

Soutenance de THÈSE
présentée pour l'obtention du
Doctorat de l'Université Joseph Fourier de Grenoble
spécialité: mathématiques appliquées et informatique
(arrêté du 30 mars 1992)
par **Agnès Guerraz**

Etude du télégeste médical non invasif utilisant un transducteur gestuel à retour d'efforts

Haptique et télé-médecine



- ***haptic*** [Greek *haptikos*, from *haptesthai*, to grasp, touch.] adj. of or relating to or proceeding from the sense of touch; "haptic data"; "a tactile reflex" [syn: tactile, tactual].
Le mot haptique n'existe pas en français. Il est une transposition abusive du mot anglais Haptic.
- *La télé-médecine: acte médical pratiqué ou partagé à distance avec un site patient et un site médical. Il s'agit d'un concept permettant d'amener les médecins, les infirmières ou secouristes à pratiquer des actes médicaux en utilisant les moyens de télé-communications.*

L'examen échographique



→ Pour la future maman, l'examen est simple indolore et sans danger:

⇒ Une sonde passée sur l'abdomen maternel émet des ultrasons. Selon la différence de densité acoustique des organes et des membres rencontrés, la réflexion des ultrasons les fait apparaître à l'écran de façon plus ou moins claire ou foncée, en noir et blanc ou bien encore en couleur.

→ **Les activités du médecin lors d'un examen classique sont les suivantes:**

⇒ Interaction verbale avec la patiente

⇒ Application du gel sur l'abdomen de la patiente

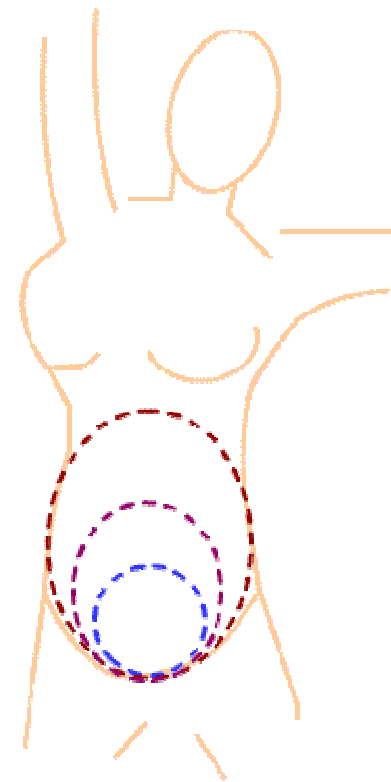
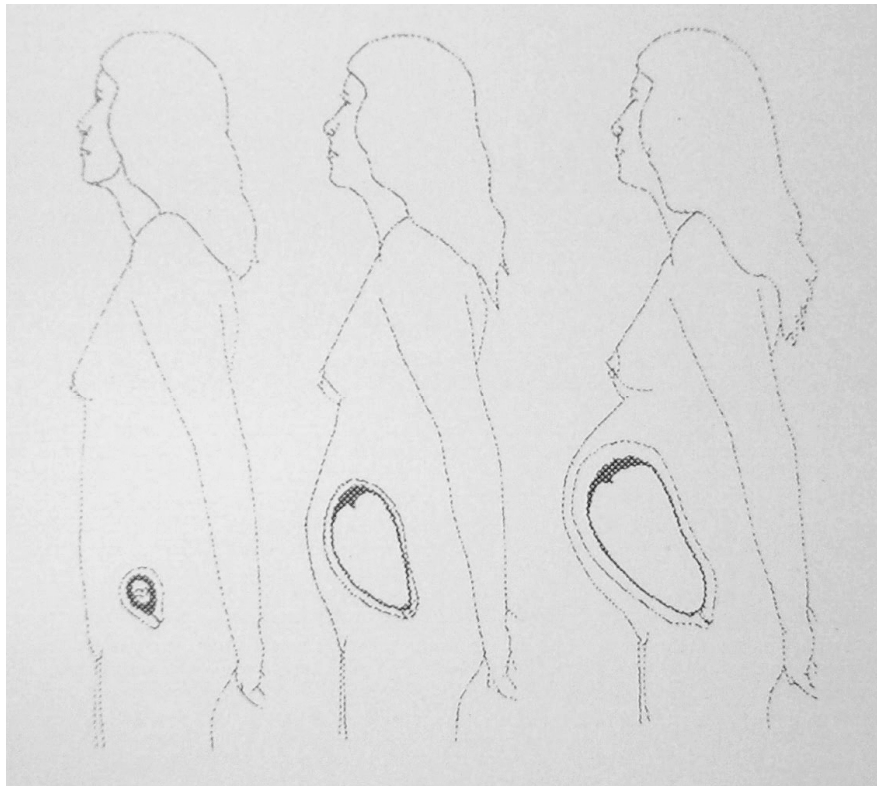
⇒ Interaction gestuelle: position - orientation - pression de la sonde sur l'abdomen de la patiente

⇒ Indications à la patiente, par exemple: arrêt et reprise de la respiration

⇒ Processus d'analyse des images échographiques

⇒ Reconstruction des informations 3D par le biais d'images 2D et des informations de proprioception gestuelle.

La surface de travail



Gesture zones at:

--- 32nd week

--- 22nd week

--- 13rd week

Conditions spécifiques d'un service télé-échographie



Conditions spécifiques d'un service télé-échographie sont:

- ⇒ fiabilité des systèmes
- ⇒ qualité des images affichées
- ⇒ commande de la sonde distante, avec proprioception pour des gestes fins et lents
- ⇒ synchronisation du geste et de l'image échographique
- ⇒ haute qualité du flux haptique à travers le réseau de télé-communication
- ⇒ facilité d'utilisation

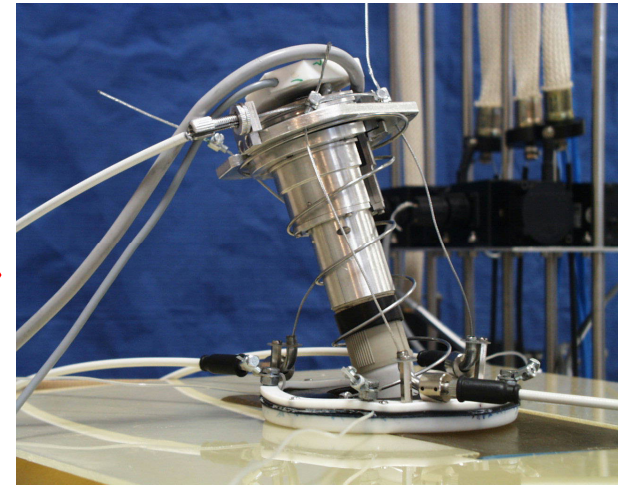
Observation gestuelle d'examens échographiques obstétricaux classiques



Les mouvements les plus utilisés:

- Orientation et pression
- Pression
- Immobile et pression
- Translation latérale / longitudinale
- Orientation tangage
- Orientation roulis
- Orientation lacet
- Le becquet
- Zigzag.

Spécifications pour
le robot esclave TER



La rotation circulaire n'est pas nécessaire mais elle est utilisée néanmoins.

La mesure des variations des efforts



La principale force exercée sur l'abdomen du patient est une **force normale**. A cause du gel appliqué sur la partie du corps à examiner: il y a très peu de forces tangentielles.

