

## **Pilotage à distance de systèmes automatisés et robotisés - problèmes posés et solutions envisagées**

**Conférence invitée** de Serge MONCHAUD Dr Sc., Professeur des Universités Insa de Rennes (F) - Titulaire de la Chaire Unesco/Réseau Unitwin RENED (Régional Network Engineering for Development et des autres membres de la chaire et du réseau. Messagerie électronique: serge.monchaud@insa-rennes.fr (en France) et smonch@tu-sofia.bg (en Bulgarie)

**Colaboration** Gabriel VLADUT, chercheur scientifique, IPA CIFATT Craiova, Romania, Messagerie électronique: office@ipacv.ro

### **Résumé :**

L'introduction massive des applications liées à l'Internet, aux techniques multimédia ces dix dernières années est associée à une globalisation de l'économie mondiale. Elles ont mis en valeur la problématique du pilotage à distance de systèmes industriels plus ou moins complexes.

Le pilotage à distance de systèmes automatiques a été introduit très tôt dans les domaines d'applications hostiles à l'homme (espace, domaine sous-marin, nucléaire etc.) ou en situation de catastrophes naturelles et de dangers pour l'homme ; sans oublier le militaire (missiles, avion sans pilote etc. ...).

Les acquis technologiques obtenus alors sont très importants mais leur coût financier en limite l'impact dans le secteur civil dit « du grand public » sans oublier le secret qui entoure , la plupart du temps les recherches ainsi effectuées.

Notre problématique est différente.

Dans notre cas la fonction pilotage à distance s'intègre dans un paysage où l'homme reste l'acteur principal. Elle vise simplement à utiliser les capacités humaines et matérielles où elles se trouvent en limitant voire en supprimant les déplacements des uns vers les autres. Ces déplacements inutiles et coûteux sont ainsi réduits au minimum.

On favorise un aménagement plus harmonieux des territoires.

Les avantages sont multiples mais les inconvénients et difficultés nouvelles ainsi créés ne le sont pas moins.

Tout d'abord il reste à s'assurer que le lien électronique tissé par Internet est aussi fiable et moins coûteux que les déplacements traditionnels assurant la proximité physique évoquée précédemment. Le développement exponentiel de la toile Internet nous invite à répondre par l'affirmative à la question précédente. Son utilisation équilibrée et harmonieuse est loin d'être assurée. La sûreté de fonctionnement

d'équipements distants représente une difficulté majeure pour des applications civiles où les liens sont partagés par des utilisateurs qui n'ont aucun point commun.

Certains grands utilisateurs pensent résoudre ce problème en transformant Internet en une somme de réseaux intranet plus ou moins planétaires.

La sécurité devrait être obtenue en segmentant les utilisateurs potentiels.

Cette dérive, si elle se confirmait, serait contraire au principe même qui a présidé à la création d'Internet et qui assure depuis le développement exponentiel de la toile ,véritable système nerveux d'une nouvelle économie mondiale.

Notre approche vise à protéger l'auto développement de la toile Internet en acceptant les fragilités qui en découlent au niveau de la sûreté de fonctionnement. Cette dernière est assurée aux niveaux des sites utilisateurs distants en renforçant les procédures d'utilisation.

Ceci n'est pas nouveau, les automaticiens des années 60 ont bien pu rendre fiable des automatismes industriels complexes en prenant en compte les fragilités de telle ou telle boucle d'asservissements, les retards mal connus etc...

Notre approche n'est qu'une généralisation de cette démarche où la boucle de pilotage s'étend au niveau de la planète.

### **1. Introduction**

Une des applications les plus motivantes pour moi est l'enseignement à distance pour diffuser le savoir dans un public de plus en plus large, en particulier en permettant l'utilisation de gros équipements par delà les frontières. D'autres applications existent dans un contexte purement industriel, il s'agit de la maintenance à distance baptisée « tele - maintenance » ou de la « tele-supervision » de machines ou de processus industriels [1]. Chacun de ces différents domaines

a ses caractéristiques d'utilisations et ses contraintes.

Une des contraintes la plus importante concerne la sécurité des communications.

