

# Résilience, robustesse et sécurité des systèmes de production commandés à distance via un réseau sans qualité de service garantie

**J. Vareille, P. Le Parc, Y. Autret, D. Espes, L. Nana**

Lab-STICC, équipe IRIS

Jean.Vareille@univ-brest.fr, Philippe.Le-Parc@univ-brest.fr, Yvon.Autret@univ-brest.fr,  
David.Espes@univ-brest.fr, Laurent.Nana@univ-brest.fr

## Résumé :

*Nous travaillons sur la commande sûre des machines de production via un réseau sans qualité de service garantie depuis 1997. Le réseau choisi à l'époque était l'Internet, de préférence au réseau numérique à intégration de service (RNIS) ou au réseau téléphonique commuté (RTC). Un système client serveur a été développé entièrement en langage java qui permet la prise de contrôle des machines via des applets exécutés dans un navigateur WEB.*

*Pour assurer la robustesse de l'application et faire face aux problèmes de qualité de communication variable du réseau, nous avons proposé le Gemma-Q qui est dérivé du Gemma. Il permet de caractériser les modes de fonctionnement des systèmes de production dans lesquels les communications ont des délais variables, et de mieux assurer leur sécurité et celle de leur environnement, grâce à un meilleur contrôle de leur fonctionnement.*

*Actuellement nous travaillons sur la prévision de la qualité de communication avec pour objectif, de fournir à la personne qui contrôle une machine à distance, un indicateur de confiance de la qualité du réseau et de l'horizon temporel auquel il peut compter pouvoir garder la main. Nous nous intéressons également à la sécurité des systèmes de production face aux cyberattaques. En effet, ces systèmes sont de plus en plus soumis à de telles attaques dont les conséquences peuvent être désastreuses, tant au plan économique qu'au plan de la sécurité physique des personnes et de l'environnement.*

*Nous présentons des résultats récents sur des mesures de point à point de temps de boucle acquises lors des contrôles à distance de robots entre Brest et divers endroits dans le monde dont la Nouvelle-Calédonie et la Nouvelle-Zélande, ainsi que des résultats sur la prévisibilité de la qualité de service du réseau de communication. L'historique des recherches est brièvement décrit, ainsi que les perspectives de développements futurs.*

## Abstract:

*We are working since 1997 on the safe control of production machines through communication network without guaranteed quality of service. The network with no guaranteed quality of service chosen at this time was the Internet, preferably over integrated service digital network ISDN or the switched telephone network (PSTN). A client-server system has been developed entirely in java language, which allows the remote control of the machines via applets executed in a Web browser.*

*To ensure the robustness of the application and to deal with problems of variable communication quality of the network, we proposed the Gemma-Q, a kind of state-chart, which is derived from*

*Gemma. It makes it possible to characterize the modes of operation of production systems in which communications have variable delays, and then to better ensure their security and that of their environment, thanks to a better control of their working.*

*Currently we are working on the prediction of the communication quality with the aim to provide to the remote control operator a confidence indicator of the quality of the network, and of a time horizon, over which he can expect to remain connected to the machine maintained under control. We are also investigating the security of production systems against cyberattacks. Indeed, these systems are more and more subject to such attacks whose consequences may be disastrous on both economics and physical security of people and environment.*

*We present recent results on point to point round-trip-time measurements acquired during remote control of robots between Brest and various locations around the world including New Caledonia and New Zealand, as well as results about forecasts of the quality of service of the communication network. The research history and prospects for further developments are briefly presented.*

**Mots clefs : télécontrôle coordonné, téléynamie, robustesse, résilience, sécurité.**

## 1 Introduction

Contrôler des machines à distance en transmettant des instructions est devenu possible vers 1840 grâce à l'invention du télégraphe par Samuel Morse. Rapidement le réseau télégraphique s'est développé et a eu de grands effets sur la propagation de l'information, mais négligeables sur la commande à distance de dispositifs autres que les mouvements de la pointe du télégraphe récepteur qui traçait les points et les tirets sur une bande de papier défilante. Le télégraphe électromécanique était une concrétisation de l'idée émise par André Ampère en 1820. Il y en eut plusieurs autres appareils presque simultanément, comme ceux de Charles Wheatstone et de Louis Bréguet. Evidemment Jules Verne avait saisi les immenses possibilités d'action des appareils électromécaniques, qu'il décrivit en particulier dans son discours « Une Ville idéale : Amiens en l'an 2000 » (1875), puis dans la nouvelle « la journée d'un journaliste américain en 2889 » (1889). Dès le milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle la langue française a adopté des mots nouveaux pour désigner la capacité d'agir à distance, la téléynamie (substantif) et téléynamique (adjectif). À cette époque ils étaient associés à un transport de puissance mécanique par des « câbles téléynamiques » inventés par les frères Hirn vers 1850, restés en usage jusqu'en 1889 environ. Ils ont été détrônés par le transport de la puissance sous forme électrique. Pourtant la commande à grande distance de systèmes de production est restée jusqu'à notre époque peu développée, en comparaison avec l'automatisation de la production et les machines outils à commandes numériques.

L'évolution très rapide des TIC depuis la fin du XX<sup>ème</sup> siècle, et la généralisation de l'emploi des technologies du Web dans les activités quotidiennes personnelles, sociales ou professionnelles, ouvrent des possibilités restées marginales et confidentielles depuis le milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle. Comme toutes les techniques appelées à des applications très larges et nombreuses, il est nécessaire non seulement d'être assuré de la faisabilité, mais aussi d'étudier la robustesse de la commande à distance aux aléas, la résilience des systèmes, et leur sécurité face aux tentatives d'intrusion ou de détournement.

Nous travaillons sur la commande sûre des machines de production via un réseau sans qualité de service garantie depuis 1997. Le projet portait le nom de téléproductique lorsqu'il fut proposé en 1996. Nous avons obtenu en 1998 un financement régional pour installer une plate-forme composée d'un

bras manipulateur et d'une fraiseuse 3 axes pour le prototypage rapide. Nous avons par ailleurs des robots mobiles. Le projet a donné lieu à une thèse soutenue par Pascal Ogor en 2001 [1] et des projets de niveau master 2 en informatique. Le réseau sans qualité de service garantie choisi en 1997 était l'Internet. Afin de permettre la prise de contrôle des machines via des applets exécutées dans un navigateur WEB en mode « client léger », un système client serveur a été développé entièrement en langage java.

Nous avons proposé une version modifiée du Gemma, nommée le Gemma-Q, qui permet d'assurer la robustesse de l'application, et de faire face aux problèmes de qualité de communication variable du réseau. Le Gemma-Q permet de caractériser les modes de fonctionnement des systèmes de production dans lesquels les communications ont des délais variables. Il permet de rendre ces systèmes robustes faces à de telles variations, c'est-à-dire de les rendre aptes à faire face à des surcharges ponctuelles et durables en quantité de données à traiter et à transmettre, à demeurer fonctionnels malgré l'absence de données reçues de l'amont ou l'impossibilité de transmettre des informations en aval, et enfin à être en mesure de fonctionner continuellement sans arrêt intempestif.

Nos travaux en cours dans cette direction visent la fourniture à la personne qui contrôle une machine à distance d'un indicateur de confiance de la qualité du réseau et de l'horizon temporel sur lequel il peut compter pouvoir garder la main.

L'acquisition de nouveaux équipements au sein du Lab-STICC a ouvert de nouvelles perspectives dans le prolongement des travaux précédents : robots d'accompagnement de personnes dépendantes (projet transverse VITAAL), robots mobiles pilotables par Internet dont un Beam+ (Suitable Technologies®), drones (projet transverse « drones »), robot Baxter de la plate-forme « Industrie 4.0 » installée à l'ENSIBS de Lorient. Une partie de nos travaux vise l'implantation de notre système client-serveur sur de petits systèmes embarqués, de façon à pouvoir les greffer sur des robots de différentes natures (industriels, agricoles ou personnels) pour permettre le monitoring de la qualité de la communication afin d'améliorer la robustesse et la résilience de ces robots.

Un autre projet auquel nous nous intéressons est le projet transversal Cyrus sur la cybersécurité qui se penche sur la sécurisation de la chaîne de production industrielle. Une chaîne flexible modèle est en cours d'implantation à l'UBO dans le cadre du projet Cyber-SSI.

L'article commence par un état de l'art non exhaustif, suivi d'une partie sur la faisabilité du contrôle à distance en ligne de machines et la fiabilité de celui-ci. Nous abordons ensuite les problèmes de sûreté, de résilience et de prévision des délais, puis des problèmes de sécurisation des plates-formes industrielles et des applications domestiques. Des résultats récents sont présentés dans cette partie sur des mesures de temps de boucle de robots contrôlés à distance entre Brest et divers endroits dans le monde dont la Nouvelle-Calédonie et la Nouvelle-Zélande. Nous terminons l'article par une conclusion en évoquant les perspectives.

