

L'haptique pour la simulation chirurgicale

De la réalité virtuelle à la réalité augmentée

groupe RVH
IBISC-CNRS

2007



Introduction

- De quoi allons nous parler aujourd'hui ?
 - **L'haptique**
 - Introduction
 - Applications médicales existantes
 - **L'haptique augmentée**
 - Réalité augmentée -Taxonomie / RA classique
 - Haptique augmentée pour l'apprentissage
 - **Aide aux gestes par contrainte**
 - Virtual fixture pour la manipulation
 - Virtual fixture pour la télémanipulation
 - **Algorithme de calcul de contrainte unilatérale**
 - Entre deux corps déformables (Simulateur HapCo)
 - Entre l'opérateur et un guidage virtuel



L'haptique



L'haptique

- Origine

- Début XX^{ème} : Les psychophysiciens introduisent le mot «απτειν» (haptēi)
- Ils cherchent à étudier la perception humaine à travers le toucher
- 70's-80's : Analyse et développement d'interfaces de contrôle et de manipulation, en se servant de la dextérité humaine

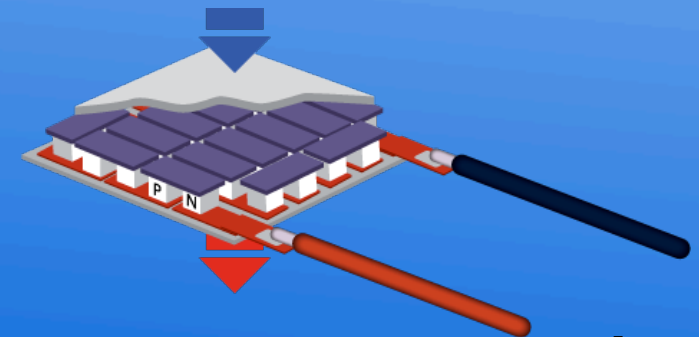
- Définition :

- sensibilité d'un être humain à percevoir l'environnement extérieur directement en contact avec son corps (coté bilatéral du sens du toucher)



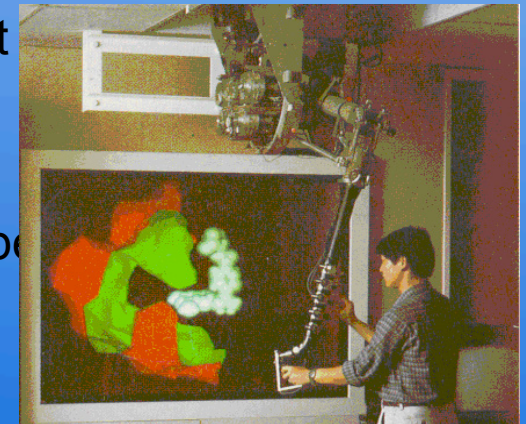
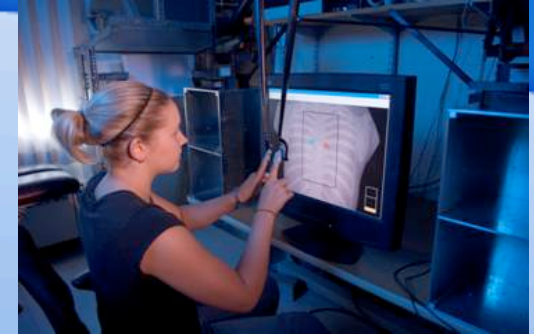
Les dispositifs haptiques

- Kinesthésiques
 - Bras, exosquelettes...
- Tactile
 - Souris braille, IPMC,...
- Thermique
 - Peltier.
- Au laboratoire: 3 omnis et 1 desktop (Sensable technologies), un virtuose (Haption), table XYZ, interface peltier



Applications de l'haptique

- Dans le domaine médical
 - Entraînement:
 - Virtual Back, pour le diagnostic palpatif, TUM, All
 - Chirurgie mini-invasive (laparoscopique, endovasculaire) INRIA, MIT
 - Réhabilitation:
 - Telerehabilitation pour la thérapie kinesthésique, EPFL, Suisse.
 - Intervention à distance
 - Opération New York-Strasbourg, en sept 2001, European Institut of TeleSurgery.
 - Compréhension:
 - Molecular Docking, projet GROPE, Chapel Hill, USA



L'haptique augmentée



La réalité augmentée

- En réalité virtuelle (RV):
 - RV = l'ensemble des techniques de communication homme-machine consistant à immerger à l'aide de dispositifs d'entrée/sortie particuliers, une personne dans un univers sensoriel de synthèse recalculé en temps réel
 - Réalité Augmentée = branche des Environnements Mixtes
 - Continuum réalité/virtualité de Milgram (1994)