Habituellement un système automatique intègre des capteurs et des actionneurs (partie opérative), liés entre eux par des unités de calcul (partie commande). Grâce à l'accès universel permis par le réseau Internet nous avons la possibilité d'externaliser tout ou partie de ces fonctions de contrôle et de commande de systèmes automatisés. Mais en même temps cela oblige l'intégration de systèmes de sécurité complexes au fur et à mesure que le nombre d'utilisateurs potentiels s'accroît.

Les manipulations à distance sont bien connues depuis les premières structures robotisées baptisées « maître-esclave » d'abord dans le domaine des applications nucléaires dans les années 1950 puis, plus récemment dans le domaine des applications sous marines ou spatiales.

L'introduction du réseau Internet représente-t-elle un changement mineur ou majeur pour ce type d'applications ?

Notons tout d'abord que, compte tenu du niveau de service dispensé par Internet, il n'est pas le meilleur outil pour lier des capteurs et des actionneurs entre eux. Cependant Internet représente une alternative acceptable comparée à des protocoles de communications de niveau supérieur. La pénétration d'Internet dans l'architecture des systèmes de contrôle industriel amène plusieurs avantages incontestables. Bénéfice économique tout d'abord – diminution du nombre d'interventions humaines sur site réel et leur remplacement par des visites virtuelles – augmentation du confort des opérateurs de processus industriels longs et dangereux en limitant leurs « heures d'abstraites » et en les remplaçant par de la « télé-surveillance » - accès à distance réelle de processus automatisés et robotisés coûteux pour des tâches de formation de personnels ou d'étudiants et élèves etc.

## **2 – Évaluation des plateformes disponibles sur le réseau Internet (sites WEB)**

On admet que le « Trojan Room Coffee Pot » de l'Université de Cambridge (GB) a été le premier exemple au monde d'une application caméra sur le Web ou « webcam ». Ensuite le projet « Mercury » développé par Ken Goldberg à l'Université de Berkeley (USA) est considéré

comme la première application réelle d'un contrôle à distance intégrant Internet.

Il s'agissait d'un robot équipé d'un bras pneumatique et d'une webcam et qui cherchait des objets enfouis dans du sable. L'accès libre à cette plateforme fut possible d'août 1994 jusqu'à mars 1995 et plus de 50.000 visites furent enregistrées. Cette étude réussie a constitué la première preuve réelle que ce type d'application pouvait fonctionner correctement. Le même groupe de chercheurs proposa le fameux « telegarden ». L'objectif est de proposer aux utilisateurs distants de créer et d'entretenir un jardin collectivement. Ce type de contrôle collectif a été repris dans la plateforme « ouija » [2]

Le Telerobot australien (<http://telerobot.mech.uwa.edu.au>) est contemporain du robot mercury. Lui aussi associe un bras manipulateur et une caméra (webcam). L'objectif est de faire réaliser un assemblage de cubes par un utilisateur distant.

Cette plateforme a permis l'étude du comportement des utilisateurs distants lorsqu'ils font face à des retards ou à des files d'attente de plus en plus créateurs ont intégré, au fur et à mesure des disponibilités des outils logiciels augmentant l'ergonomie et la simplicité de l'interface utilisateur. Plus tard en Suisse à l'École Polytechnique de Lausanne l'équipe du professeur Nicoud du LAMI mis à disposition sur le Web la plateforme « KhepOnTheWeb » [3]. C'est, à notre connaissance, le premier exemple de mise à disposition sur le Web d'un mobile robotisé. Dans les 3 cas précédents, le logiciel reposait sur un serveur Web supportant des scripts CGI. L'introduction d'un robot mobile augmente la complexité et la diversité des situations contrôlées à distance.

Dans cette catégorie il faut aussi citer les robots mobiles Rhino et Xavier. Rhino destiné à offrir des visites virtuelles du « deutsche museum » de Bonn (Allemagne) et Xavier qui fut la première application de pilotage distant sur le Web d'un robot mobile évoluant dans un espace peuplé d'humains [4]. Le projet Puma-Paint (<http://yugo.mme.wikles.edu/villanov>) est un site ouvert au public en 1998. Il propose le contrôle d'un bras manipulateur pour réaliser une peinture à distance. L'intérêt de cette dernière application par rapport aux précédentes vient qu'on se fixe l'objectif de réaliser un objet unique et concret (un dessin) à distance. L'œuvre ainsi réalisée est

expédiée par courrier à l'auteur. La plateforme ARITI de l'Université d'Evry en région parisienne est basée sur jonction entre réalité virtuelle et réalité augmentée par l'ajout de blocks programmes choisis par l'utilisateur distant dans une bibliothèque.