Résultats:

- pour un travail gestuel utilisant des pressions minimales:
 - ⇒ Mesures de 0.6 à 0.7 dN (soit 600 à 700g)
- pour un travail gestuel utilisant des pressions standards:
 - ⇒ Mesures de 0.8 to 1.1 dN (soit 800 à 1100g)
- Pression maximale:
 - ⇒ 1.3 dN (1300g)
- Variation de la pression exercée:
 - ⇒ 0.7 dN (700g)

Spécifications pour
le retour d'efforts

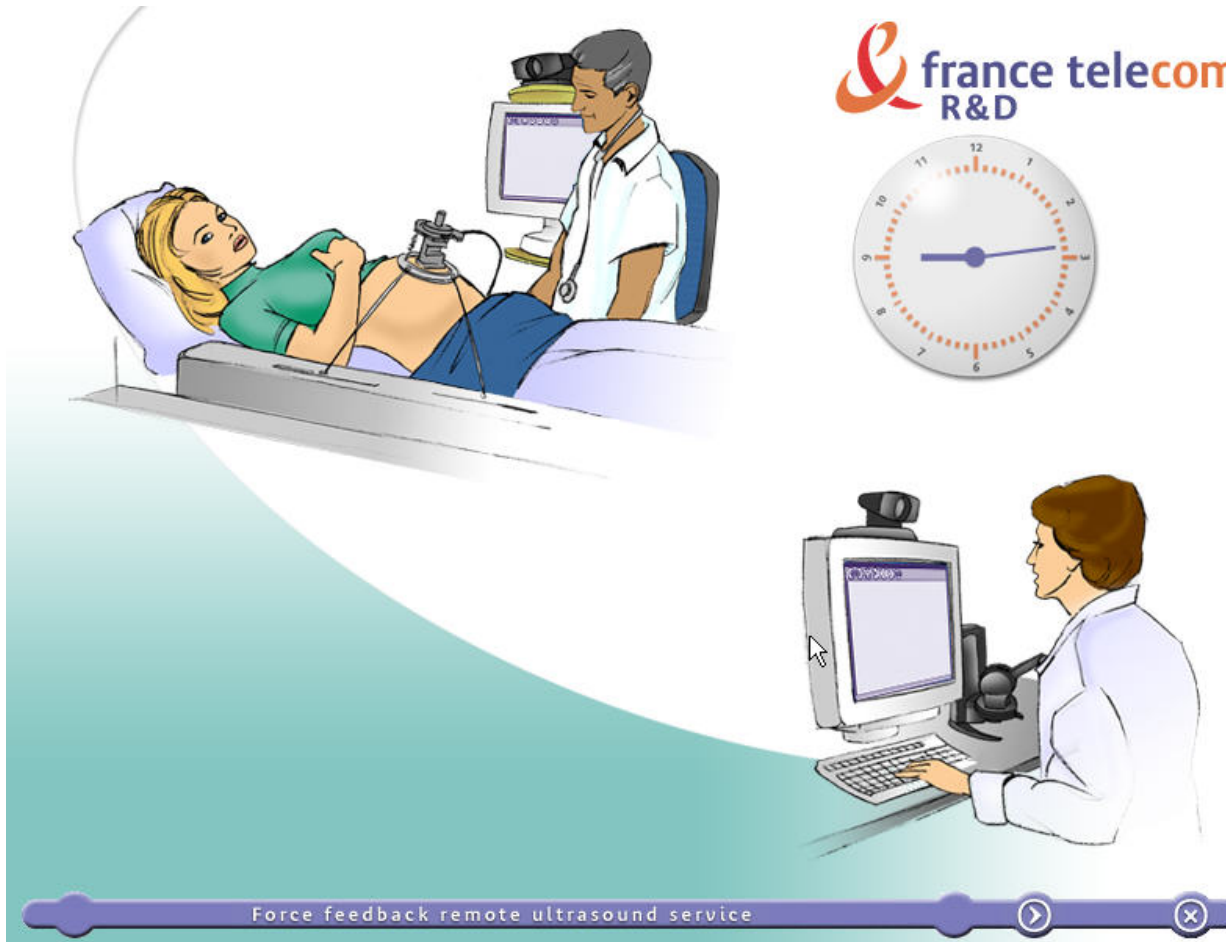


Un environnement virtuel haptique pour la télé-échographie



UNIVERSITÉ
JOSEPH FOURIER
CENTRE DE RECHERCHE EN INFORMATIQUE

france telecom
R&D



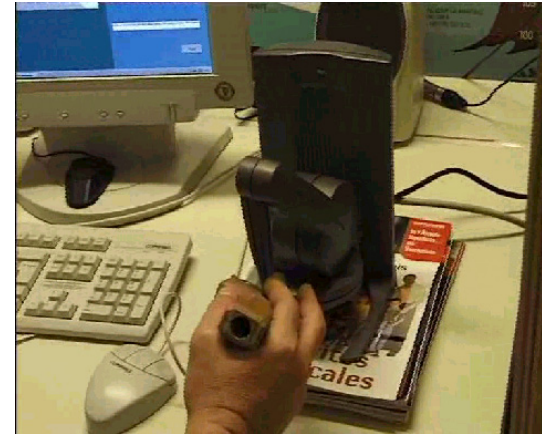
Force feedback remote ultrasound service

(diffusion
libre)

Sondes



→ Sonde factice sur le périphérique haptique:



Remote scan examination:
Haptic Command Station

Connect
Disconnect

Stiffness



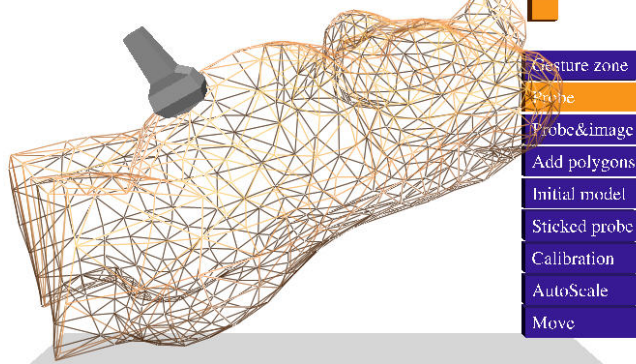
Viscosity



Scale



Quit



Gesture zone
Probe
Probe&image
Add polygons
Initial model
Sticked probe
Calibration
AutoScale
Move

→ Sonde virtuelle

→ Sonde réelle:



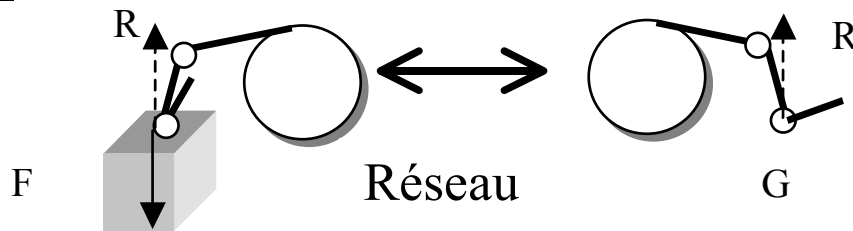
Architecture



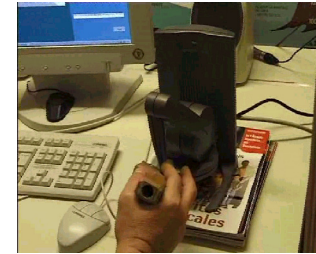
Sonde réelle



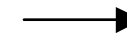
Robot palpant



Sonde Factice

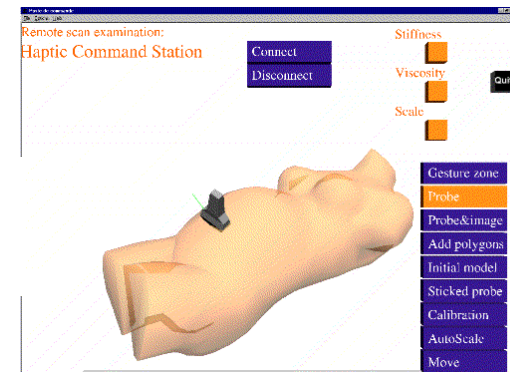


Robot utilisateur



Le toucher distant

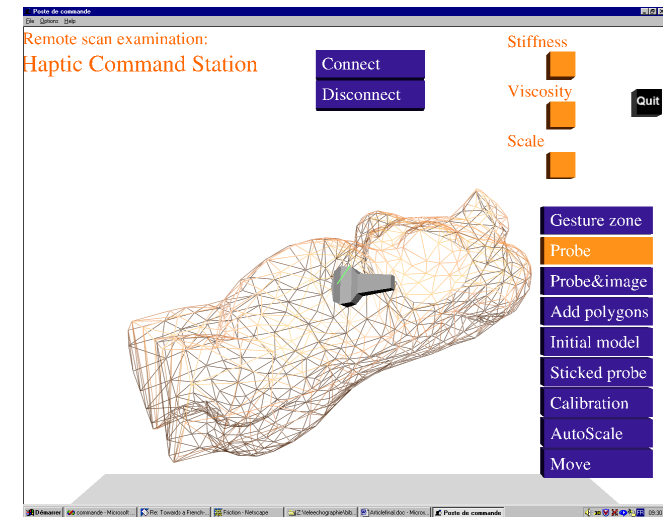
Représentation haptique
La sonde virtuelle



Une approche de réalité virtuelle pour le codage de ces gestes



- Le codage du modèle géométrique 3D du patient est réalisé par des objets polygonaux.
 - ⇒ Le maillage se déforme sous le geste.
- Le toucher des facettes:
 - ⇒ C'est le calcul de la position du point haptique $G^{[1]}$ comparée à une sélection de polygones.



- La force est calculée comme $F = -K X$.
 - ⇒ K est la raideur de l'objet polygonal à la face touchée par le point haptique G ; cette valeur peut être constante ou bien ajustée dynamiquement
 - ⇒ X la distance entre le point haptique G et la face touchée.

[1] Le point haptique est la représentation dans le monde virtuelle de l'extrémité du bras phantom où la force est appliquée.

(diffusion libre)

Le modèle mécanique



→ La sonde virtuelle est soumise à la force suivante:

$$\mathbf{f} = m\gamma - \lambda\mathbf{v} - k\mathbf{x}$$

m est la masse de la sonde virtuelle (en option, pour augmenter le réalisme)

k est le coefficient d'élasticité de la peau du mannequin virtuel

λ est le coefficient de freinage visqueux qui modélise la vitesse limitée du robot compliant distant

→ En notation matricielle dans l'espace des états:

$$X \equiv \begin{pmatrix} v \\ x \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \gamma \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\lambda}{m} & \frac{k}{m} \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ x \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{m} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f \\ 0 \end{pmatrix}$$

Le maillage



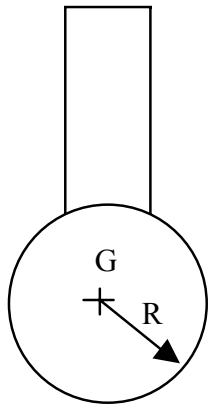
- Le modèle géométrique 3D de la patiente distante est codé par un maillage polygonal.
- La construction du maillage peut être obtenue de différentes manières:
 - ⇒ soit par des modèles pré-établis: sorte de mannequins virtuels
 - ⇒ soit par interpolation d'un nuage de points mesurés à distance sur la patiente,
 - ⇒ soit par télé-calibrage et basé sur un modèle déjà établi.
- Nous supposons ici que le maillage de l'abdomen de la patiente est convexe.
- Le maillage se déforme sous le geste.
- Deux approches du rendu haptique ont été abordés: celui par les sommets et celui par les polygones du maillage.

Le rendu haptique



→ On appelle l'ensemble des sommets du maillage W . Quand le point haptique est en dehors du maillage 3D, le retour d'efforts est nul. Si le point haptique est à l'intérieur du maillage: une force est calculée pour rétroagir la boucle haptique.

→ Le rendu haptique par les sommets via le capteur virtuel sphérique:



– le point haptique est en contact avec le maillage, si au moins un sommet est à l'intérieur du capteur virtuel.

– pour chaque sommet V appartenant à l'ensemble W_c de sommets du maillage, et qui est en contact avec le capteur, alors la force F_v est calculée comme suit:

$$\vec{F}_v = -\vec{GV} \times \left\langle \frac{1}{\|\vec{GV}\|} - \frac{1}{R} \right\rangle \times T$$

avec le point haptique G différent du sommet V , R le rayon du capteur virtuel, et T la valeur de l'intensité de force maximale

– la force totale résultante du geste pour le toucher de sommets est la somme de toutes les forces des sommets touchés:

$$\vec{F} = \sum_{v \in W} \vec{F}_v$$

Le capteur virtuel sphérique
Centré sur le point haptique
 G et de rayon R

Le rendu haptique par identification du polygone touché



- ⇒ Le retour d'efforts est calculé selon le polygone le plus près de la position capteur virtuel.
- ⇒ Le rendu haptique d'un objet polygonal permet des calculs de retour d'efforts plus précis.
- ⇒ Cet algorithme est plus complexe que pour le rendu haptique des sommets.
- ⇒ Il est limité par la complexité de la géométrie.

Lors de la construction du modèle géométrique, on calcule pour chaque sommet sa normale : il s'agit de la somme des normales des faces dont le sommet fait partie, on peut appeler cette normale la normale au sommet ou de Gouraud:

$$\vec{n}_V = \frac{1}{p} \sum_{i=0}^{p-1} \vec{n}_i \text{ avec } p \text{ le nombre de polygones possédant } V \text{ comme sommet}$$

H le projeté du point haptique sur le polygone en contact (A,B,C). Si le point H appartient au polygone (A, B, C), alors H est tel que: $H = \alpha.A + \beta.B + \gamma.C$, avec $\alpha + \beta + \gamma = 1$, et α, β, γ , positifs ou nuls, ses coordonnées barycentriques.

Lorsqu'il y a contact avec le maillage, on calcule la distance entre le point haptique G et le sommet le plus proche; on note cette distance d_c , et la force est calculée comme suit:

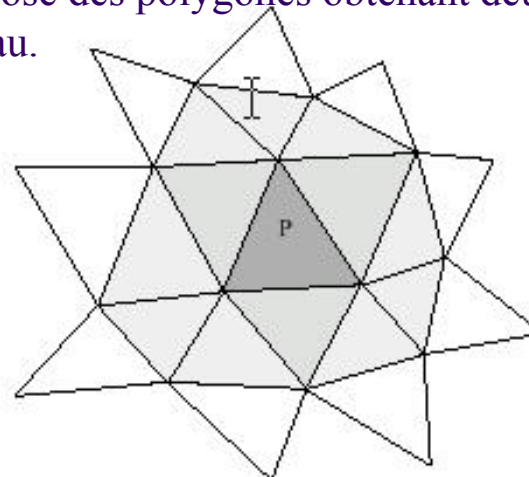
UJF – Grenoble 1

$$\vec{F}_{P_c} = d_c \times T \times (\alpha \vec{n}_A + \beta \vec{n}_B + \gamma \vec{n}_C)$$

Le rendu haptique par identification du polygone touché et de son voisinage



- Cet algorithme permet le calcul d'une force supplémentaire qui prend en compte le voisinage du polygone en contact P_c avec le point haptique G . Dans cet algorithme, le voisinage du polygone en contact est traité afin de participer aux retours d'efforts.
- Pour la télé-échographie, nous définissons le voisinage d'un polygone de P comme suit:
 - ⇒ le premier anneau est l'ensemble de polygones ayant deux sommets, c'est à dire un côté en commun avec P ,
 - ⇒ le deuxième anneau se compose: d'abord par les polygones ayant un sommet en commun avec P , et deuxièmement par les polygones obtenant deux sommets en commun avec un des polygones du premier anneau,
 - ⇒ le troisième anneau est composé des polygones obtenant deux sommets en commun avec un des polygones du deuxième anneau.