## 2 Etat de l'art

Le plus ancien robot en ligne utilisant les technologies Web était le Telerobot australien [2] de l'University of Western Australia (UWA, Telelabs project) développé par Kenneth Taylor pendant sa thèse en 1995. Il s'agissait d'un bras manipulateur placé auprès d'une table sur laquelle étaient déposés des objets géométriques colorés (cubes, parallélépipèdes rectangles, coins, cylindres), pouvant être saisis par la pince du bras manipulateur lorsqu'il était contrôlé à distance, pour les empiler. Ensuite il y eut le projet Pumapaint [3], puis d'autres projets ont vu le jour parmi lesquels le projet Mercury [4], le nôtre (Téléproductique), le projet Ariti de l'Université d'Evry [5], Khep on the Web [6] qui montrait que la technique était extensible à des robots miniatures, etc. Les objectifs de ces projets étaient d'étudier la faisabilité de la commande de machines par Internet avec la transmission

simultané d'un flux d'images. Dans le cas d'Ariti l'objectif était la formation de personnes en utilisant des guides virtuels. La commande par Internet n'était pas le but, mais un moyen pour former des publics distants. D'autres auteurs se sont intéressés aux problématiques nouvelles que posait ce type de contrôle [7].

La figure 1 montre le schéma qui avait été présenté lors d'une réunion en février 1996. À l'époque la création en Bretagne d'un AIP (Atelier Inter-établissement de Productique) associé à un pôle Priméca (Pôle de Ressources Informatiques pour la Mécanique) était discutée. Sur cette figure un ensemble de serveurs de communication distribuant des données apparaît entre les ateliers à droite du schéma et les personnes distantes à gauche. Aujourd'hui on placerait là l'info-nuage ou le cloud, et les données seraient stockées et délivrées dans un data-center géré par un hébergeur. Sur la gauche de la figure 1 le fait que des individus en autoformation puissent accéder aux données correspond à ce que l'on appelle de nos jours les MOOCs et les SPOCs et autres tutoriaux en ligne.

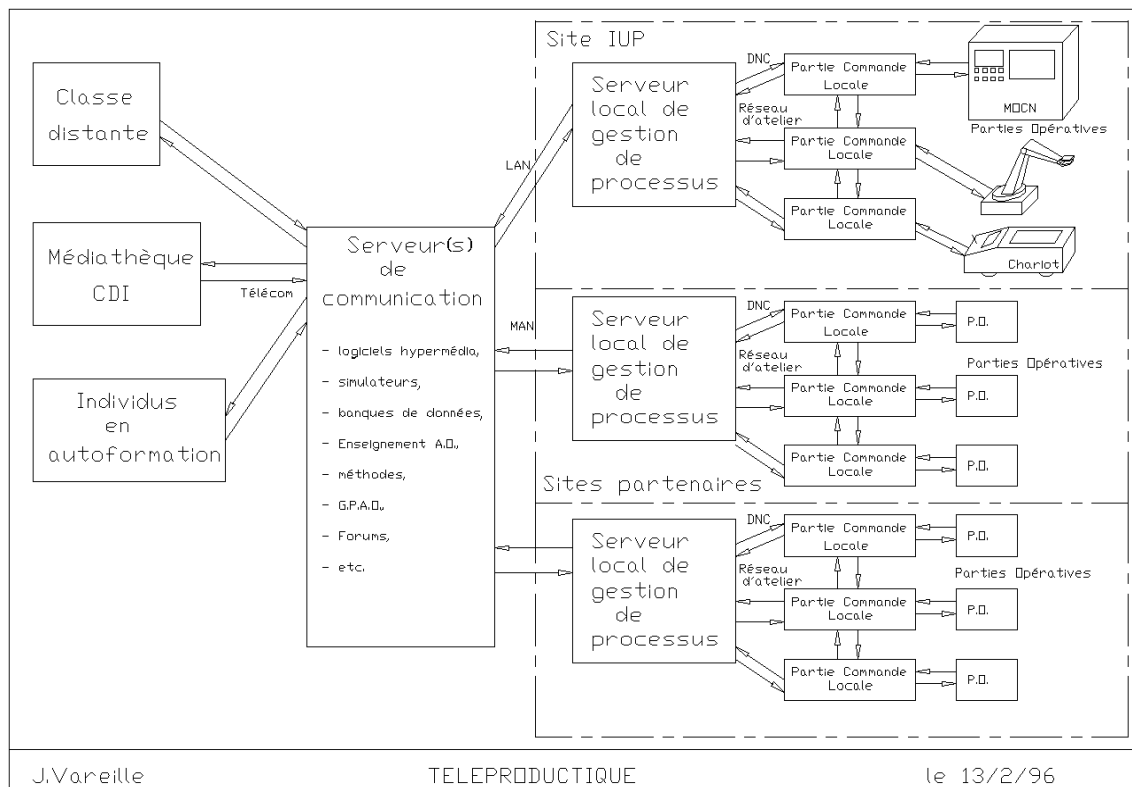


Figure 1 : le projet Téléproductique, première proposition du 13 février 1996.

Le projet téléproductique s'est développé pendant une dizaine d'années, pour se transformer ensuite en une activité de recherche autour de la sûreté, la résilience et la sécurité des systèmes, parmi lesquels certains sont des robots mobiles et d'autres des bras manipulateurs.

Le 7 septembre 2001 eut lieu entre New-York et Strasbourg la première opération chirurgicale à distance, effectuée par le professeur Jacques Marescaux : l'« opération Lindbergh ». La transmission des informations employait bien comme couche physique une fibre optique transocéanique, cependant la connexion ne passait pas par Internet, mais via une ligne dédiée permettant la réservation de bande passante. Le temps de transmission aller-retour était suffisamment court, et stable pour être compatible avec une bonne qualité d'exécution des gestes effectués en situation de téléopération avec retour d'effort, soit avec un temps de boucle (RTT) plus petit que 200 ms. Les techniques de communication mises en œuvre correspondaient bien à celles de l'Internet, en termes de protocoles et de transmission des paquets, mais la ligne avait été séparée du trafic ordinaire selon la stratégie d'acheminement au mieux (best effort delivery).

La société Schneider proposa dès le début des années 2000 des interfaces Ethernet sur leurs automates et des adaptateurs permettant de communiquer avec des systèmes de supervision de systèmes SCADA, eux-mêmes connectés à Internet.

Mais depuis, bien que l'utilisation d'Internet se soit généralisée pour transmettre les messages, pour la téléphonie, pour la visioconférence, pour envoyer des devis, passer les commandes commerciales, facturer et payer, il n'en va pas de même dans le monde manufacturier.

Rappelons qu'en 2006 une action spécifique du CNRS avait été lancée, l'AS 198 INTICA (Introduction des Technologies de l'Information dans la Commande Automatisée) à laquelle nous avons participé. A la même époque le réseau des AIP PRIMECA a mis en place des machines de production commandées à distance l'une à l'AIP de Lorraine et l'autre à celui des Pays de Loire. Il s'agissait de plieuses dérouleuses. Celles-ci étaient employées pour la formation lors de connexion réciproques entre les deux AIP ainsi que depuis l'IFMA (Institut Français de Mécanique Avancée).

Parallèlement notre plate-forme brestoise fut utilisée par un enseignant de l'Université de Strasbourg pendant quelques cours en amphithéâtre, par des étudiants en DEA puis master 2 de l'Université de Lorraine et un collègue de l'USTO à Oran lorsqu'il était en doctorat.

Aujourd'hui la quasi-totalité des machines produites comme les imprimantes, les machines-outils, les robots, les machines de prototypage rapide, les automates programmables peuvent être connectées au réseau, échanger des données, voire héberger des serveurs ftp, http, etc. Cependant il n'est pas fréquent de laisser les machines accessibles sur Internet depuis l'extérieur de l'entreprise, sauf pour leur télémaintenance.

Cette situation est en train de changer, sous l'impulsion des projets Industrie 4.0 et usine du futur. L'usine du futur [8] sera connectée et communicante, ses productions seront tracées, elle aura de faibles impacts environnementaux, etc. La pyramide CIM avec ses niveaux stratégiques, tactiques et de terrain doit être remise à plat car les temps d'échange des informations entre le terrain et le sommet sont devenus imperceptibles à l'échelle humaine. Les débits de données sont égaux au sein de chaque niveau ainsi qu'entre les niveaux, et potentiellement considérablement supérieurs aux besoins. L'inertie ne vient plus des trop faibles capacités de transmission des réseaux, mais du terrain lui-même, des machines qui fabriquent et des processus matériels mis en œuvre. Cependant des aléas de communication récurrents peuvent semer le chaos dans la production. L'absence de communication peut paralyser une unité de production dont toutes les machines communicantes sont individuellement en parfait état de fonctionner.

La partie suivante s'intéresse à la faisabilité et la fiabilité du contrôle à distance. Il ne pourra y avoir d'application de ce type de contrôle à grande échelle que s'il atteint un degré de sûreté de fonctionnement similaire à celui du contrôle en présence.

