam S, Tso, and Gregory K. "Mars pathfinder mission internet-based operations using wits.", Robotics and Automation. Proceedings, 1998, International Conference on. IEEE, Vol. 1.

- 44- Bicchi A., et al. "Breaking the lab's walls. Tele-laboratories at the University of Pisa.", Robotics and Automation, 2001, Proceedings 2001 ICRA. International Conference on. IEEE, Vol. 2.
- 45- Li Z., Yuanqing X., and Chun Y. "Intelligent networked teleoperation control.", Springer, Berlin Heidelberg, 2015, pp.1-289 .
- 46- Hamzah M., Zakaria M., Abd J., and Zamli K, "3D virtual simulation software for underwater application.", In 2nd International Conference Underwater System Technology, 2008.
- 47- Arioui H., Kheddar A., and Mammari S. "A Model-based Controller for Interactive Force Reflecting Virtual Environment under Time Delay.", Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2003, Vol.37, No.2, pp.193-207.
- 48- Henderson T. "Latency and user behaviour on a multiplayer game server.", International Workshop on Networked Group Communication., Springer Berlin Heidelberg, 2001.
- 49- Simpson, Timothy W., et al. "Impact of response delay and training on user performance with text-based and graphical user interfaces for engineering design.", Research in Engineering Design, 2007, Vol.18, No.2, pp.49-65.
- 50- Rangarit V. "On Network-Based Control and Sensitivity Characterization of Mobile Robot in Intelligent Space.", Thèse de doctorat, North Carolina State University, 2008, pp.173.
- 51- Iwama T., Akihiro K., et al. "Real-time measurement of one-way delay in the internet environment.", The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers 2004, Vol.16, No.1, pp. 386.
- 52- García, Cecilia E., et al. "Supervisory control for a telerobotic system: a hybrid control approach.", Control engineering practice, 2003, Vol.11, No.7, pp.805-817.
- 53- Moon, Sue B. "Measurement and analysis of end-to-end delay and loss in the internet.", Thèse de doctorat, University of Massachusetts Amherst, 2000, pp.134 .
- 54- Paxson V. "End-to-end Internet packet dynamics.", ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1997, Vol. 27, No. 4.
- 55- Mills, David L. "On the accuracy and stability of clocks synchronized by the network time protocol in the Internet system.", ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1989, Vol.20, No.1, pp.65-75.
- 56- Software Ping, Available: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Ping_\(logiciel\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ping_(logiciel)).
- 57- Protocoles internet, Wikipedia [Online], Available: https://fr.wikipedia.org/wiki/Suite_des_protocoles_Internet.

- 58- Ehsan K. "Real-Time Internet-Based Teleoperation.", *Intelligent Control and Automation*, 2012, Vol.3, No.2, PP. 356-375.
- 59- El Boudadi, L. Kaddour., et al. "Remote control on internet, long distance experiment of remote practice works, measurements and results.", *International Review on Computers and Software (IRECOS)*, 2007, Vol.2, No.3, pp.208-216.
- 60- Witrant E., et al. "Remote stabilization via time-varying communication network delays: Application to TCP networks.", *Control Applications*, 2004. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on, Vol. 1.
- 61- Dilaneh I., and Laurent L. "Stabilization of Networked Control Systems with uncertain time-varying delays.", *Control and Automation, 2009. MED'09. 17th Mediterranean Conference on. IEEE*, 2009.
- 62- Masmoudi M., El Boudadi, L. Kaddour, Loukil, A., et al. "The teleoperation of a mobile robot in a network without a quality of service guaranteed.", *Programming and Systems (ISPS)*, 2015, 12th International Symposium on. IEEE, 2015.
- 63- Ferrell, William R. "Remote manipulation with transmission delay.", *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics*, 1965, Vol.1, pp.24-32.
- 64- Niemeyer G, and Slotine J. "Towards force-reflecting teleoperation over the internet.", *Robotics and Automation*, 1998, Proceedings. 1998 IEEE International Conference on, Vol. 3.
- 65- Keqin G., Jie C., and Vladimir L. K. "Stability of time-delay systems." *Springer Science and Business Media*, 2003, pp.356.
- 66- Leung, Gary M., Bruce A. Francis., and Jacob A. "Bilateral controller for teleoperators with time delay via/spl mu/-synthesis.", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1995, Vol.11, No.1, pp.105-116.
- 67- Sirouspour S, and Ali S. "Model predictive control for transparent teleoperation under communication time delay.", *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, Vol. 22, No.6, pp.1131-1145.
- 68- Park, Jin W., and Jang M. "Transmission modeling and simulation for Internet-based control.", *Industrial Electronics Society*, 2001. IECON'01. The 27th Annual Conference of the IEEE, Vol. 1.
- 69- Yang M., et al. "Predicting internet end-to-end delay: an overview.", *System Theory*, 2004. Proceedings of the Thirty-Sixth Southeastern Symposium on. IEEE, 2004.
- 70- Katris C., and Sophia D. "Comparing forecasting approaches for Internet traffic.", *Expert Systems with Applications*, 2015, Vol.42, No.21, pp.8172-8183.