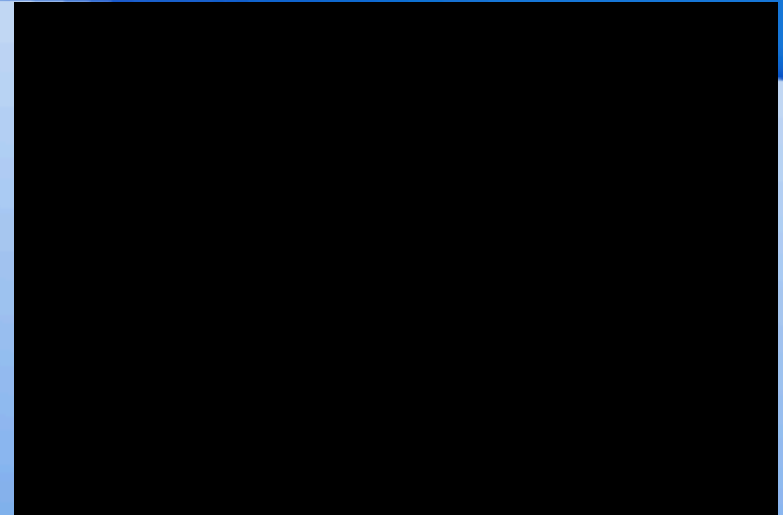


- Trois caractéristiques:
 - mélange réel/virtuel
 - contraintes temps réel
 - Alignement

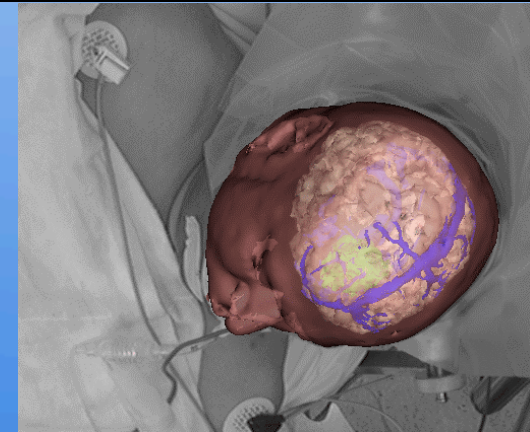


RA : applications médicales

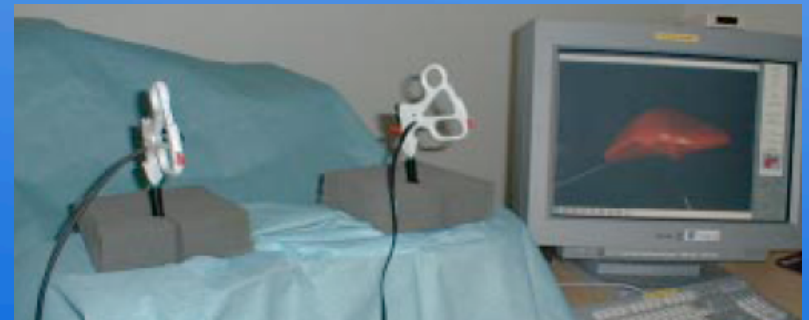
Apprentissage des gestes d'accouchement (N.Navab, TUM, AII)



Visualisation de tumeur cérébrale (university of Rochester, USA)