### **3 Faisabilité et fiabilité du contrôle à distance**

#### **3.1 Faisabilité d'un contrôle à distance**

En plus des cas anciens cités dans l'introduction, rappelons que la commande à distance sans fil est apparue également très tôt, et très vite après l'invention du cohéreur d'Edouard Branly en 1890. Dès 1898 Nicolas Tesla avait construit un bateau télécommandé. En 1905 Edouard Branly monta une exposition intitulée « Télémécanique » au palais du Trocadéro à Paris, dont les expériences mettaient en œuvre des commandes à distance, dont certaines par transmission sans fil. Avec les progrès de l'électronique les applications pour le grand public se sont développées et sont largement diffusées sous la forme de télécommandes analogiques (RC) pour des véhicules aériens, terrestres et sur l'eau, et de télécommandes numériques pour des drones. Il s'agit là essentiellement de produits de loisirs. Mais

les télécommandes sont aussi utilisées dans les environnements difficiles, pour des activités qui peuvent nuire aux personnels, comme les petits rouleaux compresseurs de chantier, ou les robots de démolition (Brokk, Husqvarna, Conjet), etc. Ces télécommandes sont généralement utilisées en vue directe du système commandé, les personnels s'en éloignant pour se tenir à l'écart de leurs nuisances.

Ce n'est que depuis les années 2000 que la commande de drones à grande distance est apparue, en particulier pour des opérations militaires ayant lieu sur des théâtres d'opération très éloignés.

Dans le cas des télécommandes filaires à grande distance, hormis pour les systèmes de transmission d'information comme les télégraphes, les bélinos, les télécrypteurs, les fax, la commande à grande distance de machines bien au-delà de l'horizon, est demeurée faiblement utilisée, probablement à cause des faibles débits d'information et du coût des communications télégraphiques et téléphoniques. Les systèmes les plus répandus ont été les fax, mais ils sont aujourd'hui passés de mode.

La fin du XX<sup>ème</sup> siècle et l'arrivée des TIC a complètement bouleversé cette situation, et une rupture technologique majeure est arrivée grâce aux technologies Web et aux réseaux de communication à très haut débit. Les expériences citées précédemment ont montré la faisabilité de la commande en ligne avant même l'an 2000. Il est facile aujourd'hui de trouver à très bas prix des caméras web orientables à focale variable et des robots domestiques de surveillance munis de caméra auxquels on peut accéder depuis son smartphone.

Pour qu'un contrôle en ligne soit possible et puisse apporter quelque chose d'utile, il faudrait que les délais de transmission aller-retour entre l'utilisateur et la machine soient comparables au temps qu'il lui faudrait pour accéder à la machine et à son pupitre lorsqu'il est en présence d'elle, et que d'autre part le débit de données soit suffisant pour transmettre toutes les données mesurées, avec un flux d'images et les sons associés pour restituer la situation de façon multi-sensorielle. Nous discernons au moins deux grandes familles de cas, la téléopération avec retour d'effort, et le télécontrôle coordonné. Dans le premier cas pour que l'humain ne soit pas déconcerté par le décalage entre son action et ce qu'il constate visuellement, il faut que les délais aller-retour soient maintenus continuellement en dessous de 200 ms. Dans le second cas, s'il s'agit de robots mobiles, nous sommes alors dans une situation proche de la conversation en visio-conférence. Il faut que les délais soient de l'ordre de un tiers de seconde à la moitié d'une seconde. Au-delà il y a une sensation de moments vides, et un sentiment nuisible de trouble et d'incertitude peut apparaître. Dans les ateliers où il y a des machines de production fixes, il est fréquent que l'opérateur chargé d'une machine automatisée soit à un ou deux mètres de celle-ci lorsqu'elle travaille, s'occupant lui-même à une autre tâche que l'observer. Quand un incident arrive, il doit parcourir la distance qui le sépare du pupitre, cela lui prend une à deux secondes. Une seconde de délai de transmission est acceptable, voire deux, mais pas plus.

Nous considérons que même sur les machines très automatisées il y a toujours des phases de mise en route, d'arrêt, de réglage, de diagnostic, et de maintenance qui nécessitent la mise en place d'un système de télécontrôle coordonné. Une machine de production ne peut être continuellement autonome pendant toute sa durée de vie.

Nos hypothèses de travail ont toujours été que le débit de données sera très surabondant quand toute l'infrastructure fixe de communication sera câblée en fibre optique jusqu'à l'utilisateur final, mais que les délais ne pourront jamais diminuer en dessous du temps de propagation physique des signaux dans la couche physique. Or à très grande distance, ces temps minimaux sont proches, voire dépassent, le temps de boucle (RTT) minimal pour la téléopération avec retour d'effort (200ms). En résumé, pour nous le facteur limitant sera toujours le délai, surtout s'il est variable, alors que le débit ne sera plus un obstacle rapidement.

La pose du réseau à fibre optique jusqu'à l'utilisateur final est en cours dans les pays européens, ainsi que de nombreux autres endroits dans le monde. Par exemple Kaméré a été le premier quartier de Nouméa (Nouvelle-Calédonie) câblé en 2015-2016. La ville d'Auckland est partiellement câblée. Le réseau à très haut débit relie aujourd'hui tous les continents, presque tous les pays, la plupart des îles

habitées. Cette extension est en cours et elle est très rapide. A l'horizon 2020 les villes de la planète entière seront connectées en très haut débit, y compris des campagnes reculées.

## 3.2 Fiabilité

Nous considérons que la panne d'un système technique n'est qu'une question de temps. À long terme elle est certaine. Par conséquent il faut dès la conception imaginer les scénarios de pannes, et dans notre cas la perte de contrôle. Pour qu'un système soit robuste il faut qu'il soit avant tout fiable.

La fiabilité du système s'apprécie en général du côté de la machine commandée. Elle fait l'objet de d'évaluations quantitatives établies sur des observations, et d'évaluations prospectives pour des systèmes futurs extrapolés de systèmes passés. Les notions les plus couramment employées sont le MTBF (Mean Time Between Failure ou temps moyen entre panne) et le MTTR (Mean Time To Repair ou temps moyen pour réparer).

La machine commandée est dotée en général d'un pupitre, mais parfois d'un seul bouton. Sur les robots mobiles industriels télécommandés comme les transporteurs de palettes produits par la société BA-Systèmes ou les robots démolisseurs des sociétés Brokk, Husqvarna et Conjet, il y a sur leur tableau arrière un interrupteur tamponnoir d'arrêt d'urgence, identique à ceux que l'on trouve sur les machines de production ou les lignes robotisées. L'arrêt du robot peut être préempté par un opérateur situé au plus près, en agissant directement sur le robot. En France l'INRS (Institut National de Recherche et Sécurité) est en charge des questions de santé et de sécurité au travail. Il diffuse les réglementations, et participe à l'application de la directive européenne sur les machines. La prise en compte des événements possibles et des modes de marche et d'arrêt qui en découlent est un impératif.

C'est une erreur de fabricants de robots ludiques de ne pas avoir mis sur leurs produits dans la plupart des cas de tels interrupteurs, bien visibles et très accessibles. Outre le fait qu'ils ne sont pas inesthétiques, ils donneraient un côté rassurant et professionnel à leurs produits, ce qui pourrait constituer un argument commercial. D'autre part cela réduirait l'écart entre les applications domestiques et les applications professionnelles.

Dans le cas d'une communication par Internet qui est sans qualité de service garantie, l'interruption de communication peut avoir lieu à tout moment pour une durée variable et inconnue. Internet est un milieu ouvert qu'il est très difficile de modéliser, et quand bien même il serait modélisé, les simulations prédictives seraient aussi incertaines que celles de météorologie. Une des difficultés des pannes de communication est d'apparaître et disparaître sans laisser de trace, et donc être difficiles à cerner. Un impératif de conception est qu'il faut, pour certaines pannes, réagir sans attendre la remontée des dépassements de temps depuis des équipements intermédiaires de communication (les timeouts), et que la réaction doit avoir lieu sans diagnostic préalable, et être uniquement guidée par les conséquences potentielles que le défaut pourrait avoir.

Pour que le système soit déterministe, il faut que les scénarios correspondent à des reprises de contrôle autonome par la machine, et qu'elle exécute une procédure qui l'amène dans un état prévisible pour le contrôleur. Cela ne se traduit pas forcément par un arrêt immédiat dans la position atteinte. Nous concluons de cette partie qu'il est judicieux de prévoir des comportements résilients, et qu'il serait utile de disposer d'une prévision de problèmes de communication à l'image de ce que sont les prévisions météorologiques à court terme. Ces aspects feront l'objet de la partie suivante.

## 4 Sûreté, résilience du contrôle, prévision des délais

### 4.1 Sûreté et résilience d'un contrôle à distance

Une machine de production commandée à grande distance en employant les technologies de l'Internet pose des problèmes de sûreté de fonctionnement qui ne peuvent être pas abordés en analysant seulement la machine dans son environnement proche. En effet l'Internet par lequel transite l'information ne présente pas de régularité de transmission. Sa grande ouverture le rend vulnérable à beaucoup d'aléas. Certains sont des incidents pour lesquels des statistiques existent comme les taux de défaillance des équipements physiques. D'autres sont des accidents comme des coupures accidentelles de câbles par des travaux, ou des séismes. Des engorgements réguliers ou ponctuels ont lieu, dont l'origine est humaine ; ils sont dus soit à une trop forte demande, soit à des tentatives d'intrusion. Il arrive aussi que des logiciels inondent le réseau de paquets d'information inutiles, à cause d'une erreur de programmation, ou bien par les effets d'un code malveillant. L'ensemble constitué de la machine, du réseau de communication et du contrôleur distant ne peut être valablement modélisé qu'aux deux extrémités. Entre les deux l'Internet est un genre de boîte noire irrégulière, au fonctionnement de laquelle il faut s'adapter continuellement.