Cela constitue un essai pour surmonter le caractère pénalisant de tous les pilotage à distance. En ajoutant cette aide à l'opérateur distant, on augmente sa capacité à bien réaliser ses objectifs ce qui constitue en fin de compte le but final.

En faisant appel à quelques moteurs de recherche sur Internet tel que Yahoo ([http://dir.yahoo.com/computer\\_internet/internet/devices\\_connected](http://dir.yahoo.com/computer_internet/internet/devices_connected)) to the Internet, il est possible de localiser de nombreux autres sites plus récents en en fonctionnement.

On peut évaluer ces plateformes au crible de plusieurs critères simples :

- l'utilisation de ce type de système permet il de produire de la valeur ajoutée ?
- la sûreté en fonction du comportement du réseau est elle assurée ?
- l'application est elle portable (au sens informatique du terme) ?
- la gestion multi utilisateurs est elle assurée ?

Nous retiendrons de l'examen précédent qu'aucune plateforme, existant sur le Web, ne répond positivement à l'ensemble de ces 4 critères.

Cette absence rend impossible toute utilisation manufacturière en particulier en ce qui concerne l'indispensable sûreté en proposant une application qui soit tolérante aux défaillances pouvant apparaître sur un média de communication tel Internet. La sûreté doit se baser sur des principes dégagés du contrôle commande de systèmes automatisés de production (S.A.P) qui assure un contrôle sûr (au sens industriel du terme).

### **3 – Propositions d'outils et de méthodes :**

La supervision des SAPs par Internet suppose que :

- la communication entre sites distants au travers d'un réseau de communication sans réelle qualité de service est possible.
- la détection et la gestion des défaillances dues au réseau seront assurées

De plus il sera possible de spécifier plusieurs comportements sûrs pour les SPAs en fonction des défaillances rencontrées.

### **3-1 – au niveau du protocole de communication :**

Une messagerie industrielle est un protocole d'application qui permet des équipements industriels de communiquer les uns avec les autres. MMS (Manufacturing Message Specification) est une messagerie standardisée au niveau international (ISO 9056). Une caractéristique clé de MMS est le VMD (Virtual Manufacturing Device). Ce VMD contient un ensemble d'abstractions (baptisées Objets MMS). Chacun étant associé une entité réelle de l'outil industriel. Lors de sa création MMS a été prévue pour assurer la communication entre des systèmes hétérogènes au sein d'une même usine. MMS repose donc sur l'utilisation de réseaux industriels. Le protocole TCP/IP d'Internet tend à s'imposer comme standard de facto. La conception d'un mixe MMS/TCP-IP semble présenter un intérêt certain. Plusieurs propositions s'affrontent

Il s'agit de OPC (OLE for Process Control) fruit d'une collaboration entre Microsoft et certains industriels de l'automatisation (logiciel et matériel), il ne peut répondre à nos 4 critères de sélection. OSACA (Open System Architecture for Controls within Automation system). Comme dans le cas précédent OSACA se base sur la communication par objet et ne peut prendre réellement en compte la gestion des défaillances réseau que nous recherchons. Il faudra donc concevoir un outil « complémentaire de bas niveau » afin de pouvoir l'implanter facilement chez des utilisateurs nombreux et variés disposant de plateformes non spécifiques.

### **3-2 au niveau des systèmes autonomes et des architectures génériques**

Nous retiendrons les systèmes mobiles autonomes par leur caractère plus général que les machines outils et les bras manipulateurs.

E.Le Rest a proposé une étude bibliographique des principaux travaux effectués sur les architectures de contrôles de robots mobiles [5].

Il distingue 3 structures

- la boucle de contrôle – l'organisation en couches et enfin l'invocation implicite.

L'architecture WTA (Web –based Teleoperation Architecture) intégrant le paradigme MVC

(Model – View – Controller) semble être une bonne base de départ pour la création d'une architecture générique.