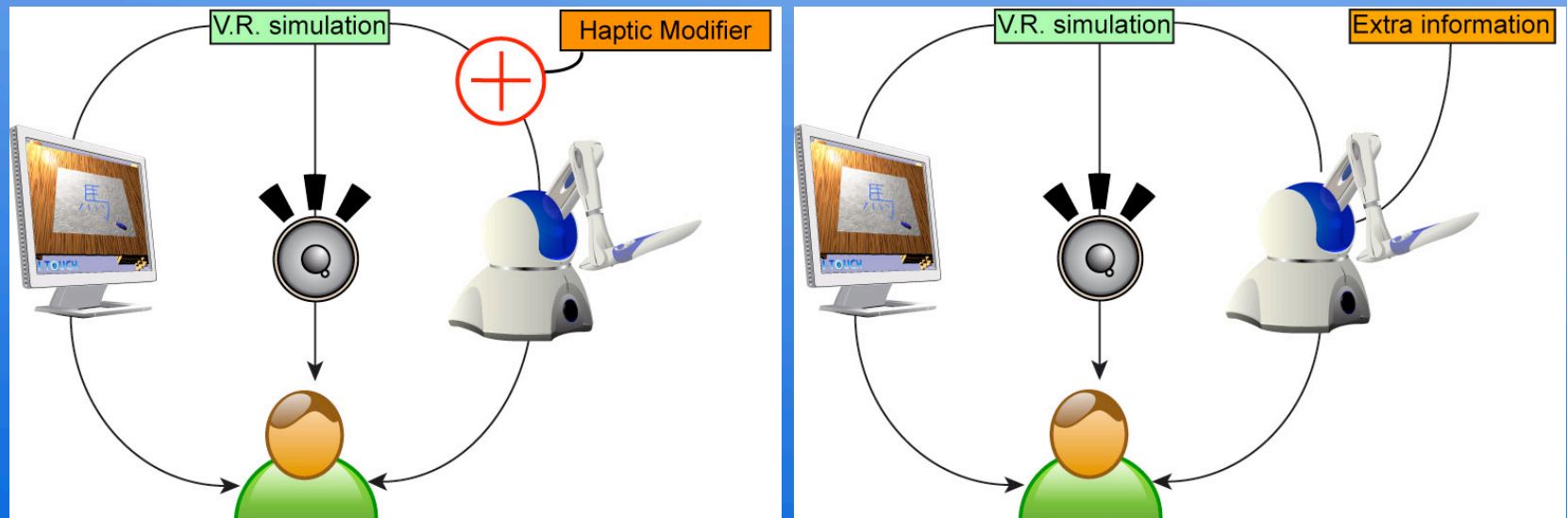


Chirurgie laparoscopique du foie (INRIA Sophia Antipolis, France)



L'haptique augmentée

- La réalité augmentée ne se limite pas qu'à la vision mais aussi au toucher (tactile et kinesthésique), à l'ouïe, l'odorat et au goût [Azuma, 2001]
- Taxonomie parallèle à la RA:
 - **Augmentation haptique** : la modalité haptique est utilisée pour fournir une information supplémentaire
 - **Haptique augmentée** : les informations haptiques sont modifiées, modulées, extrapolées pour faire apparaître une information supplémentaire



Augmentation haptique : concept

- Grâce aux développements des interfaces haptiques, étendre les concepts déjà développés
- AR mixe les données réelles et celles virtuelles

- Informations sont de natures diverses

$$I = \{\lambda, P, \tau, F, T, \mu \dots\}$$

- La surcharge d'information

$$I_u = g_1(I_u) + g_2(I_r) = g_1(v, T_v, F_v, P_v, \dots) + g_2(r, T_r, F_r, P_r, \dots)$$

- Augmentation Haptique : on rajoute une information sur une composante haptique



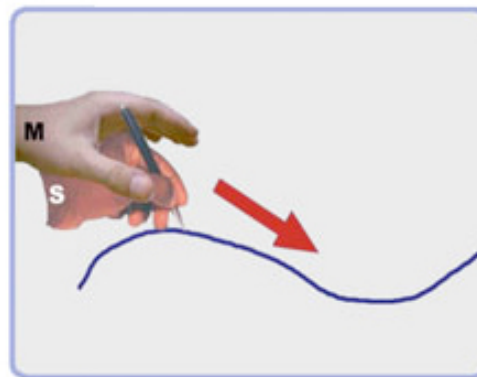
AH : méthode 'record&replay' (1/2)

- Méthode dédiée à l'apprentissage
- Problèmes liés à l'apprentissage virtuel
 - Dépendance entre l'étudiant et le maître
 - Passivité lors de l'apprentissage
- Guidage haptique : approprié pour l'apprentissage d'une tâche manuelle
- Méthode de 'record and progressive replay'
 - Enregistrement d'un chemin $P=\{(X_i, T_i)\}$
 - Rejoue en plusieurs étapes /
 - l'aide fournie aux étudiants décroît petit à petit (pour éviter la passivité d'apprentissage)
 - Laisse faire des erreurs (car l'on apprend de ses erreurs)

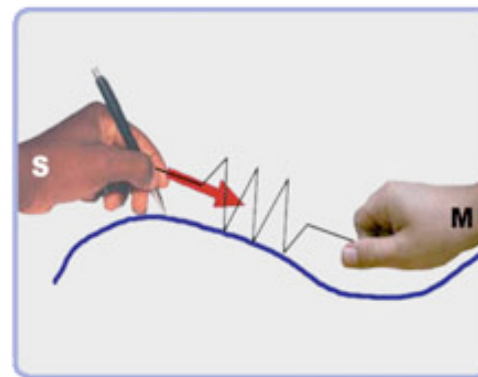


AH : méthode 'record&replay' (2/2)