La thèse de Pascal Ogor soutenue en 2001 sur le contrôle sûr à distance, a conduit à proposer un guide d'étude des modes de marche et d'arrêt nommé Gemma-Q, inspiré du Gemma habituel. Rappelons qu'un Gemma est un genre de state-chart, c'est-à-dire un modèle de système discret, dont un seul état est actif à tout moment. Il peut y avoir transition d'un état à un autre en fonction des événements, qui peuvent être des actions sur des boutons d'un pupitre de la part de l'opérateur, ou des détections de défaillances ou d'absence de matière d'œuvre par des capteurs.

Il a proposé de définir des intervalles de délais d'après le contexte de la machine et les habitudes de travail de l'atelier dans lequel elle est employée. Un intervalle de délais de bonne qualité correspondant à des délais imperceptibles à l'échelle humaine pour le contrôleur, la qualité moyenne correspondant à des délais perceptibles mais compatibles avec le maintien en exécution des commandes de la machine avec éventuellement un ralentissement de la vitesse de déplacement, et la mauvaise qualité correspondant à une neutralisation de l'exécution des commandes, concomitante avec un avertissement affiché au contrôleur pour l'en informer. Au total il y a 5 niveaux de qualité (Q1 à Q5), plus un état neutre Qz correspondant à l'attente de prise de contrôle. Lorsque la machine est dans cet état elle est livrée à elle-même, son système décisionnel prenant le relai du contrôleur distant. De plus un barre-graphe affichant les délais réactualisés chaque seconde est inséré dans l'interface de commande. Vers 2005 nous avons constaté avec satisfaction qu'un système similaire avait été inséré dans les panneaux de contrôles de certains jeux en ligne, sous le nom d'« indicateur de lag » (décalage).

Un système client-serveur avait été développé en langage java en adoptant une philosophie « plug and play ». Pour connecter une nouvelle machine il fallait auparavant développer un pilote du côté du serveur connecté à la machine, et un morceau d'interface inséré dans l'applet du côté client. La technique de programmation fait appel à du multi-threading. Les threads communiquent par des tubes (pipes) lorsqu'ils sont exécutés parallèlement sur la même machine, et par des sockets lorsqu'ils s'exécutent sur des machines distinctes, notamment à distance les unes des autres. L'emploi des processus légers (threads) est justifié par la volonté de rendre résilient le système. La résilience en mécanique est l'aptitude d'un objet matériel à résister aux chocs. Dans le cas des logiciels, notre cas, c'est la qualité d'une application qui lui permet de continuer à fonctionner malgré la défaillance d'un ou de plusieurs de ses sous-processus, associée à la capacité à les redémarrer automatiquement lorsque leur défaillance est constatée. Le système client-serveur développé était capable de relancer ses processus légers lorsque leur exécution s'était interrompue inopinément.



La qualité de communication est mesurée par le biais d'un système de ping-pong faisant appel au protocole TCP-IP, avec une actualisation permanente. Ces mesures sont enregistrées dans des fichiers de traces qui récapitulent tous les événements qui ont eu lieu pendant un contrôle. Ces fichiers de traces sont analysés après coup pour examiner les variations de la qualité du contrôle et vérifier sa faisabilité selon des critères similaires à ceux employés dans le contrôle de production.

Le système a été appliqué à un bras manipulateur pédagogique Ericc 1, une fraiseuse légère 3 axes Isel CPM3020, des caméras orientables à focales variables Sony EVI-D31 en particulier, mais aussi d'autres modèles, dont une caméra qui fut installée dans la manchotière d'Océanopolis à Brest, et une autre, sur l'île aux Dames, inhabitée et interdite d'accès, située dans la baie de Morlaix, pour observer une colonie de Sternes de Dougall pendant la période de reproduction.

Le système mesurait continuellement des temps de boucle qui étaient enregistrés sur le serveur dans des fichiers de traces, pour un retraitement ultérieur afin d'évaluer la qualité de la connexion en point à point, entre le serveur et le client qui contrôlait la machine. Nous avons l'intention d'évaluer une sorte de MTBF (Mean Time Between Failure) et de développer des applications qui diminuent au maximum le MTTR (Mean Time To Repair) du côté machine et du côté client.

La figure 2 correspond à une mesure de temps de boucle (RTT) sans prise de contrôle de machine, effectuée entre notre laboratoire situé à Brest et l'université d'Auckland en 2005. Aux deux extrémités les ordinateurs étaient reliés à Internet par des liaisons filaires. Le graphique du haut montre les valeurs mesurées, celui du milieu les fréquences de ces valeurs et celui du bas les fréquences cumulées.

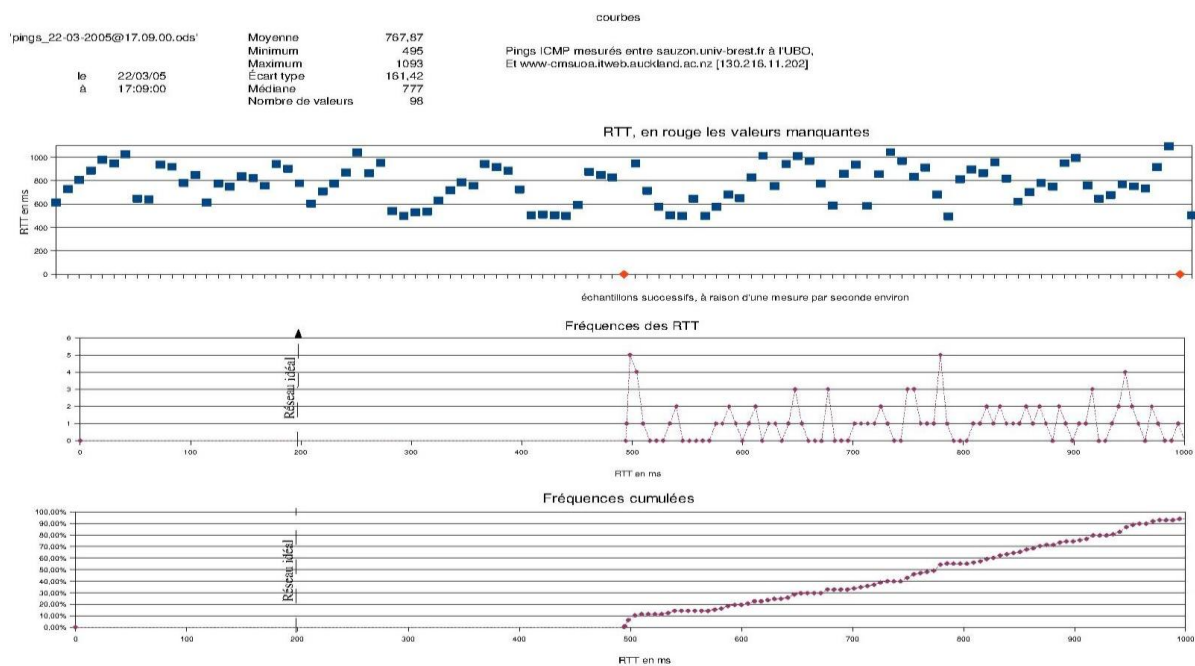


Figure 2 : mesures de RTT entre l'UBO et l'université d'Auckland (NZ) en 2005.

Sur les deux graphiques du bas une barre verticale est tracée au voisinage d'un temps de boucle de 200 ms. Il s'agit du temps de boucle idéal si le réseau était parfait et qu'une fibre optique allait de Brest à Auckland par la voie la plus courte, au fond des océans. Le calcul montre que ce délai aller-retour serait voisin de cette valeur. Si la transmission était constante et idéale toutes les trames mettraient exactement le même temps. Le graphique du haut serait une ligne horizontale, celui du milieu un pic, celui du bas un échelon.

La figure 3 correspond quant à elle aux données enregistrées dans un fichier de traces de connexion écrit par le serveur, alors que le robot situé à Brest était contrôlé depuis un hôtel d'Auckland, le Quality Hotel Parnell. La qualité de l'expérience menée en 2015 était bonne. La liaison à l'intérieur de

l'hôtel était en wifi, l'ordinateur utilisé était un netbook datant de 2009. Le robot mobile était un Miabot de la société Merlin System [9] relié au serveur en Bluetooth. Aux deux bouts les liaisons étaient sans fil. Nous pouvons observer entre les deux expériences faites à dix ans d'intervalle que le RTT du paquet le plus rapide est passé d'un peu moins de 500 ms en 2005 à un peu moins de 300 ms en 2015. Nous ne sommes plus très loin de la limite de temps de transmission dans la couche physique. En 2015 80% des paquets sont arrivés en moins de 500 ms, alors qu'en 2005 il y en avait moins de 10%, et 95 % des paquets ont transité en moins de 650 ms en 2015 alors qu'il fallait une seconde en 2005.