### **3-3 au niveau de la qualité de communication :**

Un réflexe très répandu est de considérer Internet comme incapable d'être inclus dans une boucle de contrôle et seulement comme un bon outil de diffusion de l'information. Certes les créateurs d'Internet ont choisi un seul niveau de qualité de service dit service au mieux ou « best effort ».

Dans ce cas toutes les données sont traitées à égalité.

Dans la télé-opération on ne peut admettre l'apparition de retards dus à des goulots d'étranglements, congestion du réseau sur certaines branches etc.....

Deux stratégies s'opposent en matière de contrôle à distance – le contrôle direct et la supervision. Le premier est plus sensible que le second à la perte de qualité de la communication (baptisée « gigue ») qui est source d'instabilité dans l'automatisme.

### **3-4 au niveau du contrôle – commande et sûreté de fonctionnement :**

Depuis longtemps ce domaine a été étudié – plusieurs langages de programmation des SAPs ont été proposés – parmi eux on note le langage Grafset et sa modélisation en langage synchrone pour le pilotage des robots (langages Signal ou Lustre par exemple).

Les modes de Marche et d'Arrêt qui représentent les phases possibles de fonctionnement d'un SAP ont été aussi codifiés par exemple Le Gemma (Guide d'Etudes des Modes de Marches et d'Arrêts) proposé par l'Adepa en France (Agence nationale pour le Développement de la Production Appliquée à l'Industrie).

Les 3 actions permettant la réalisation d'une architecture générique pour la supervision sûre des SAP sont la communication – la détection et la spécification. Cela a permis de retenir les concepts informatiques : MOM (Message oriented middleware), MVC (Model View Controller) etc....., et le concept de productique tel que le GEMMA.

Des capteurs réseaux devront être intégrés pour qualifier en permanence la qualité de communication du réseau Internet utilisé entre le système local et le système distant.

## **4 – Quelques exemples de réalisations : tests**

Pascal Ogor de l'équipe Limi de l'Université de Bretagne Occidentale (France) propose les solutions suivantes [6]

### **4-1 Evaluation de l'état du SAP connecté au réseau Internet :**

Pour cela on introduit le Gemma Q (Q pour qualité). Il s'agit d'ajouter la dimension contrôle de la qualité de la communication aux deux autres dimensions classiques du Gemma que sont le contrôle des interactions avec les utilisateurs et le contrôle de l'état du SAP. Deux types de contrôles ont été évalués à l'aide du Gemma Q le contrôle opérateur ou les ordres sont envoyés les uns après les autres ou par petits blocs (mode direct)

et le mode superviseur ou les ordres sont transmis sous forme de programmes (mode programme).

Il a été aussi testé la sensibilité aux transitions avec prise en compte d'un ordre de priorité (unicité de la transition vérifiée). Le modèle est flexible en cela qu'il s'adapte à plusieurs types de SAP. Il reste à définir une plateforme logicielle plus modulaire permettant d'accélérer l'adaptation à un SAP nouveau.

### **4-2 Le retour d'informations:**

Dans les SAPs, les retours d'informations habituels sont des indications de température, de position, de vitesse etc. ...délivrées par des capteurs dédiés. Ces données ont un format et un débit compatible avec le réseau Internet. Malheureusement le pilotage à distance des SAPs demande une vision globale de l'environnement. Seuls les capteurs audio et vidéo apportent ce type d'informations.

À la vue de ses capacités actuelles, Internet n'offre pas encore une garantie de services suffisants pour la transmission de flux audio direct qui garantisse la compréhension d'une conversation normale (délais d'acheminement moyen supérieur à 500 ms).

Dans le cas de contrôle d'usinage, il peut être envisagé de se contenter de l'acheminement de bruits caractéristiques suffisant pour un suivi classique de l'opération.

Paradoxalement le retour d'informations vidéo est possible sur support Internet.