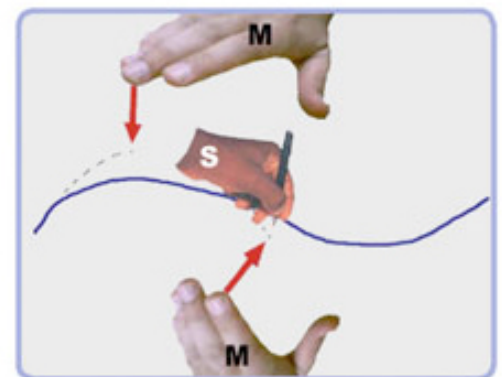
- La méthode en 3 étapes
 - Mode complet : L'étudiant est passif et on lui montre le chemin complet (idée globale)
 - Mode partiel : étudiant moins passif (contrainte de temps en moins)
 - Mode simple : étudiant corrigé si fait une erreur



Step 1: Full guidance



Step 2: Partial path guidance



Step 3: simple correction

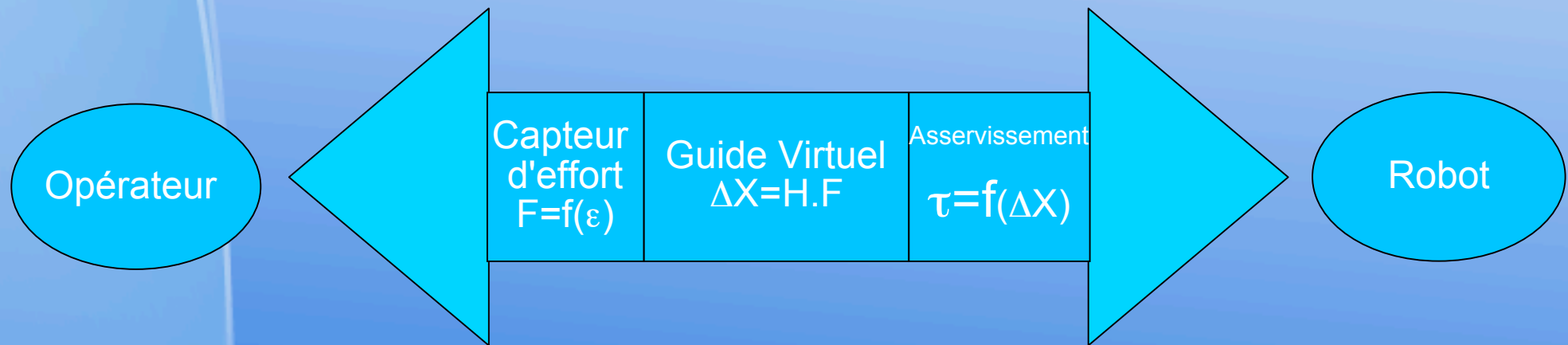


Aide aux gestes par contrainte



Guide virtuel pour la télémanipulation (en mode admittance)

- Contraint le geste en interdisant certaines zones (contraintes dures)
- Guide par attraction vers des points définis (contraintes souples)
- Filtrage du tremblement