- 71- Alarcon A., and Javier A. "Multiresolution FIR neural-network-based learning algorithm applied to network traffic prediction.", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, 2006, Vol.36, No.2, pp.208-220.
- 72- Chellali R., and Khelifa B. "What maps and what displays for remote situation awareness and rov localization.", Symposium on Human Interface. Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- 73- Katris C., and Sophia D. "Prediction of Internet traffic using time series and neural networks.", Proceedings of international work-conference on time series analysis (ITISE), 2014, Vol. 1.
- 74- Wang C., et al. "An internet traffic forecasting model adopting radical based on function neural network optimized by genetic algorithm.", Knowledge Discovery and Data Mining, 2008. WKDD 2008. First International Workshop on. IEEE, 2008.
- 75- Gowrishankar S., and Satyanarayana P. "A Time Series Modeling and Prediction of Wireless Network Traffic.", International Journal of Interactive Mobile Technologies (iJIM), 2009, Vol.3, No.1, pp.53-62.
- 76- Xu, Lili Ma Xusong. "RBF network-based chaotic time series prediction and its application in foreign exchange market.", Proceedings of the international conference on intelligent systems and knowledge engineering (ISKE), 2007.
- 77- Szmit M., Anna S., and Marcin K. "Usage of RBF Networks in prediction of network traffic.", Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS), 2013, pp.63-66.
- 78- Ganjefar S., et al. "Prediction of delay time in Internet by neural network.", Conference on Control Applications (CCA). IEEE, 2005.
- 79- Chong K., and Sung G. "Neural network prediction model for a real-time data transmission.", Neural Computing and Applications, 2006, Vol.15.No.3&4, pp.373-382.
- 80- Belhaj S., and Moncef T. "Modeling and prediction of the Internet end-to-end delay using recurrent neural networks.", Journal of Networks, 2009, Vol.4, No.6, pp.528-535.
- 81- Sun H., et al. "End-to-end delay prediction by neural network based on Chaos Theory.", Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM), 2010, 6th International Conference on. IEEE, 2010.
- 82- Hongyan L, Wang H, and Gui C. "Internet time-delay prediction based on autoregressive and neural network model.", Circuits and Systems, 2006, International Conference on Communications, Vol. 3.

- 83- Ji K., Won-jong K., and Abhinav S. "Internet-Based Real-Time Control Architectures with Time-Delay/Packet-Loss Compensation.", *Asian Journal of Control*, 2007, Vol.9, No.1, pp.45-49.
- 84- Tu X., Yang S., and Minrui F. "Internet time-delay prediction based on unbiased grey model.", *Intelligent Control and Automation (WCICA)*, 2011, 9th World Congress on. IEEE, 2011.
- 85- Spyros G., Makridakis S., et al. "Forecasting: methods and applications. ", New York, USA: John Willey and Sons, 1998, pp.656 .
- 86- Calyam P., and Ananth D. "Modeling of multi-resolution active network measurement time-series.", *Local Computer Networks (LCN)*, 2008, 33rd Conference on. IEEE, 2008.
- 87- Liu, Peter X., et al. "End-to-end delay boundary prediction using maximum entropy principle (mep) for internet-based teleoperation.", *Robotics and Automation (ICRA)*, 2002. IEEE International Conference on, Vol. 3.
- 88- Santamaria J., and Augusto O. "Monitoring underwater operations with virtual environments.", *Offshore Technology Conference*, 2002.
- 89- Zhou B., Dan H., and Zhili S. "Traffic predictability based on ARIMA/GARCH model.", *Next Generation Internet Design and Engineering (NGI)*, 2006, 2nd Conference on. IEEE, 2006.
- 90- Shu Y., YU M., LIU J., et al. "Wireless traffic modeling and prediction using seasonal ARIMA models.", *Communications, ICC'03. IEEE International Conference on. IEEE*, 2003, Vol. 3.
- 91- Chen C., Qingqi P., and Lv N. "Forecasting 802.11 Traffic Using Seasonal ARIMA Model.", *Computer Science-Technology and Applications (IFCSTA)*, 2009, International Forum on. IEEE. Vol. 2.
- 92- Fiordaliso A. "Systèmes flous et prévision de séries temporelles.", *Hermes Science Publications*, 1999, pp.288.
- 93- Babu, C. Narendra., and Eswara R. "Predictive data mining on average global temperature using variants of ARIMA models.", *Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM)*, 2012, International Conference on. IEEE, 2012.
- 94- Box G., and Gwilym M. "Time series analysis: forecasting and control.", *Book*, 5th Edition, ISBN: 978-1-118-67502-1, 2015.
- 95- Desbois D. "Une introduction à la méthodologie de Box et Jenkins: l'utilisation de modèles ARIMA avec SPSS.", *Revue Modulad*, 2005, Vol.1, No.33, pp.1-24.