Le développement des webcams et des logiciels dédiés associés constituent une offre nombreuse. Plusieurs outils du type webvideo avec un format d'affichage JPEG répondent à nos exigences. Suivant que l'on utilise Netscape navigator ou Internet Explorer, il sera nécessaire de faire appel

la technologie « Push » pour le premier, ou l'utilisation « d'Applets » pour le second. La simplicité nous pousse à préférer la technologie Push malheureusement non supportée par Internet Explorer de Microsoft. La communication entre processus distants utilise les outils classiques de la communication réseau. Java propose deux outils pour le faire – les datagrammes du protocole UDP et – les sockets du protocole TCP. Finalement après essais, il semble que le protocole TCP convient.

#### **4-3 La mesure du délai:**

C'est un élément indispensable.

Ce module estime, en permanence, le temps de transit entre l'opérateur distant et le SAP. Ce dispositif est très voisin du « ping » des systèmes d'exploitation. Il comprend deux modules – un du côté de l'opérateur – l'autre du côté du SAP. Ce dernier émettra un paquet et en réponse le module opérateur émettra un message.

Ce module, situé du côté du SAP, mesurera le délai entre l'émission et la réponse.

Suivant la valeur ainsi calculée un algorithme automatique mettra en œuvre des stratégies de comportement autonome du SAP ainsi contrôlé.

#### **4 – 4 Quelques applications réelles :**

Dans le cadre du réseau Teleproductique de Bretagne, trois établissements d'enseignement supérieur (Ubo, Insa de Rennes, SupElec de Rennes) ont bénéficié en 1998 d'une subvention de la Région Bretagne (France) en tant qu'PRIR (Projet de recherche d'intérêt régional).

Son objectif était d'étudier le contrôle à distance de systèmes de production industriels et d'introduire un comportement robuste et sûr pour garantir l'intégrité de la machine contrôlée et du processus qui s'y déroule en palliant l'absence de garantie de service du réseau informatique sur Internet/protocoles bâtis sur IP)

À l'issue de ce contrat, plusieurs plateformes ont été mises sur le Web – une caméra webcam à focale variable permettant la visite virtuelle de l'aquarium « Oceanopolis » de Brest (F) –

Un système de commande par le Web - d'un bras manipulateur Ericc accessible avec sa documentation et – d'une fraiseuse de prototypage rapide ISEL. Ces deux dispositifs sont disponibles sur le site Web du LIMi de l'UBO de Brest (<http://similimi.univ-brest.fr>).

Enfin une cellule flexible de production mécanique entièrement automatisée (baptisée

CIM Class) composée de 4 bras manipulateurs – d'une bande transporteuse – d'un chariot mobile – d'un magasin de stockage informatisé et robotisé – de 3 machines à commandes numériques (Fraise – Tour et Presse) a été mis sur le Web de 1998 à 2000

(<http://www.insa-rennes.fr/latea>).

L'ensemble de ces plateformes a fonctionné correctement et a été visité par plusieurs centaines d'utilisateurs distants. Une importante expérience a été collectée lors de cette expérimentation régionale conjointe.

#### **5 – Quelques premières conclusions et perspectives.**

Aujourd'hui les travaux accomplis et l'amélioration des réseaux permettent d'envisager de nouvelles possibilités. Elles permettent d'envisager une exploitation pédagogique et industrielle des systèmes de serveurs développés et des plateformes disponibles sur le Net. L'utilisation de moyens mis à disposition « en ligne » permet à des formations d'ingénieurs ou de techniciens de faire l'économie de l'achat, de l'hébergement et de l'entretien de machines coûteuses, pour un emploi sporadique. D'autres parts l'utilisation par des enseignants et des étudiants différents de machines complexes permet d'envisager leur mise en œuvre dans une grande variété de travaux pratiques. De plus cela facilitera la reconnaissance mutuelle des formations dans le cadre d'une co-diplomation active où chacun des établissements partenaires participe réellement à la formation commune.

Mais ce grand projet se heurte encore à de grandes difficultés. Tout d'abord des difficultés psychologiques dues à un certain scepticisme ambiant qui entoure encore ce type d'approche.

Des difficultés techniques subsistent encore. Au niveau de la division des fonctions à mettre au niveau du PC qui commande le SAP et celles à mettre au niveau du PC de l'utilisateur distant. L'informatique qui commande les SAP actuellement disponibles n'intègre pas encore toutes les fonctions serveur Web internet.

Cela nous oblige à l'interfacer avec un PC serveur dédié au service Web d'Internet d'où une fragilité supplémentaire introduite dans la connexion.