Le rendu haptique par identification du polygone touché et de son voisinage

- L'ensemble de polygones qui font partie du voisinage du polygone de contact s'appelle Γ_{P_c} .
Pour le polygone $(A,B,C) \in \Gamma_{P_c}$ la force est calculée comme suit:

$$\vec{F}_{(A,B,C)} = \text{Poids}_{(A,B,C)} \times T \times d_c \times \vec{n}_{(A,B,C)}$$

Où le poids est égale à $\text{poids}_{(A,B,C)} = \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{6}$ suivant que le polygone appartienne au 1er, 2ème ou 3ème anneau

- La force résultante de tous les polygone du voisinage est:

$$\vec{F}_{\Gamma_{P_c}} = \sum_{(A,B,C) \in \Gamma_{P_c}} \vec{F}_{(A,B,C)}$$

- La force totale est:

$$\vec{F} = \vec{F}_{P_c} + \vec{F}_{\Gamma_{P_c}}$$

La déformation



- La déformation du modèle géométrique est paramétrée par un coefficient de raideur, ainsi que par un coefficient de viscosité.
 - ⇒ La raideur sert à simuler un comportement élastique.
 - ⇒ La viscosité d'un milieu s'oppose au mouvement des corps qui s'y déplacent. Elle se modélise par un coefficient positif qui agit dans la direction opposée de la vitesse.
- Cette déformation est calculée comme suit pour chacun des sommets de la facette en contact (A,B,C), on a:

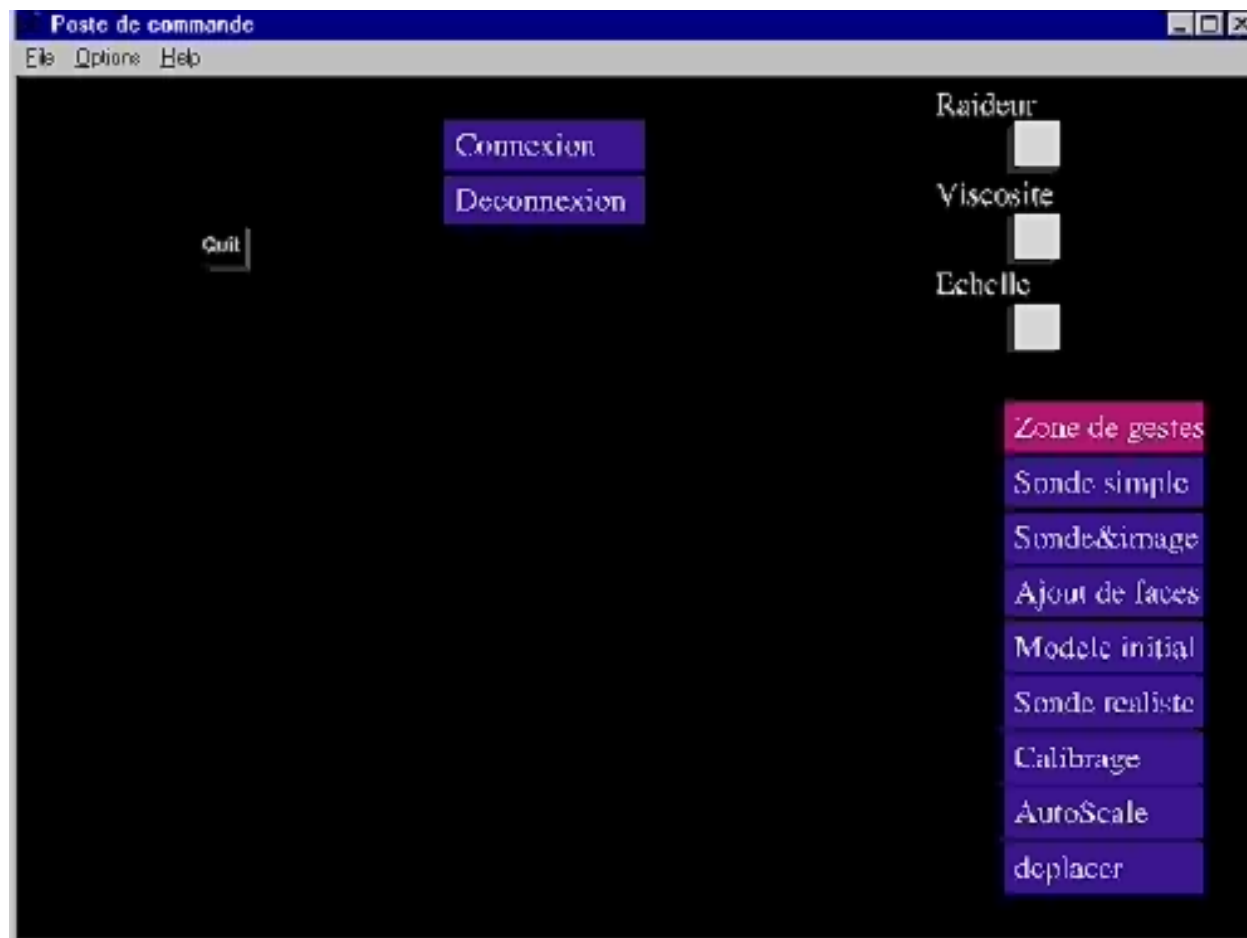
$$A = A - \frac{\text{raideur} \times d_c \times \vec{n}_{(A,B,C)} \times \alpha}{\text{visco}}$$
$$B = B - \frac{\text{raideur} \times d_c \times \vec{n}_{(A,B,C)} \times \beta}{\text{visco}}$$
$$C = C - \frac{\text{raideur} \times d_c \times \vec{n}_{(A,B,C)} \times \gamma}{\text{visco}}$$

Où α, β, γ , sont les coordonnées barycentriques de H le projeté du point haptique sur le polygone en contact (A,B,C).

Le modèle local



- Le modèle local du patient distant est utilisé pour calculer le retour d'efforts au KHz.
- Les objets 3D sont déformable et leurs caractéristiques mécaniques: viscosité, raideur, et masse sont paramétrables.



Le modèle local



Résultats qualitatifs des expériences

Ces tests ont été accomplis en boucle local, c'est à dire sans information provenant du poste patient afin de ressentir uniquement la modélisation du retour d'efforts.

Le toucher sur:	des sommets	un polygone	un polygone et son voisinage
Rendu Haptique	Discontinu	Confortable	Naturel
Utilisation	Facile	Très facile	Très facile
But	Pour la sélection de sommets	Gestes	Gestes fins
Conclusion	Imprécis	Précis	Réaliste

Les frottements



→ La mise en place des frottements tangentiels dans le modèle permet à l'utilisateur de ressentir de manière réaliste certains frottements notamment lors du mouvement de becquet.