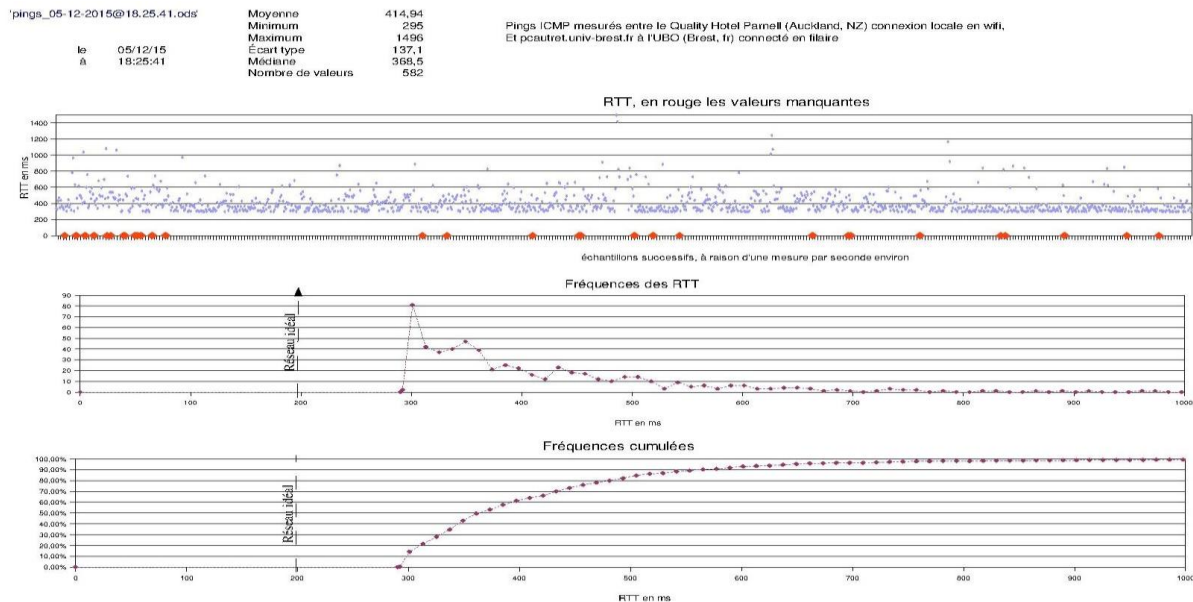


Figure 3 : mesures de RTT entre le Quality Hotel Parnell d'Auckland (NZ) et l'UBO en 2015.

D'autre part pour évaluer le débit, une expérience modèle avait été mise en place. Nous voulions estimer si un robot situé dans une maison particulière d'un village rural d'une région où la population est vieillissante pouvait être commandé à distance depuis un hôtel ou une maison particulière d'un pays très lointain. Un scanner d'une imprimante « tout-en-un », reliée à un modem ADSL par l'intermédiaire d'un boîtier HP Jetdirect, installés dans une maison particulière située dans un village de Corrèze, était interrogé pour lancer des opérations de numérisation d'une image posée sur sa vitre, selon des résolutions et des modes différents couleur / échelle de gris / noir et blanc. La maison n'était pas habitée pendant la période où les essais ont été faits, elle était donc un bon modèle de commande en contrôle coordonné à très grande distance. Les mesures effectuées correspondaient au temps de téléchargement complet de l'image scannée à partir de l'envoi de la commande. Le gestionnaire de téléchargement du navigateur a indiqué que le débit moyen des données était de l'ordre de 100 kbits/s, et parfois atteignaient le double ou le triple suivant la charge du réseau. Ce sont des débits largement suffisants pour faire de la visio-conférence.

Du point de vue de la qualité de l'expérience, nous avons constaté que la technique du Gemma-Q fonctionne mais que le système client-serveur est tributaire des aléas des machines java, en particulier pour ce qui concerne les applets. Depuis deux ans environ les principaux éditeurs de navigateurs WEB ont annoncé la fin de la prise en charge du plug-in java, pour des raisons de sécurité. Cela nous conduit à devoir réécrire la partie cliente. La gestion de la sécurité nuit à l'exécution des applets du côté client autant que du côté serveur. Nous avons constaté un certain nombre de blocages de notre système qui a obligé à prendre le contrôle de l'ordinateur situé à Brest en mode bureau à distance (VNC) soit pour arrêter le logiciel serveur et le relancer, soit redémarrer l'ordinateur.

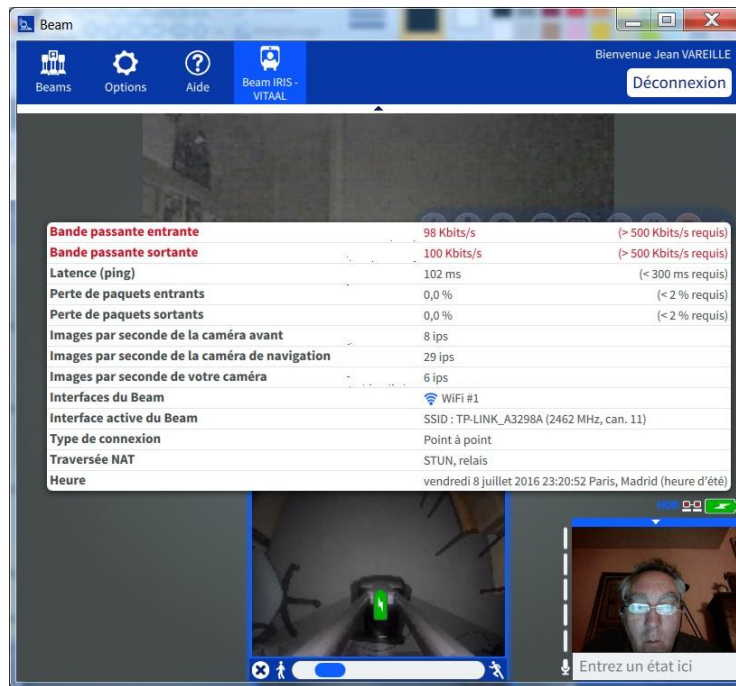


Figure 4 : interface du robot Beam+ côté contrôleur avec le panneau d'état

En 2016, dans le cadre du projet VITAAL bénéficiant d'un financement CPER, nous avons acheté des robots mobiles pouvant être utilisés pour l'assistance aux personnes dépendantes, tout au moins pour le maintien des interactions sociales à défaut de pouvoir véritablement agir sur place. L'un des robots est un Beam+ de la société étasunienne Suitable Technologies® (CA), que nous avons mis en œuvre. Il s'agit d'un robot conçu pour le télétravail, dont l'emploi principal est le maintien de la scolarisation d'enfants ou d'étudiants atteints de maladie de longue durée ou en convalescence. Ces robots leur permettent d'être téléprésents en classe, tout en demeurant dans leur milieu de soin. La figure 4 montre l'interface lors d'une expérience menée dans la soirée du 8 juillet 2016. L'ordinateur de contrôle était connecté en wifi à un modem ADSL d'une maison particulière située à 6 km de l'université, le robot était dans un bureau de celle-ci. Il était lui-même connecté en wifi à un routeur de faible prix. L'ensemble constitue un assez bon modèle pour étudier les performances d'un robot d'assistance à domicile. L'image du haut partiellement cachée est pixélisée car le contrôle de flux diminue la qualité de l'affichage lorsque le débit mesuré en continu est faible. L'image du bas au centre est fournie par une caméra verticale à objectif grand angle. On y voit la base mobile du robot et les obstacles qui sont autour. Le bureau était dans la pénombre, éclairé uniquement par les petites lampes portées par le robot. À droite en bas apparaît l'image locale de la visioconférence. La boîte de dialogue au centre de l'interface est un panneau d'information qui s'affiche sur demande. À gauche des valeurs on voit de tous petits points qui correspondent à un affichage défilant des valeurs successives, pour montrer au contrôleur leurs évolutions. On constate que les bandes passantes montantes et descendantes sont insuffisantes pour avoir une bonne qualité d'image et de son, mais suffisantes pour prendre le contrôle. Par contre la latence est bonne. Toutefois les valeurs ne sont pas considérablement différentes de celles mesurées en Nouvelle-Zélande, rapportées à l'échelle humaine. (Un clignement d'œil dure environ de 100 ms à 150 ms). Quand la qualité de communication se dégrade, la vitesse de déplacement du robot diminue. Lorsqu'elle est vraiment mauvaise ou que la liaison est interrompue, le robot s'arrête et il demeure immobile là où il est, jusqu'à la reprise du contrôle. Le robot ne porte pas sur lui de pupitre de commande, pas d'arrêt d'urgence, pas de véritable poignée permettant de le déplacer facilement. Parallèlement à ces expériences nous avons fait des pings ICMP entre l'ordinateur de contrôle et le routeur wifi auquel le robot était connecté. Les valeurs de la latence

étaient inférieures mais pas tellement. Il est probable que les données passaient par le fournisseur d'accès jusqu'au point de connexion avec Renater qui devait être à Paris, pour revenir après à Brest. Mais cela ne peut expliquer qu'une faible partie de la latence.