Nul doute que ce problème sera résolu facilement lorsque le marché imposera aux constructeurs de matériels et de logiciels ces choix technologiques. L'enjeu principal se trouve au niveau des fabricants de SAP (ou d'éléments de SAP).

La connexion à Internet de ces systèmes automatisés de production imposera-t-elle ou non une modification profonde de leur informatique au niveau langage de programmation en particulier. On peut aussi souhaiter que dans un premier temps un effort de recherche et développement porte sur la génération automatique de tous les éléments permettant l'interfaçage avec des utilisateurs distants. Pour finir on ne peut que souhaiter que des progrès importants aient lieu dans les aspects multimédia qui facilitent la perception à distance de l'état global d'un SAP. La mise au point de systèmes automatiques qui allouent dynamiquement les flux multimédias en fonction des impératifs liés à la tâche à réaliser me semble nécessaire. Enfin la réalité virtuelle et l'apport de la réalité augmentée sera sans nul doute un plus qui modifiera profondément le poste de pilotage distant du SAP futur.

SAP ; Système de Production Automatisée

#### 6 - Références :

- [1] Serge Monchaud and Dimitar Draganov – Telemanufacturing Systems: a New Concept – IEEE INES'97 International Conference – Budapest Hungary – September 1997.
- [2] Ken Golberg, Steve Bui, Billy Chen, Bobak Farzin, Jacob Heitler, Derek Poon, Rory Salomon, and Gordon Smith – Collaborative teleoperation via the internet – IEEE ICRA San Francisco CA USA April 2000 - The telegarden – <http://telegarden.aec.at> .
- [3] Patrick Saucy and Francesco Mondada – Kheponthweb: Open access to a mobile robot on the internet - IEEE robotics and Automation Magazine - mars 2000.
- [4] Reid Simmons: Xavier: An autonomous mobile robot on the web - International Workshop on Intelligent Robots and Systems (IROS) Victoria, Canada, 1998.
- [5] Erwan Le Rest : Pilot : Un langage pour la Telerobotique. Thèse de doctorat Université de Rennes 1 (F) : Juin 1996.
- [6] Pascal Ogor: Une architecture générique pour la supervision sûre à distance de machine de production avec Internet. Thèse de Doctorat Université de Bretagne Occidentale (F): Décembre 2001.

#### Remerciements :

Je tiens à remercier tout particulièrement Monsieur Pascal Ogor pour son travail de thèse de

doctorat [6], effectuée dans le cadre du PRIR Teleproductique (1998- ).

Son apport méthodologique pour la spécification de systèmes sûrs pour la supervision à distance et son apport dans le domaine des logiciels dédiés à ce type d'applications ont grandement inspirés les quelques pistes que j'ai retenues pour rédiger cette contribution à SINTES 2003.

-----  
**Remote piloting of automatised and robotized systems—general problems and some solutions—**

**Abstract:** The massive introduction of many applications linked to internet and multimedia techniques during the last decade is associated to the globalisation of the world economy.

They also have enhanced the remote using of industrial systems more or less complex.

The remote applications were introduced long time ago in the applications domains where the human being was not permitted i.e. space applications, submarine using, nuclear actions etc or in cases of accident and danger for human beings, without forgetting the military applications like missiles, drones, etc.

The technological knowledge acquisition is very important but with a very high cost incompatible with the normal civil domain and the secret character of the results.

Our problematic is slightly different. In our case the remote piloting will integrate a common environment with normal human beings who stay the principal actor. The remote piloting tries to use human capacity and materials where they are located and it tries to suppress the displacements between them. These displacements unuseful and cost effective are minimalised. In such way a more harmonious development of the territory, with a big reduction of CO2 pollution connected to huge transportation will be favoured.

The advantages are numerous but the disadvantages and difficulties are also increasing; First of all we must verify if the electronics links created by internet are feasible enough than the physical and traditional ones. The exponential development of internet seems to give a positive answer. But the harmonious and equilibrated using of internet is not warranty. The segmentation between the different users will be contrary to the basic rules of internet and will contradict its development. Our approach is different - a free using of Internet with acceptance of its weakness will be promoted.



Cellule flexible educative CIM-CLASS Synoptique général