→ Algorithme des frottements

⇒ Soit $cFriction$ le coefficient de friction statique, il est par défaut égal à 2, soit F la force calculée au point de contact, soit G la position dans l'espace du point haptique, et soit G_{prec} la position précédente du point haptique dans l'espace.

$$\left[\text{Si } \|\vec{F}\| < cFriction \times \|\overrightarrow{G_{prec}G}\| \text{ alors } \vec{F} = \vec{F} - cFriction \times \|\overrightarrow{G_{prec}G}\| \right]$$

Les frottements: mouvements de becquets



Remote scan examination:
Haptic Command Station

Connect

Disconnect

Stiffness



Viscosity

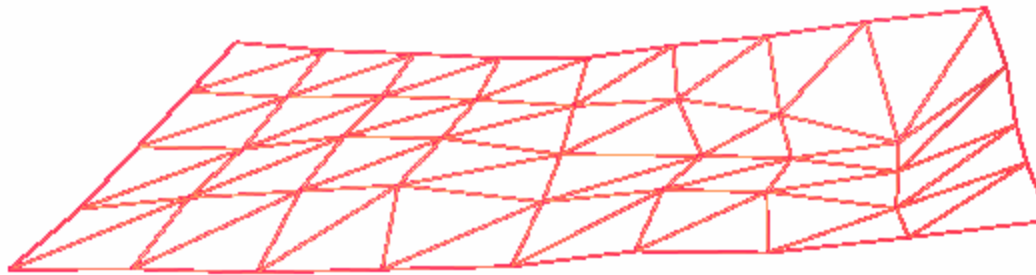


Scale



Quit

Selection haptique d'un objet: appuyez sur les touches SHIFT+h



Gesture zone

Probe

Probe&image

Add polygons

Initial model

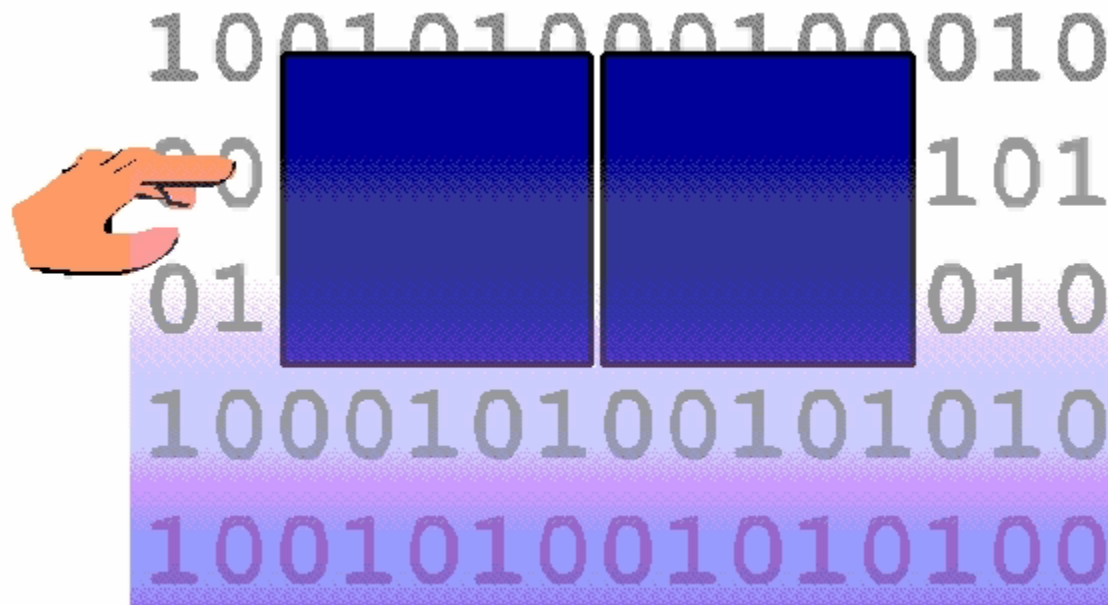
Sticked probe

Calibration

AutoScale

Move

Le transport des gestes

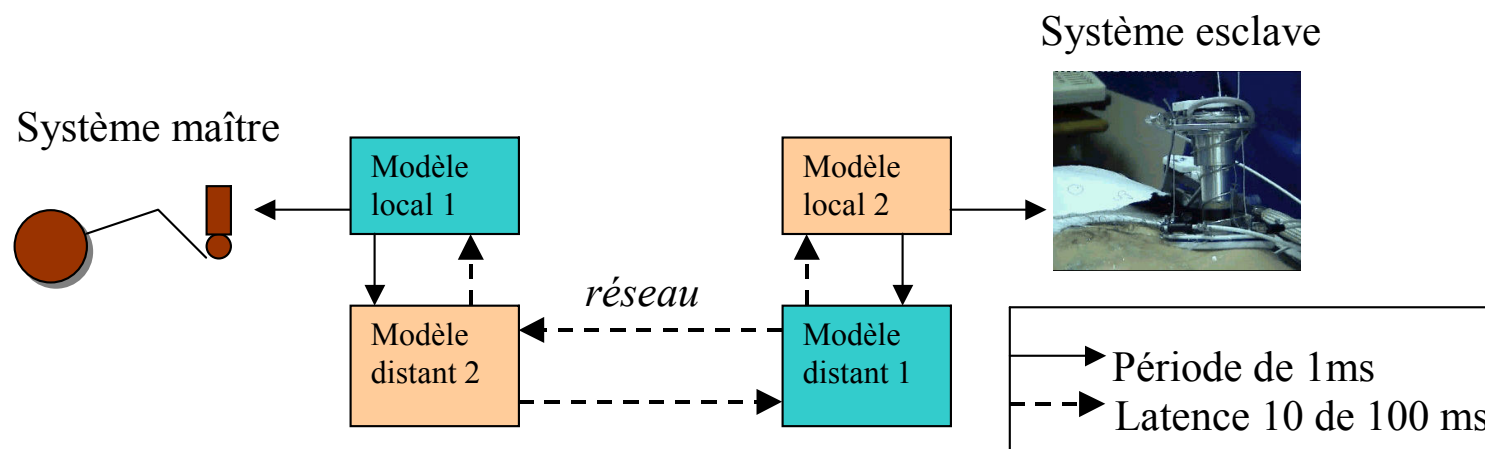


- Le télégeste est l'accomplissement d'un geste à distance.
- La télé-échographie est un cas de toucher statique, avec un capteur de pression qui permet de donner en retour la pression exercée sur le corps du patient éloigné.

Le transport des gestes



- Pour atteindre une bonne perception sensorielle de la scène éloignée, il est nécessaire d'utiliser un objet 3D : le modèle local, pour construire une représentation haptique, et visuelle.
- Chaque scène est dupliquée sur les deux sites connectés.
- Sur chaque machine une boucle locale est établie, et les données sont extraites et envoyées via le réseau à un rythme plus bas.



Le modèle distant



- Le modèle distant regroupe et mémorise les données fournies par le réseau de ce qui se passe au distant.
- Le modèle distant est nourri par les messages du réseau.
- Le modèle distant alimente le modèle local.

- Les données haptiques sont échangées directement dans l'espace des signaux temporels.