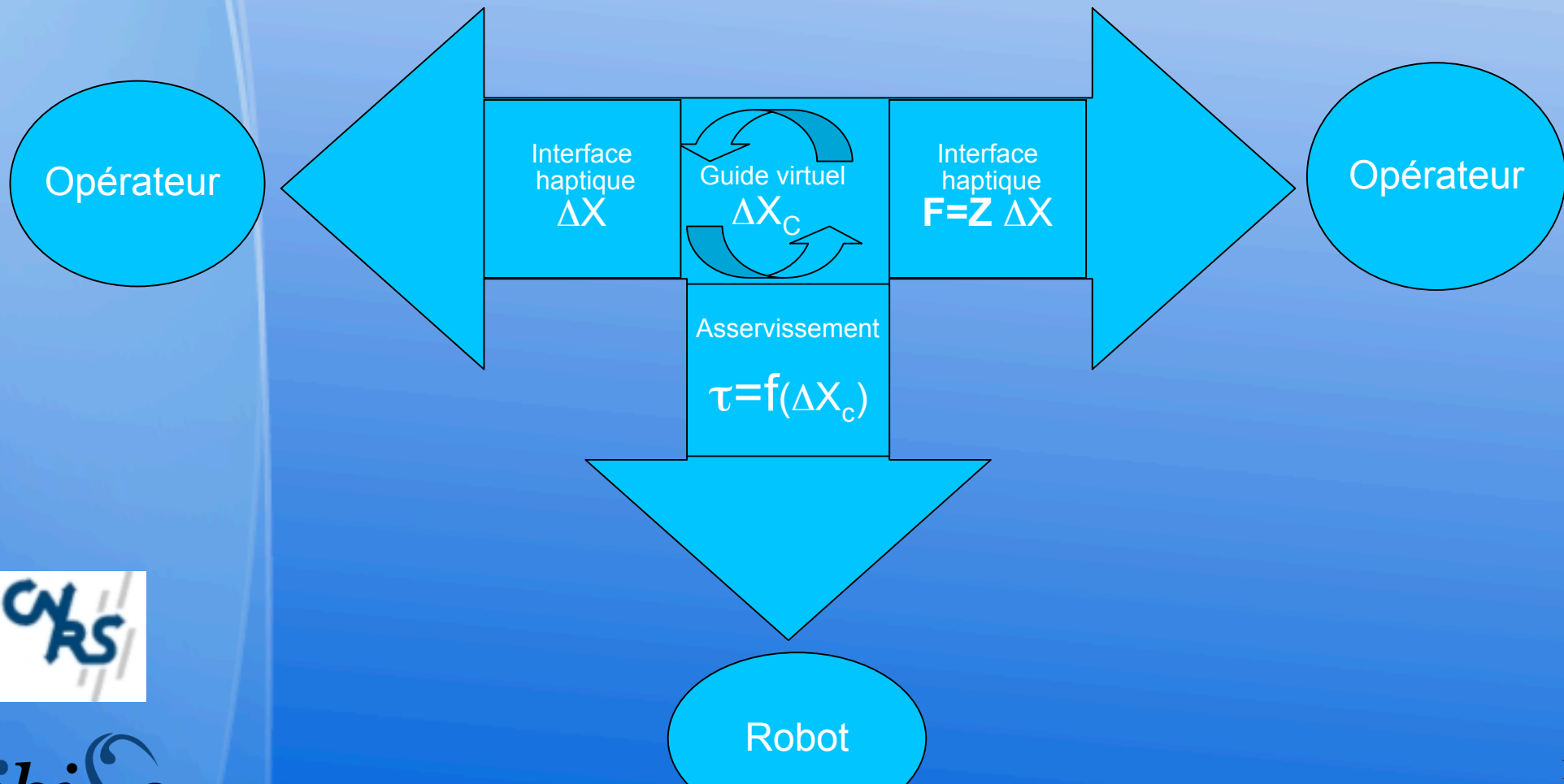


Canulation veineuse (Johns Hopkins University)



Guide virtuel pour la télémanipulation (en mode impédance)

- Contraint le geste en interdisant certaines zones (contraintes dures)
- Guide par attraction vers des points définis (contraintes souples)
- Filtrage du tremblement en un point fixe



Algorithme de détermination de contrainte unilatérale

- Formulation des lois de contact à partir du bipotentiel (G. DeSaxe, Z. Q. Feng)
- Construction d'un opérateur de projection à partir de la formulation lagrangienne augmentée des actions de contact.

$$\mathbf{Z}_\alpha = \mathbf{r}^\alpha - \text{Proj}_{K_\mu}(\mathbf{r}^{*\alpha})$$

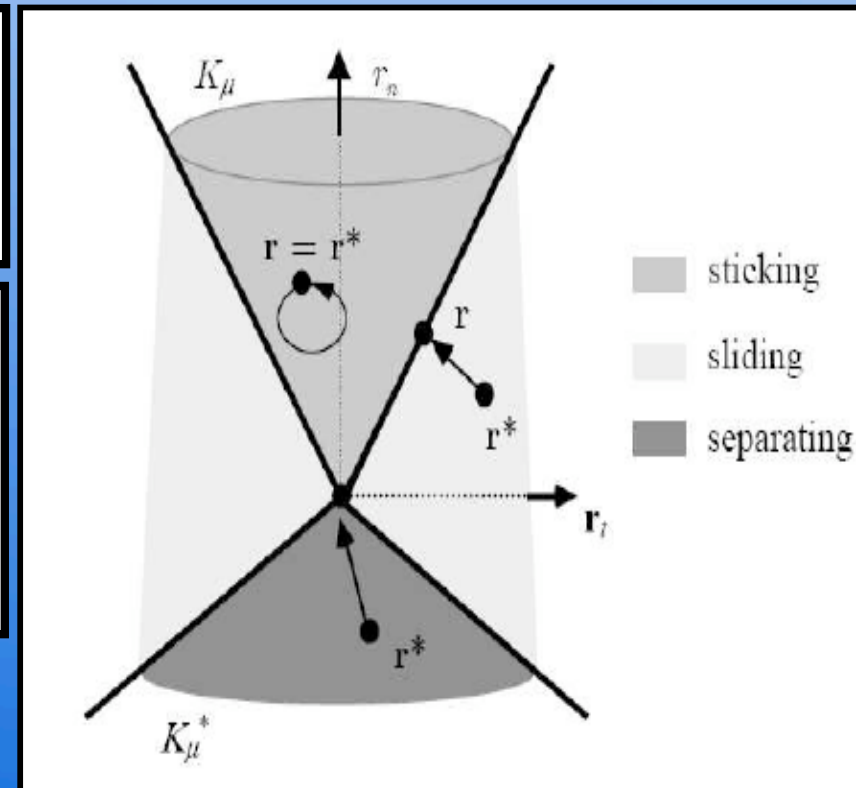
$$\mathbf{r}^{*\alpha} = \mathbf{r}^\alpha - \rho(\mathbf{x}^\alpha + \mu \|\mathbf{x}_t^\alpha\| \mathbf{n}) \Leftrightarrow \begin{cases} r_n^{*\alpha} = r_n^\alpha - \rho(x_n^\alpha + \mu \|\mathbf{x}_t^\alpha\|) \\ \mathbf{r}_t^{*\alpha} = \mathbf{r}_t^\alpha - \rho \mathbf{x}_t^\alpha \end{cases}$$