Depuis le Beam+ a été installé dans une maison particulière de Brest disposant d'une connexion par fibre optique (FTTH). Des expériences sont menées avec différentes personnes à des distances variables. Le plus éloigné est un ingénieur de recherche de l'université de Nouvelle-Calédonie, Monsieur Thomas Quiniou. Les tests ont montré que lorsque la connexion de domicile à domicile s'établissait, le contrôle était fluide, avec une latence de l'ordre de 400 ms, et des débits entre 100 et 1000 kbits/s. La figure 5 est extraite d'une copie d'écran opérée lors de l'essai du 26 janvier 2017 effectué depuis son domicile situé à Nouméa via une connexion ADSL jusqu'au domicile brestois.










Bande passante entrante		656 Kbits/s	(> 500 Kbits/s requis)
Bande passante sortante		757 Kbits/s	(> 500 Kbits/s requis)
Latence (ping)		432 ms	(< 300 ms requis)
Perte de paquets entrants		0,0 %	(< 2 % requis)
Perte de paquets sortants		0,0 %	(< 2 % requis)
Images par seconde de la caméra avant		30 ips	
Images par seconde de la caméra de navigation		30 ips	
Images par seconde de votre caméra		30 ips	
Interfaces du Beam		WiFi #1	
Interface active du Beam		SSID : Livebox-EA78_5G (5200 MHz, can. 40)	
Type de connexion		Relais	
Traversée NAT		STUN, relais	
Heure		jeudi 26 janvier 2017 18:27:22	Pacifique Centre

Figure 5 : le panneau d'état lors du contrôle à distance de Nouméa à Brest

La comparaison entre le précédent essai et celui-ci effectué entre deux points 3000 fois plus distants, montre que la latence et les bandes passantes sont aujourd'hui peu dépendantes de la distance géographique. Sur la figure 5 il apparaît que les pics de latence correspondent à des diminutions de bande passante. Nos séries d'expériences ont montré qu'il s'agit d'un équipement offrant une bonne qualité de l'expérience (QoE), mais présentant des dysfonctionnements gênants qui rendent hélas impossible son utilisation dans un cadre d'assistance aux personnes dépendantes isolées.

Nous sommes donc arrivés à l'époque charnière à partir de laquelle la commande à distance de machines pourrait être faite partout dans le monde. Mais pas à n'importe quel moment, car dans les expériences menées en Nouvelle-Zélande il y a eu des insuccès à partir du même endroit et dans les mêmes conditions selon l'heure à laquelle la connexion a été tentée. En Nouvelle-Calédonie en fin 2015 il y avait des moments de la journée où toute connexion vers la métropole était impossible, typiquement tous les soirs entre 20h et minuit heure locale. Quant aux traces des RTT des mesures faites en Nouvelle-Calédonie, quand les expériences ont réussi, donnent des résultats similaires à ceux obtenus en Nouvelle-Zélande, à la différence que les paquets les plus rapides mettent suivant l'endroit entre 50 ms de plus jusqu'à 100ms de plus que depuis la Nouvelle Zélande, alors que les câbles sous-marins dans les deux cas font transiter les données par Sydney qui est à une distance équivalente de ces deux archipels, environ 2000 km. Il semble donc que des efforts sont faits pour les villes importantes comme Auckland (1,5 million d'habitants, soit 15 fois plus qu'à Nouméa), où il y a des bourses des valeurs et de nombreuses transactions commerciales, pour réduire les délais de transmission. Il est donc nécessaire d'étudier scientifiquement les prévisions de délais, de façon à pouvoir anticiper les situations de contrôle difficile ou impossible, exactement comme nous évitons autant que faire se peut, de voyager pendant les heures de pointe.

## 4.2 Prévision des délais de communication

Les outils actuellement à notre disposition ne permettent pas directement de savoir quelles sont les causes des délais. Lorsqu'on commande à grande distance des machines on constate que la connexion

est difficile ou impossible aux heures où le réseau est chargé d'un des deux côtés ou des deux côtés à la fois, selon les rythmes de travail des populations alentour. Cela signifie que la charge du réseau Internet est grandement induite par l'activité humaine. Si c'est le cas on devrait pouvoir employer les méthodes de prévision mises au point pour les transports, à base de moyennes glissantes, et d'analyses statistiques des variations saisonnières et quotidiennes. Mais ces méthodes ne peuvent pas donner de bons résultats lorsqu'il y a une coupure physique, ou une panne majeure d'un équipement situé à un nœud du réseau. Tout au plus si la panne est précédée par des signes précurseurs, on pourrait peut-être les détecter.

Actuellement nous travaillons de concert avec des chercheurs du laboratoire Laresi d'Oran (Algérie) qui appliquent la méthode d'Holt-Winters de variation saisonnière. De plus amples informations sur la façon de la mettre en œuvre et les résultats obtenus, sont disponibles dans l'article cité en référence [10]. La figure 6 montre un résultat obtenu pour un test de pings successifs espacés de 2 secondes entre des ordinateurs situés chacun dans nos deux universités respectives. La corrélation entre le RTT prédit et celui mesuré est bonne. Toutefois nous ne savons pas encore établir en temps réel une prédiction des valeurs futures, et leurs tendances.

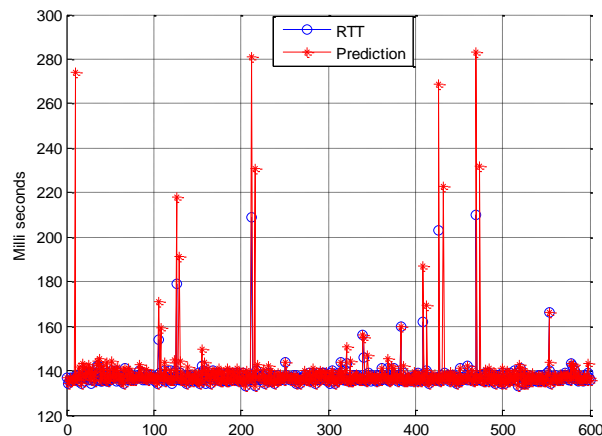


Figure 6 : prédiction des RTT par la méthode de Holt-Winters entre l'USTO (Algérie) et l'UBO (France) [10]

Dans le paragraphe précédent nous avons vu qu'il en était de même pour le robot Beam+, il n'y a pas à notre connaissance aujourd'hui de système permettant de prévoir si le contrôle sera possible à un horizon temporel court.

## 5 Sécurisation

### 5.1 Sécurisation des plates-formes industrielles

Il est fréquent d'entendre qu'une action en justice est intentée par des utilisateurs mécontents contre les fabricants de tel ou tel autre matériel à cause de la faible protection de leurs systèmes, qui ont laissé la porte ouverte à des intrus malveillants. Même le minitel fut accusé en son temps.

La sécurisation du système consiste à le préserver des atteintes extérieures, qu'elles soient physiques ou informationnelles. Il s'agit d'un travail de recherche qui n'a commencé au sein de notre équipe que très récemment. La sécurisation des plates-formes industrielles de production est un travail essentiel à effectuer dans le cadre du projet Industrie 4.0.

Citons le cas de l'usine Safran du Creusot qui fabrique des pièces de rotor de réacteurs d'avion. La chaîne de production flexible a été installée en 1987 et elle fonctionne depuis avec un rendement croissant. Bien que flexible, en réalité elle produit à peu près toujours les mêmes pièces sur des



machines similaires utilisant des outils identiques. Néanmoins le système d'ordonnancement de la production et de gestion écrit au milieu des années 1980 est toujours fonctionnel, et il est toujours exécuté sur des machines Vax (DEC) qui ne sont plus fabriquées depuis longtemps, et dont le système d'exploitation VMS devenu OpenVMS a connu sa dernière mise à jour en 2012. Le remplacement des équipements est assuré par des équipements de substitution conservés en stock, qui ont été rachetés au gré des opportunités. S'il fallait changer toute l'infrastructure informatique, les logiciels, il faudrait interrompre la production pendant un temps indéterminé. L'usine fonctionne à plein et le carnet de commande des avionneurs est rempli pour un grand nombre d'années. Les motoristes et les équipementiers ont des difficultés pour livrer à temps les quantités demandées. Actuellement l'usine s'étend et de nouvelles machines sont acquises pour de nouvelles productions. Or dans cet atelier les nouvelles techniques de contrôle des machines seront mises en œuvre. Un employé chargé de la maintenance pourra accéder aux données dont il a besoin depuis une tablette ou un smartphone qu'il transportera sur lui.

Mais le fait d'utiliser un appareil sans fil dont le rayonnement peut franchir les limites de l'usine et qui peut recevoir des données émises depuis l'extérieur pose de nouveaux problèmes, comme la sécurisation des données qui circulent, la détection d'intrusion, les problèmes de mise à jour, d'obsolescence des systèmes d'exploitation des smartdevices, etc.