Evaluation du flux haptique



→ **Equation 1 Evaluation du nombre maximum de points à coder**

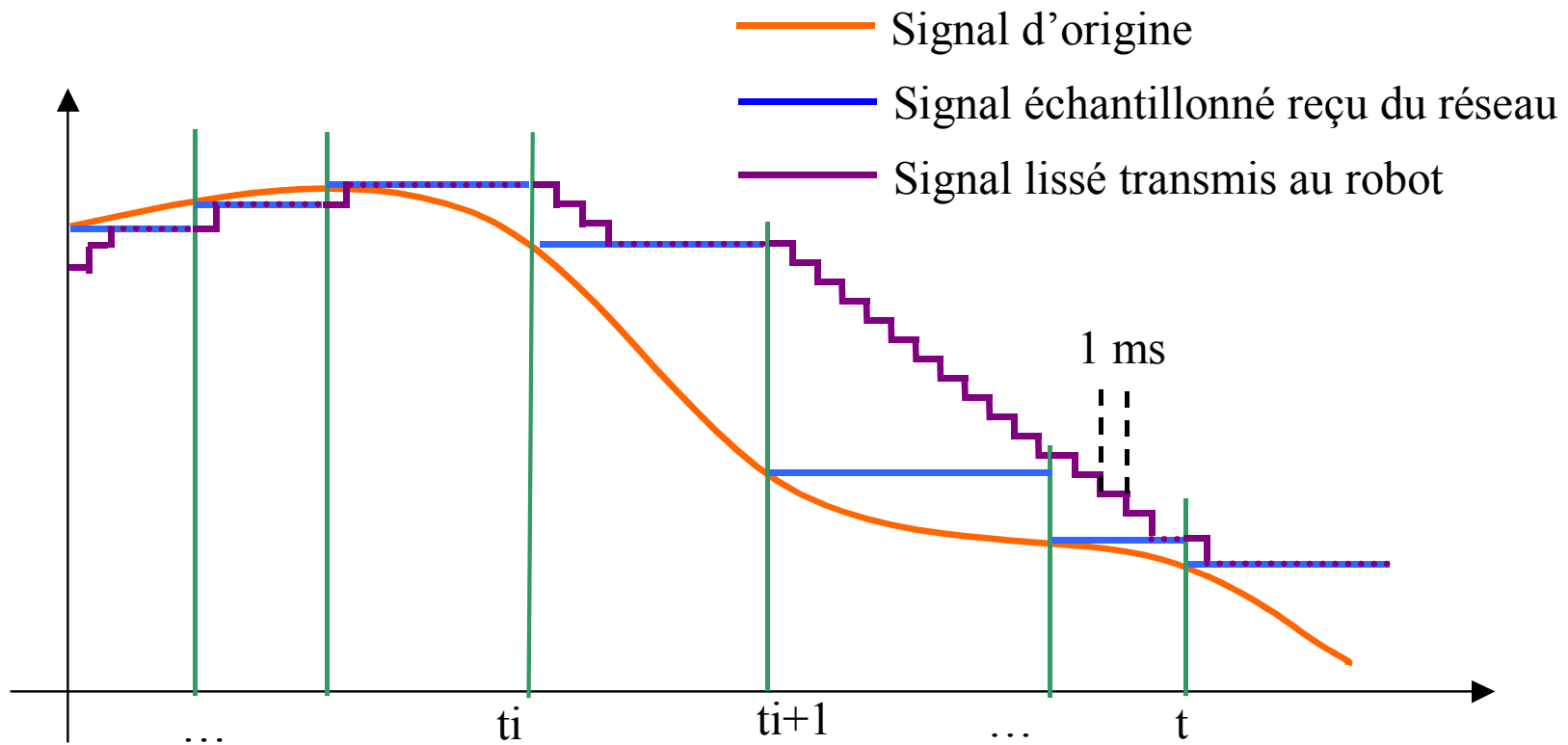
$$\frac{\text{ambitus maximale}}{\text{précision}} = \text{nombre maximum de points à coder} \in D^3$$

où D^3 est l'espace de travail

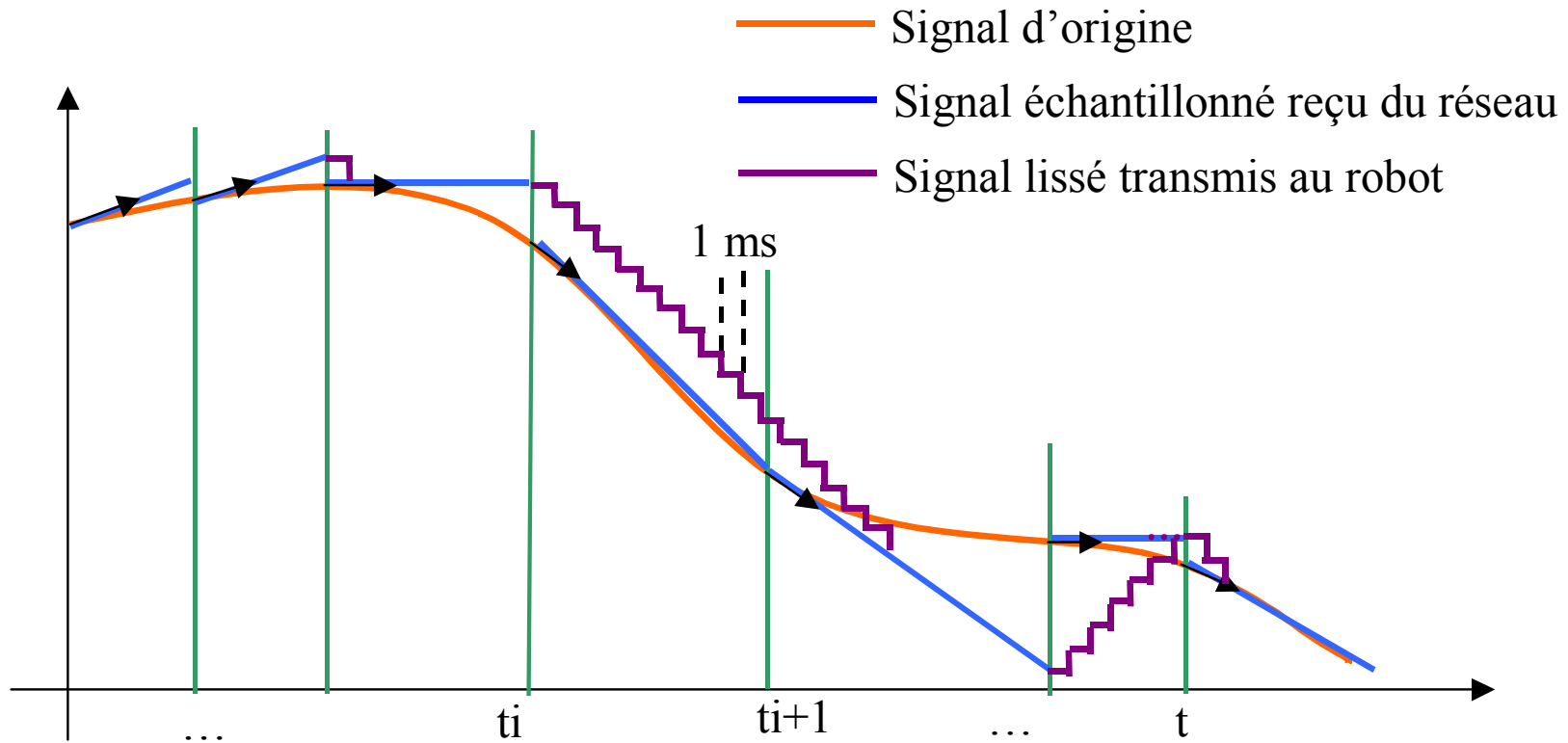
→ **Equation 2 Taille limite des messages**

$$\frac{\text{débit du réseau}}{\text{période d'échantillonnage}} = \text{taille maximale des messages}$$