$$\text{Proj}_{K_\mu}(\alpha \mathbf{r}^*) = \alpha \mathbf{r}^* \text{ si } \|\alpha \mathbf{r}_t^*\| \leq \mu r_n^*$$

$$\text{Proj}_{K_\mu}(\alpha \mathbf{r}^*) = 0 \text{ si } \mu \|\alpha \mathbf{r}_t^*\| \leq -r_n^*$$

$$\text{Proj}_{K_\mu}(\alpha \mathbf{r}^*) = \alpha \mathbf{r}^* - \left(\frac{\|\alpha \mathbf{r}_t^*\| - \mu r_n^*}{1 + \mu^2} \right) \left(\frac{\alpha \mathbf{r}_t^*}{\|\alpha \mathbf{r}_t^*\|} - \mu \mathbf{n} \right)$$

$$\begin{cases} \mathbf{u}^{i+1} = \mathbf{W}\mathbf{r} + \tilde{\mathbf{u}}^i \\ \alpha \mathbf{r} = \text{Proj}_{K_\mu}(\alpha \mathbf{r}^*) \quad \alpha = (1 \dots m) \end{cases}$$



Algorithme de détermination de contrainte unilatérale

Système à résoudre

$$\begin{cases} \mathbf{u}^{i+1} = \mathbf{W}\mathbf{r} + \tilde{\mathbf{u}}^i \\ \alpha_{\mathbf{r}} = \text{Proj}_{K_{\mu}}(\alpha_{\mathbf{r}}^*) \quad \alpha = (1 \dots m) \end{cases}$$

Gauss Seidel

$$\alpha_{\mathbf{f}}(\alpha_{\cdot}(k+1)) = \begin{cases} \alpha_{\mathbf{u}}^{(i+1)(k+1)} - \mathbf{W}_{\alpha\alpha} \alpha_{\mathbf{r}}^{(k+1)} - \alpha_{\beta} \mathbf{u}^{(i+1)(k+1)} \\ \alpha_{\mathbf{r}}^{(k+1)} - \text{Proj}_{K_{\mu}}(\alpha_{\mathbf{r}}^{*(k+1)}) \end{cases} = \mathbf{0}$$

avec $\alpha_{\beta} \mathbf{u}^{(i+1)(k+1)} = \sum_{\beta=1, \alpha-1} \mathbf{W}_{\alpha\beta} \beta_{\mathbf{r}}^{(k+1)} + \sum_{\beta=\alpha+1, m} \mathbf{W}_{\alpha\beta} \beta_{\mathbf{r}}^{(k)} + \alpha \tilde{\mathbf{u}}^{(i+1)}$

Uzawa

$$\begin{aligned} \alpha_{\mathbf{r}}^{*(k+1)(j+1)} &= \alpha_{\mathbf{r}}^{(k+1)(j)} - \rho(\alpha_{\mathbf{u}}^{(i+1)(k+1)(j)} + \mu \|\alpha_{\mathbf{u}}^{(i+1)(k+1)(j)}\|_{\mathbf{n}}) \\ \alpha_{\mathbf{r}}^{(k+1)(j+1)} &= \text{Proj}_{K_{\mu}}(\alpha_{\mathbf{r}}^{*(k+1)(j+1)}) \\ \alpha_{\mathbf{u}}^{(i+1)(k+1)(j+1)} &= \mathbf{W}_{\alpha\alpha} \alpha_{\mathbf{r}}^{(k+1)(j+1)} + \alpha_{\beta} \mathbf{u}^{(i+1)(k+1)} \end{aligned}$$

$$\frac{\|\alpha_{\mathbf{r}}^{(k+1)(j+1)} - \alpha_{\mathbf{r}}^{(k+1)(j)}\|}{\rho} < \varepsilon_1$$