Comme nous l'avons vu plus haut le simple fait que des éditeurs de navigateurs abandonnent le plugin java oblige les personnes ayant développé des applets à les réécrire. Par exemple c'est le cas du logiciel de CAO Catia V5 de 3DS, dont l'aide fait appel à des applets. Suivant le navigateur Web utilisé et sa gestion de la sécurité, sur un même ordinateur on peut encore consulter la recherche dans l'aide ou on ne peut plus le faire.

Dans le cas du Beam+ la société a choisi une solution de client lourd, sauf sur les tablettes et smartphones utilisant le système d'exploitation Android et le navigateur Chrome. Pour ceux là l'interface a été réécrite comme extension du navigateur. Dès lors pour un particulier ou un industriel se pose la question de la pérennité d'une telle solution.

Il est évident que la découverte du ver malveillant Stuxnet découvert en 2010 qui s'est propagé sur des cartes mémoires entre des automates programmables, a montré la vulnérabilité des équipements industriels. En mai 2017 le logiciel malveillant WannaCrypt a paralysé des usines de production Renault et Honda, et désorganisé le système de soins britannique.

Pour pouvoir étudier ces problèmes le Lab-STICC déploie deux plates-formes différentes. L'une, dans le cadre du projet Cyber-SSI, sera à l'UBO. Il s'agit de systèmes automatisés dont l'un a un bras manipulateur et un convoyeur. L'ensemble est schématisé sur la figure 7. L'autre est une plate-forme « Industrie 4.0 » beaucoup plus grande, elle est installée dans un espace de 400 m<sup>2</sup> environ à l'ENSIBS de Lorient voir figure 8. Sur la droite de l'image se trouve un convoyeur formant 3 côtés d'un rectangle qui part et revient à un magasin, il dessert différents postes de travail. Devant le poteau se trouve un robot Baxter qui peut être utilisé dans un mode cobot, c'est-à-dire en présence de personnes travaillant juste à côté, sans interposer de paroi de protection entre les deux. Ce robot a deux bras manipulateurs et exécute des actions sur la matière d'œuvre qui circule sur le convoyeur qui passe devant lui, et un poste fixe le jouxtant. Parmi les questions à étudier il faut se demander s'il est possible de créer une zone protégée en entourant de façon numérique les systèmes SCADA pour contrôler tous les accès ?

Si l'on admet qu'il n'est pas possible d'éviter toute panne et toutes les intrusions, comment y faire face et maintenir la production ? En utilisant des systèmes redondants ? En répliquant les logiciels et les systèmes d'exploitation sur des mémoires amovibles bootables ? En utilisant des machines virtuelles déployées rapidement ?

Un autre problème est la maintenance, en particulier les mises à jour et l'adjonction de logiciels de sécurisation et de protection comme les anti-virus. Au fil du temps ils réclament de plus en plus de

ressources et ralentissent les machines qui contrôlent les processus. La tentation est grande d'empêcher les mises à jour. Mais alors la vulnérabilité du système augmente au fil des jours.

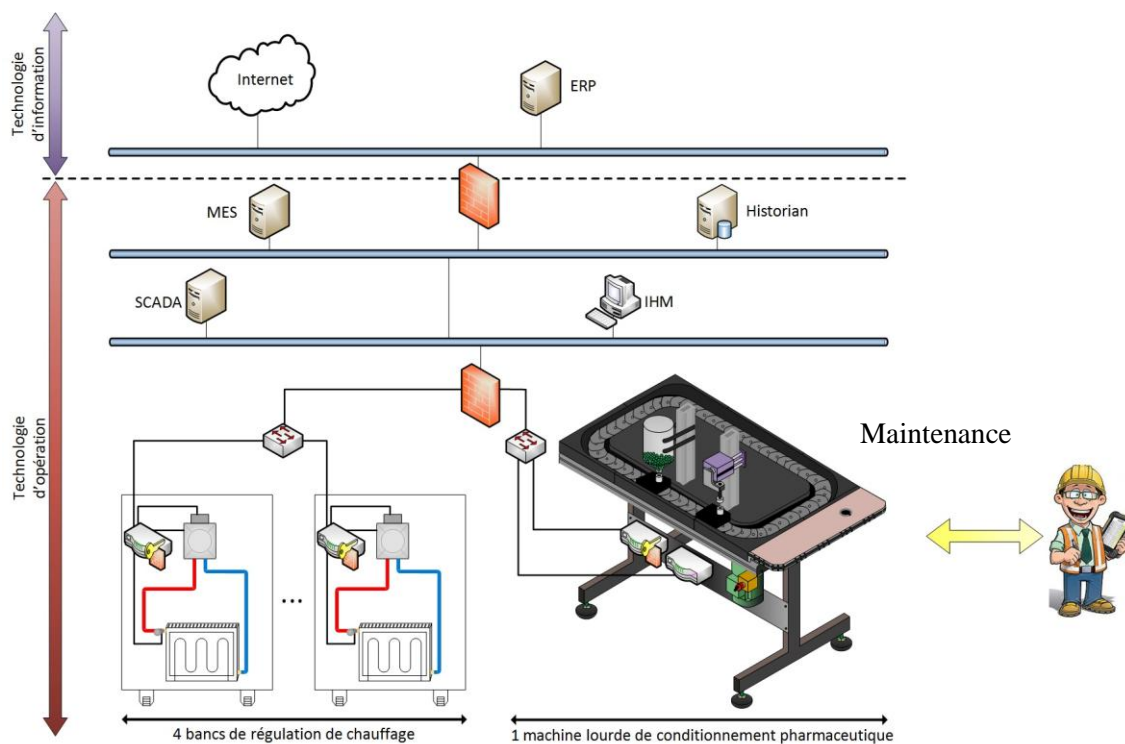


Figure 7 : Plate-forme Cyber-SSI UBO Lab-STICC



Figure 8 : plate-forme Industrie 4.0 ENSIBS & Lab-STICC à Lorient

D'autre part les téléchargements des fichiers de mise à jour volumineux surchargent le réseau. Il faut donc le surdimensionner. Ou bien il est nécessaire de mettre en place des plannings des mises à jour, de façon à éliminer les engorgements, réduire les ralentissements et les indisponibilités.

## 5.2 Sécurisation des applications domestiques

La sécurisation des applications domestiques des robots d'assistance de surveillance et de loisirs est un travail essentiel dans la future civilisation de la téléprésence. Il y a des points communs avec les problématiques industrielles comme l'authentification des données et de leurs sources. Une des techniques possibles est le tatouage d'images. Il est à noter que notre équipe a réalisé quelques travaux dans ce domaine au cours des années antérieures [11]. Dans le cas des usages privés il y a le problème de la confidentialité des données médicales, et de la préservation de l'intimité personnelle. Des robots mobiles portant une caméra sont mieux supportés que des caméras fixes appliquées sur les murs. Toutefois de nombreux systèmes d'alarme de maisons individuelles ont des caméras fixes braquées sur les espaces de vie. Les gens les supportent et finissent par les oublier. Or rien n'indique que les accès à ces caméras ne peuvent pas être détournés. Aujourd'hui la plupart possèdent des volets d'occultation mais ceux-ci sont manuels, alors que les caméras sont placées souvent à des endroits inaccessibles sans échelle.

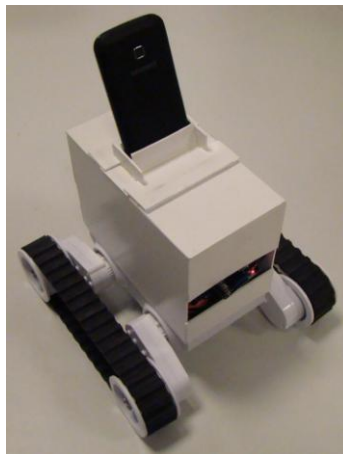


Figure 9 : Exemple de robot monté à partir de composants standards au Lab-STICC, équipe IRIS, UBO, 2014.

Dans le cas du robot Beam+ l'architecture logicielle de l'authentification et de la prise de contrôle est décrite dans la documentation. Il apparaît que le robot ne peut pas être mis en œuvre s'il n'est pas connecté à Internet et n'a pas reçu après identification une validation émise par la société Suitable Technologies®, relayée par l'intermédiaire de l'info-nuage d'Amazon. Cela fonctionne un peu comme un serveur de licence. Le résultat est que si le robot est déployé pour maintenir le contact entre deux personnes qui sont dans le même bâtiment, l'une dans une chambre stérile par exemple, l'autre dans un service de maladies infectieuses, et qu'il y a une panne d'Internet, il ne sera pas possible d'utiliser le robot, bien qu'étant en parfait état. L'architecture choisie rend dépendant de validations délivrées par des serveurs situés sur la côte ouest des USA. Or un jour de 2016 il y a eu une attaque de déni de service (DoS) contre l'info-nuage qui relayait les validations, du coup tous les robots Beam+ de la terre sont devenus temporairement inutilisables. D'autre part leur architecture laisse à penser que les images captées par les caméras pourraient être envoyées vers des destinations non souhaitées par les utilisateurs.