Principe de la prédiction d'ordre 0



Principe de la prédiction d'ordre 1

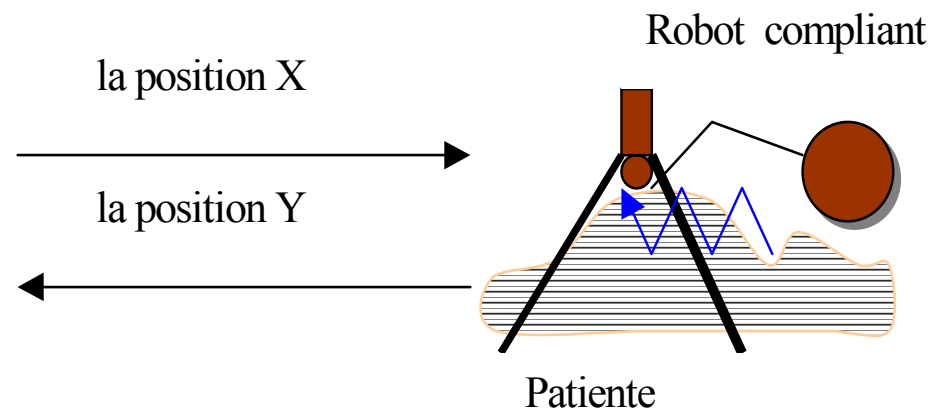
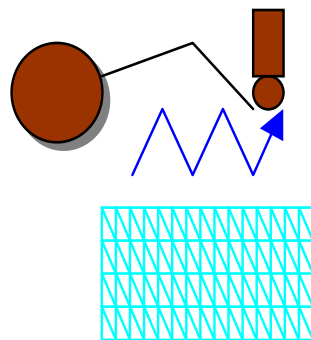


Le télé-calibrage statique du mannequin virtuel au début de l'examen



- L'expert procède à un balayage sur son poste maître afin de faire tendre le maillage de départ vers celui de la patiente de corpulence variable et à différents stades de sa grossesse.
- Sous le geste, les sommets du maillage vont se placer aux bonnes positions et calibrer correctement la patiente.
- Ce télé-calibrage utilise le mode d'asservissement en positions

Maître Ph1: le balayage





Un seul mannequin virtuel ajustable suffit

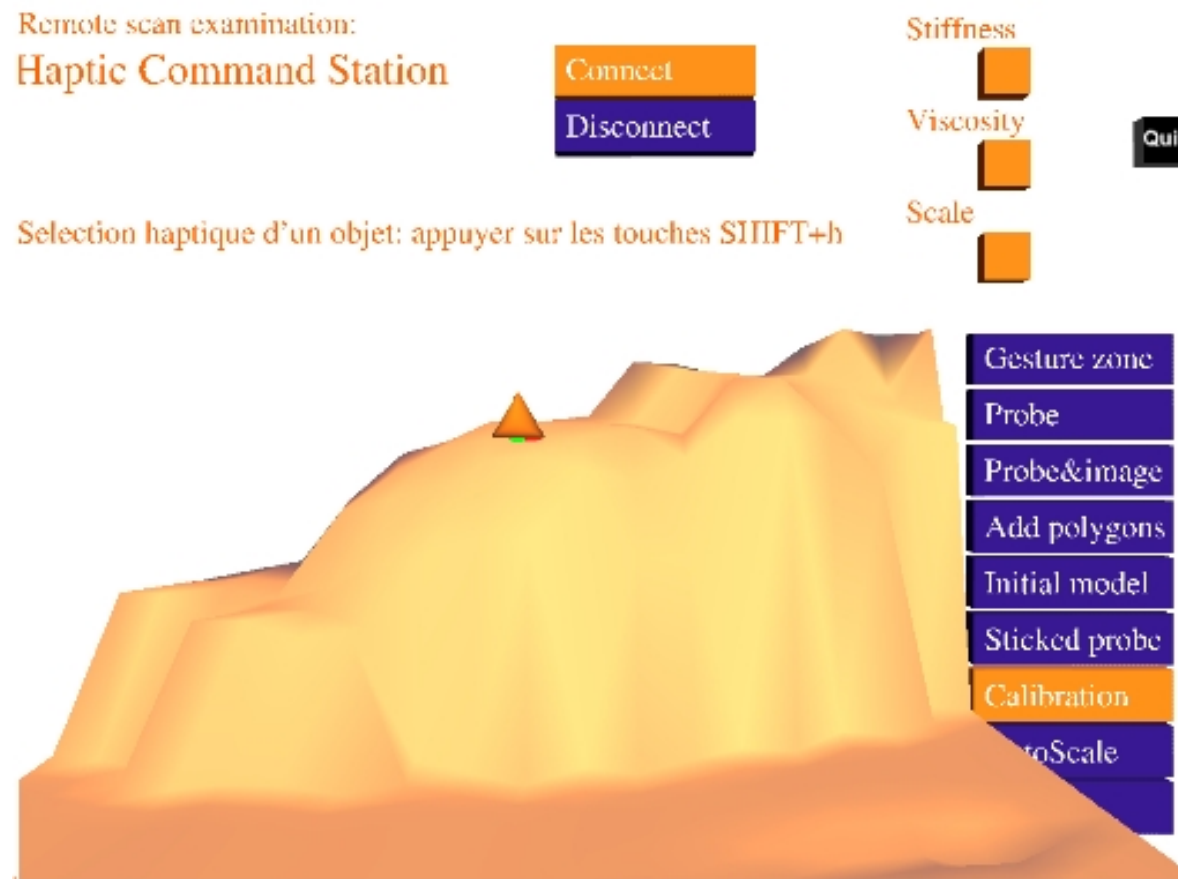
Le télé calibrage utilise le système de télé palpation pour permettre la construction 3D du maillage du modèle local de la patiente distante sans alourdir le système distant par la présence et la manipulation d'un capteur de position.

- Cette méthode permet d'ajuster le mannequin virtuel à la corpulence ou au stade de la grossesse de la patiente.
- Cette méthode utilise le flux haptique pour approcher la forme 3D distante.
- Le manipulateur est situé au poste maître et il contrôle en temps réel le télé-calibrage avec un retour d'efforts pour l'aider dans son geste de balayage à distance de la forme 3D.
- En comparaison avec une méthode utilisant un capteur de position le télé calibrage utilisant le flux haptique s'effectue en temps réel.

Résultats



→ Le temps moyen pris pour réaliser un télé calibrage est de trois minutes.



Le télé-calibrage dynamique en temps réel



- Cette méthode permet de:
 - ⇒ palper un objet distant dont les caractéristiques mécaniques évoluent au cours du temps.
 - ⇒ sentir l'objet distant tout en recalculant en temps réel son modèle mécanique.

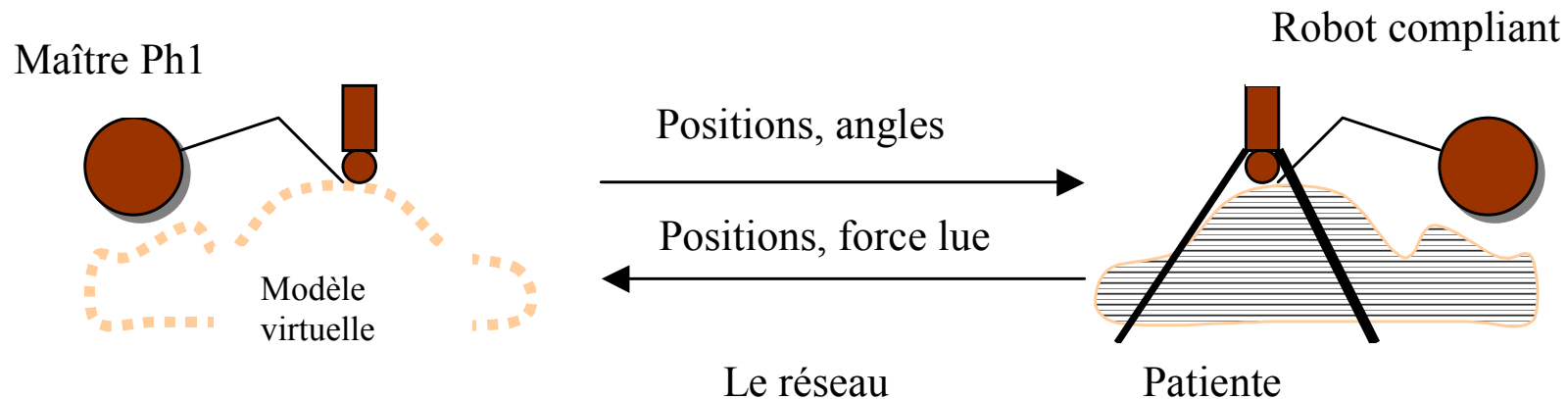
- Cette méthode utilise le flux haptique pour approcher le modèle mécanique de la forme 3D distante.