Algorithme de détermination de contrainte unilatérale

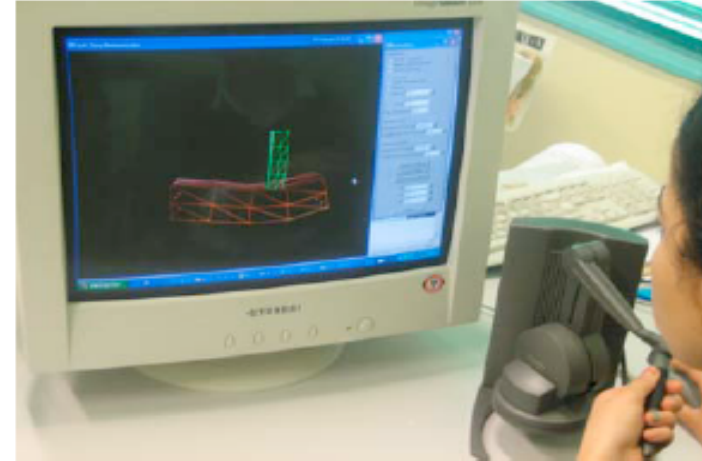
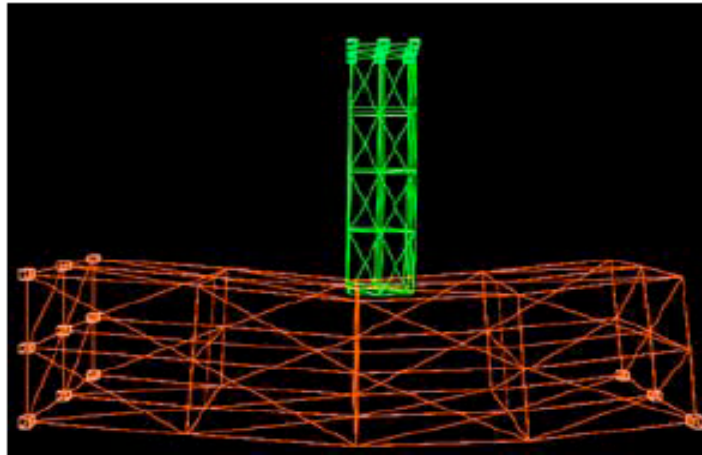
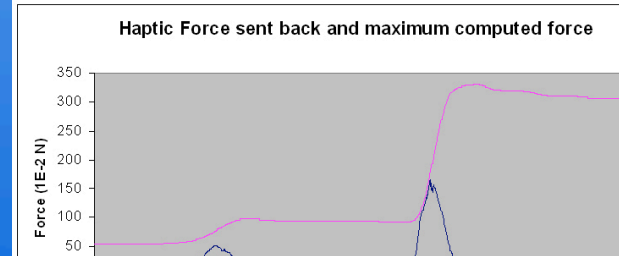
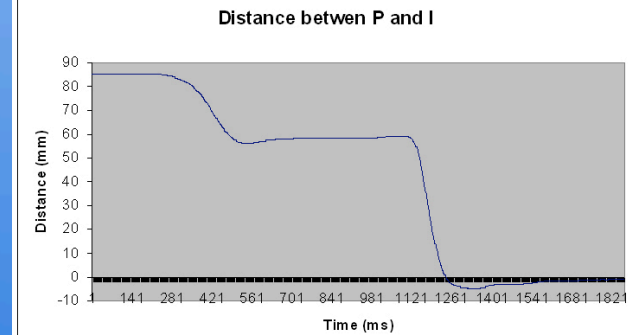
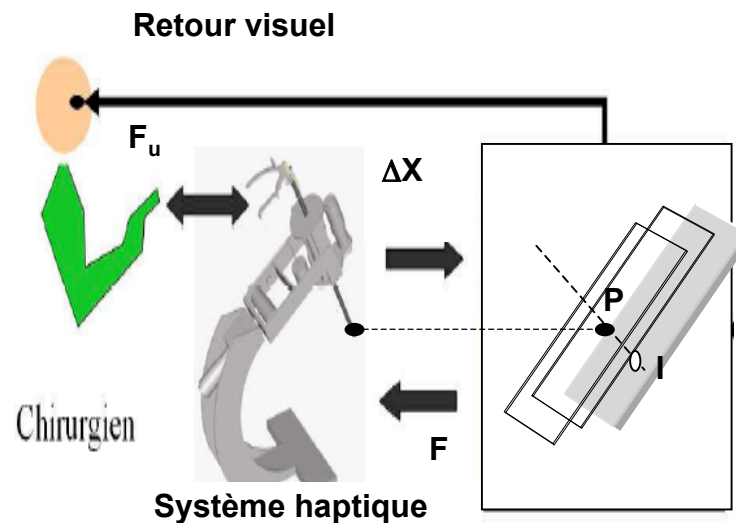
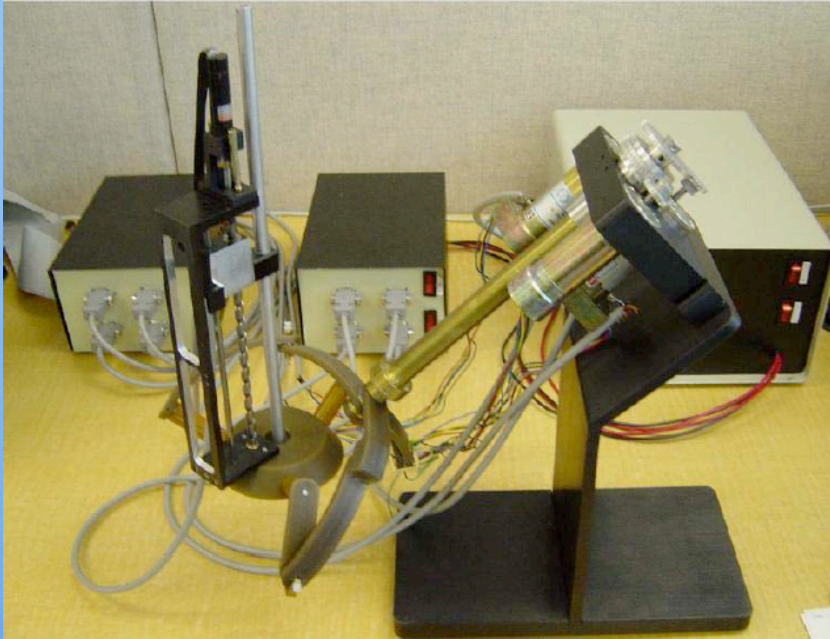