Comme nous sommes convaincus que malgré tous ces écueils la robotique domestique va se développer à grande échelle, nous avons par ailleurs travaillé sur l'assemblage de robots mobiles à partir de composants standards du commerce. Il apparaît qu'il est possible à une personne compétente d'en intégrer en achetant les éléments séparément pour un coût total d'un robot jouet.

L'avantage pour la personne qui fait cela est que le robot est beaucoup plus modulable et qu'il pourra avoir une durée de vie nettement plus grande. La figure 9 présente un des robots assemblés [12]

## 6 Synthèse

Notre article présente l'articulation entre des travaux passés, effectués bien avant qu'apparaisse la thématique Industrie 4.0, et de nouveaux travaux qui débute actuellement sur la sûreté, la résilience et la sécurité des systèmes de production. Ils sont incontournables pour atteindre les objectifs visés par le thème Industrie 4.0.

Dans le tableau 1 nous résumons les différents éléments présentés ici. Compte tenu de la vitesse de propagation des informations dans le réseau physique, avec les technologies actuelles les temps de boucle ne peuvent plus que décroître de moitié au maximum, dans le cas des contrôles à très grande distance. La zone géographique maximale dans laquelle les téléopérations avec retour d'effort seraient possibles dépasserait l'hémisphère à partir du point où se situe le dispositif à contrôler. Il s'agit d'une situation nouvelle où toute l'humanité va se retrouver dans une proximité temporelle voisine de la moitié d'une seconde aller-retour.

Cependant si les technologies requises pour le contrôle à très grande distance de machines de production existent, elles ne sont malheureusement pas encore prêtes à l'emploi.

On voit dans le tableau qu'il y a de nombreuses cases qui correspondent à des choses faisables, mais pas encore réalisées. Certaines correspondent à de l'ingénierie, d'autres nécessitent des études scientifiques et la création de nouveaux modèles théoriques. Pour la plupart il en résultera des intergiciels, dont l'activité fournira des informations affichées sur les écrans de contrôle, réactualisées en continu. Une grande partie des travaux devront être réalisés par des équipes pluridisciplinaires. La présence en France du réseau AIP-Priméca dont les pôles sont bien équipés et de plates-formes comme celles du Lab-STICC pourrait permettre de tester à grande échelle de nouveaux outils.

La téléproductique est devenue d'actualité, elle donnera lieu à des travaux de recherche nombreux, à l'instar de la téléphonie.

## 7 Conclusion

Monsieur Bruno Bonnell directeur de la société Awabot qui commercialise les robots Beam+ communique beaucoup sur la « robolution », mot qu'il a construit par association des mots révolution et robotique. Nos expériences nous incitent à penser que nous sommes au seuil de la civilisation de la téléprésence. Il s'agit d'un moment qui pourrait être qualifié de kairos, mot grec qui désigne les moments opportuns, où le présent peut basculer vers un futur parmi plusieurs possibles, selon les décisions prises. Si l'intérêt de la téléprésence est facilement compréhensible dans le cas de l'éloignement sur la planète Terre, il concerne aussi l'éloignement dans l'espace proche.

Nous pensons que le temps est arrivé d'établir un cahier des charges idéal d'un contrôle à grande distance sûr et sécurisé. Pour que la commande à grande distance se développe il faut pouvoir prévoir les moments où elle sera possible et ceux où elle ne le sera pas. Par conséquent il est nécessaire de travailler sur la prévision de la qualité de communication, en recherchant les méthodes adaptées afin d'avoir au moins un horizon de prédiction suffisant, à l'échelle du temps nécessaire à la prise de décision.

\ quantification par catégorie critères de performance \	besoins en téléopération avec retour d'effort	besoins en contrôle coordonné industriel	besoins en assistance à la dépendance	commentaire	proposition
Temps de boucle RTT	< 200 ms	de 500ms à 2s suivant le cas	< 500 ms	< 450ms faisable	À afficher en continu avec actualisation dans l'IHM de Contrôle
Bande passante montante	> 10 kbits/s	> 10 kbits/s	> 256 kbits/s	faisable	
Bande passante descendante	> 256 kbits/s	> 256 kbits/s	> 256 kbits/s	faisable	
% de Perte de paquets	< 1%	< 2%	< 2%	faisable	
Horizon de prévision de QoS	la durée de l'opération	une journée de travail	1h	à faire	
(A)symétrie (débits)	asymétrique	asymétrique	symétrique	asymétrie	contractuelle
MTBF	> 6 mois	> 6 mois	> 1 an	à étudier	à quantifier
MTTR	<<Durée de l'opération	<<Journée de travail	< 1h	à étudier	à quantifier
QoE qualité de l'expérience	supérieure à l'action directe	égale ou supérieure au contrôle en présence	supérieure à un appel téléphonique	à étudier	à quantifier, en particulier l'acceptabilité
Priorité du son ou de l'image	image	image	son	son le plus souvent	à choisir dans l'IHM
Mobilité	utile	inutile	préférable	faisable	à améliorer
Capacité d'agir	indispensable	indispensable	À définir	faisable	à améliorer
Fiabilité	égale ou supérieure à l'action directe	égale ou supérieure à l'action sur le pupitre dans l'atelier	égale ou supérieure à la téléphonie	faisable	à améliorer et à évaluer
Sûreté	taux de	défaillance	< ou égal	à étudier	à évaluer
Sécurité	pare-feu, antivirus, calendrier de mise à jour encryptage	pare-feu, antivirus, calendrier de mise à jour encryptage	pare-feu, antivirus, calendrier de mise à jour encryptage	à étudier, en fonction du taux de disponibilité	à améliorer continuellement, et à afficher dans l'IHM

Tableau 1 : synthèse des différents aspects abordés, qui reflète les opinions des auteurs.

Un des problèmes de la civilisation de la téléprésence est l'acceptabilité par les personnes. Il s'agit d'un pan du problème sur lequel nous envisageons d'échanger avec l'équipe du professeur Franck Ganier, spécialiste de la cognition au sein du lab-STICC.

La téléprésence aura des conséquences sociales : le télétravail bien sûr, mais aussi l'envie d'être souvent ailleurs plutôt que là où on se trouve.

Le lancement des projets Industrie 4.0 et usine du futur montrent que le monde manufacturier considère également la triple accélération décrite par Thomas Friedman dans son livre « merci d'être

en retard » comme une transition majeure vers de nouvelles organisations de la production et de la société.

## Remerciements

Nous remercions la direction de l'usine Safran du Creusot de nous avoir fait visiter ses ateliers et répondu à nos questions.

Nous remercions Monsieur Thomas Quiniou pour sa patience, son aide, et ses suggestions.

## Références

- [1] P. Ogor, Une architecture générique pour la supervision sûre à distance de machines de production avec Internet, PhD thesis, Université de Bretagne Occidentale, 2001.
- [2] K. Taylor and J. Trevelyan, A telerobot on the world wide web, 1995 National Conference of the Australian Robot Association, 5-7 juillet 1995.
- [3] M. R. Stein, Painting on the World Wide Web : the Pumapaint project, Proceeding of the IEEE IROS'98 Workshop on Robots on the Web, Victoria, Canada, October 1998.
- [4] K. Goldberg, S. Gentner, C. Sutter, and J. Wiegley, The Mercury project: a feasibility study for Internet robotics, IEEE Robotics & Automation Magazine, pages 35—40 1999
- [5] S. Otmane, M. Mallem, A. Kheddar, and F. Chavand. Anti : an augmented reality interface for teleoperation on the Internet, Advanced Simulation Technologies Conference 2000 "High Performance Computing" HPC 2000, pages 254-261, Wyndham City Center Hotel, Washington, D.C., USA, April 2000.
- [6] P. Saucy and F. Mondada, Khep on the web: One year of access to a mobile robot on the internet, In IEEE International Conference On Intelligent Robots and Systems (IROS): Workshop on Web Robots, 1998.
- [7] R. Oboe and P. Fiorini, Issues on internet-based teleoperation, in Syroco 97, pages 611--617, Nantes, France, 1997.
- [8] FIM, Usine du futur, <http://industriedufutur.fim.net/> pages web de la Fédération des Industries Mécaniques, 2015.
- [9] Z. Shengtong, P. Le Parc, J. Vareille, Internet-based teleoperation: A case study - toward delay approximation and speed limit module, ICINCO 2007, Proceedings of the Fourth International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Robotics and Automation, May 2007, Angers, France. pp.267-270.
- [10] M. Mostefa, L. Kaddour El Boudadi, J. Vareille, Safe and efficient mobile robot teleoperation via a network with communication delay, International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), Online First Article, Springer, 2017.
- [11] Laouamer L, A. Benhocine A, Nana L et Pascu A. Motion JPEG Video Authentication based on Quantization Matrix Watermarking: Application in Robotics. International Journal of Computer, Applications (IJCA), Foundation of Computer Science, New York, USA. Vol. 47, N°24, Pages 1-5, Juin 2012.
- [12] J. Vareille, D. Espes, Y. Autret, P. Le Parc, Low-Cost High-Tech Robotics for Ambient Assisted Living: From Experiments to a Methodology, Journal of Intelligent Systems, 2015, 25 (4), pp.455 - 471.