- 96- Melard G. "Algorithm AS 197: A fast algorithm for the exact likelihood of autoregressive-moving average models.", *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, 1984, Vol.33, No.1, pp.104-114.
- 97- Wikipedia official site [Online], Available: <https://fr.wikipedia.org/wiki/SPSS>.
- 98- Roustant O. "Introduction aux séries chronologiques.", *Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne*, 2008, 51 p.
- 99- Bourbonnais R. "Prévision des ventes.", *Polycopié du produit multimédia, Université Paris-Dauphine, France*, 2001, pp.1-90.
- 100- Unity3d official site [Online], Available: <https://unity3d.com/>.
- 101- Conway L., Volz R. A., and Walker, M. W. "Teleautonomous systems: Projecting and coordinating intelligent action at a distance.", *robotics and automation*, 1990. *IEEE Transactions on*, Vol.6, No.2, pp.146-158.
- 102- Bambang R. "Development of Internet telerobotics systems.", *Proceedings of Information Systems Management Research Concentration*, 2002.
- 103- Fu X. "Study on task produced the method of Internet-based teleoperation robot.", *Control And Automation*, 2006, Vol.159, pp.185.
- 104- Shengtong Z., Philippe L., and Jean V. "Internet-based teleoperation: A case study-toward delay approximation and speed limit module.", *Proceedings of the Fourth International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO) 2007*.
- 105- Brady K., and Tzyh-Jong T. "Handling Latency in Internet-Based Teleoperation.", *Beyond Webcams: An Introduction to Online Robots*, 2002, pp.171-192.
- 106- Luo, Ren C., et al. "Networked intelligent robots through the Internet: issues and opportunities.", *Proceedings of the IEEE*, 2003, Vol.91, No.3, pp. 371-382.
- 107- Siegwart R., and Ken G. "Robots on the web.", *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2000, Vol.7, No.1, pp.4-4 .
- 108- Cui F., Ming-Lu Z., and Bing-qing L. "Design of the Mending Robot Based on Virtual Reality and Intelligent Decision System.", *International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 2006 , IEEE.
- 109- Le Parc Ph., et al. "Virtual reality to improve remote control in presence of delays.", *IEEE International Conference on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces and Measurement Systems*, 2010, IEEE.
- 110- Goldberg K., and Roland S. "Beyond Webcams: an introduction to online robots.", an introduction to online robots. *MIT press*, 2002, pp.353.

- 111- Masmoudi M., El Boudadi, L. Kaddour, et al. "Design of mobile robot teleoperation system based on virtual reality.", Control, Engineering & Information Technology (CEIT), 2015, 3rd International Conference on. IEEE, 2015.
- 112- Simmons R., et al. "Lessons learned from Xavier.", Robotics and Automation Magazine, 2000, IEEE, Vol.7, No.2, pp.33-39.
- 113- Thrun S., et al. "MINERVA: A second-generation museum tour-guide robot.", Robotics and automation. Proceedings, 1999, international conference on. IEEE, Vol. 3.
- 114- Luo, Ren C., and Tse Min Chen. "Development of a multi-behavior based mobile robot for remote supervisory control through the Internet.", Transactions on mechatronics, 2000. IEEE, Vol.5, No.4, pp.376-385.
- 115- Sheridan, Thomas B. "Telerobotics, automation, and human supervisory control.", MIT press, 1992, pp.415.
- 116- Baklouti E., et al. "Remote control of mobile robot through 3D virtual reality environment.", International Conference on Individual and Collective Behaviors in Robotics (ICBR), (IEEE), Sousse, Tunisia, 15-17 Dec, 2013.
- 117- Roston J., Bradley C., and Cooperstock J. "Underwater window: high definition video on VENUS and NEPTUNE.", OCEANS, 2007. IEEE, 2007.
- 118- Samir O., et al. "Active virtual guides as an apparatus for augmented reality based telemanipulation system on the internet.", Simulation Symposium, 2000.(SS 2000) Proceedings. 33rd Annual. IEEE, 2000.
- 119- Bambang, Riyanto T. "Development of architectures for internet telerobotics systems.", Journal of Bionic Engineering, 2007, Vol.4, No.4, pp.291-297.
- 120- Pascal O. "Une architecture générique pour la supervision sûre à distance de machines de production avec Internet.", Thèse de doctorat en Informatique. l'Université de Bretagne Occidentale, Brest, 2001, pp.186.
- 121- ADEPA. "GEMMA: Guide d'études des modes de marche et d'arrêt.", 1981. <http://www.maxicours.com/soutien-scolaire/mathematiques-appliquees/bac-pro-maintenance-des-equipements-industriels-mei/187869.html>.
- 122- Hu H., et al. "Internet-based robotic systems for teleoperation.", Assembly Automation, 2001, Vol.21, No.2, pp.143-152.
- 123- Han, Kuk-Hyun., et al. "Internet control architecture for internet-based personal robot.", Autonomous robots, 2001, Vol.10, No.2, pp.135-147.

- 124- Masmoudi M., El Boudadi, L. Kaddour, Loukil, A., et al. "Real-Time Prediction of RTT Based on Holt-Winters Method for Internet-Based Teleoperation.", *International Review on Computers and Software (IRECOS)*, 2015, Vol.10, No.1, pp.72-79.