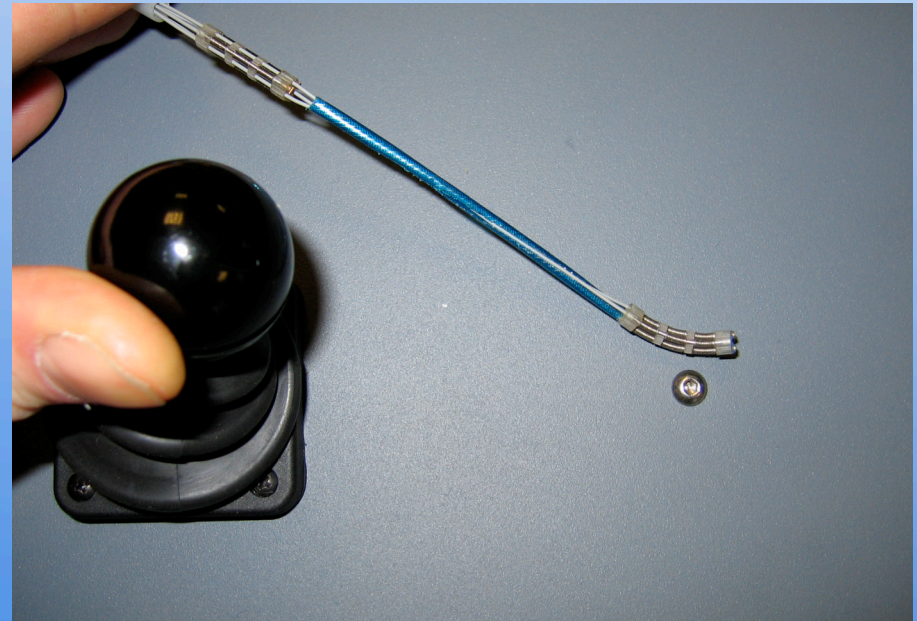
Figure 2 : HapCo: Numerical benchmark with haptic rendering force



Robot 6 DDL appliqué à la chirurgie mini-invasive



Prototype conçu
à Vancouver (LER)



Prototype conçu
à Evry (IBISC/IUT Cachan)