- Le manipulateur est situé sur le poste maître et le télé-calibrage dynamique se fait automatiquement lors du télé service.

Grandeurs échangées



- Le télé-calibrage dynamique du modèle mécanique du mannequin virtuel se fait de manière automatique pour l'expert médical. Cette méthode lui permettra de sentir à distance le fœtus ainsi que ses mouvements, les côtes, les os du bassin de la patiente.
- Il sera utilisé dans le mode "examen", une fois réalisé complètement le télé-calibrage statique.



Le télé-calibrage dynamique: raideur et viscosité



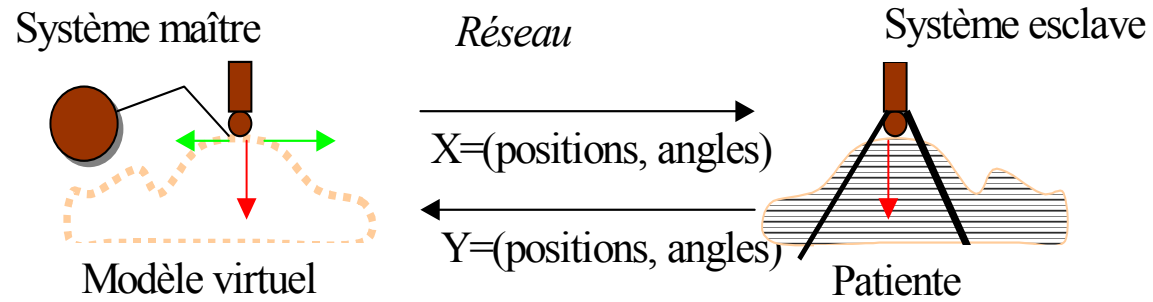
- Le coefficient de raideur et celui de viscosité vont être ajustés dynamiquement et en temps réel: c'est le procédé du télé-calibrage dynamique
- La raideur est calculée à partir de la force lue sur le poste distant, et par la variation d'altitude dans le repère de la vraie sonde:

$$k \propto \frac{F_{lue}}{\Delta Z_{Distant}}$$

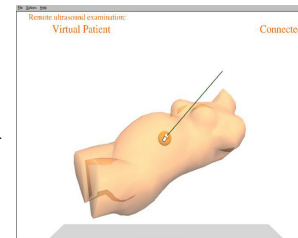
- Le déplacement selon l'axe de la sonde vérifie: $dZ_{Local}/dt \propto dZ_{Distant}/dt$
- La loi de l'action et de la réaction au point de contact entraîne que la composante de pression du vecteur de force local s'annule avec la pression lue au distant.
- La viscosité le long de l'axe de la sonde prend en compte à la fois les caractéristiques dynamiques de la peau et celles du robot compliant.

$$\lambda = \frac{F_{lue} - k \cdot Z_{Distant}}{dZ_{Distant} / dt}$$

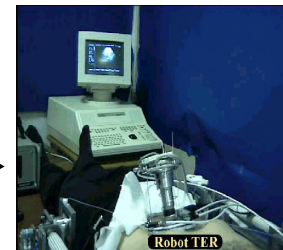
Expériences sur réseau Numéris



Expérience 1



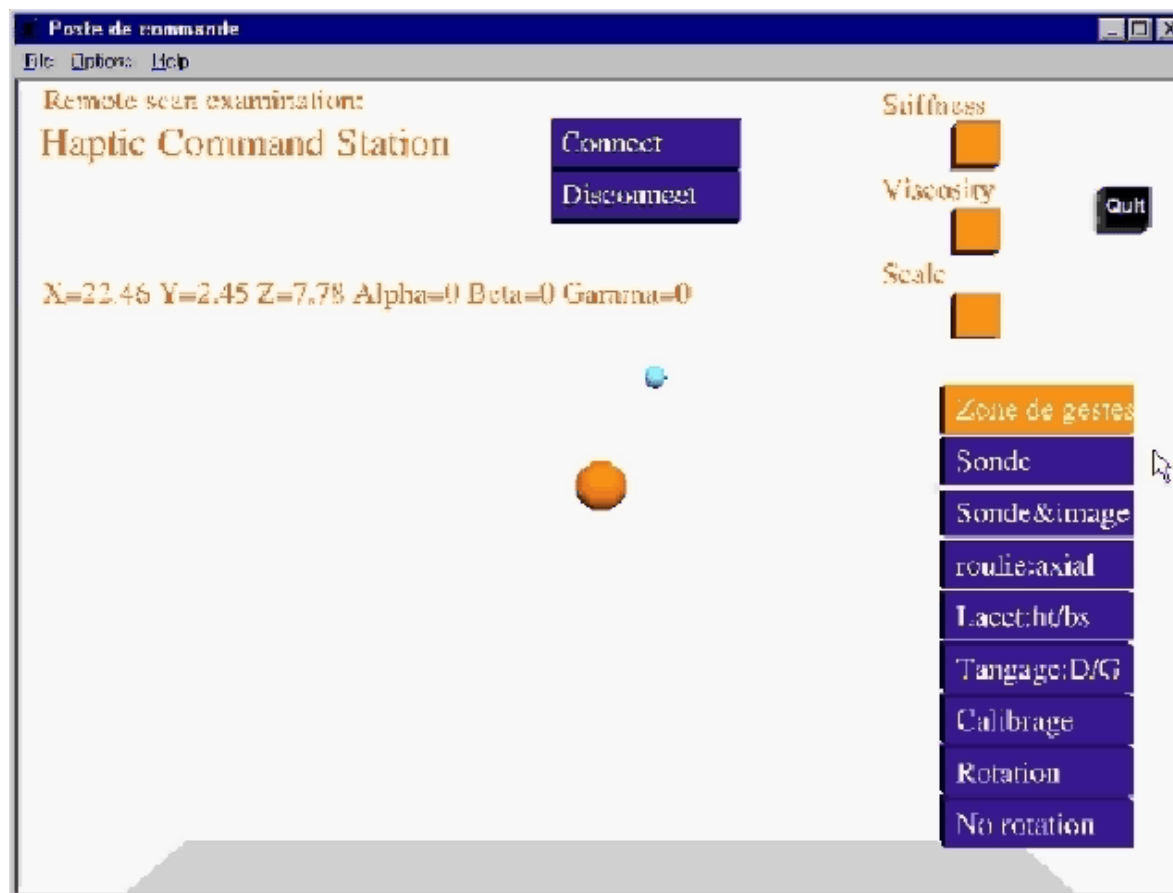
Expérience 2



Expérience 1: la patiente virtuelle



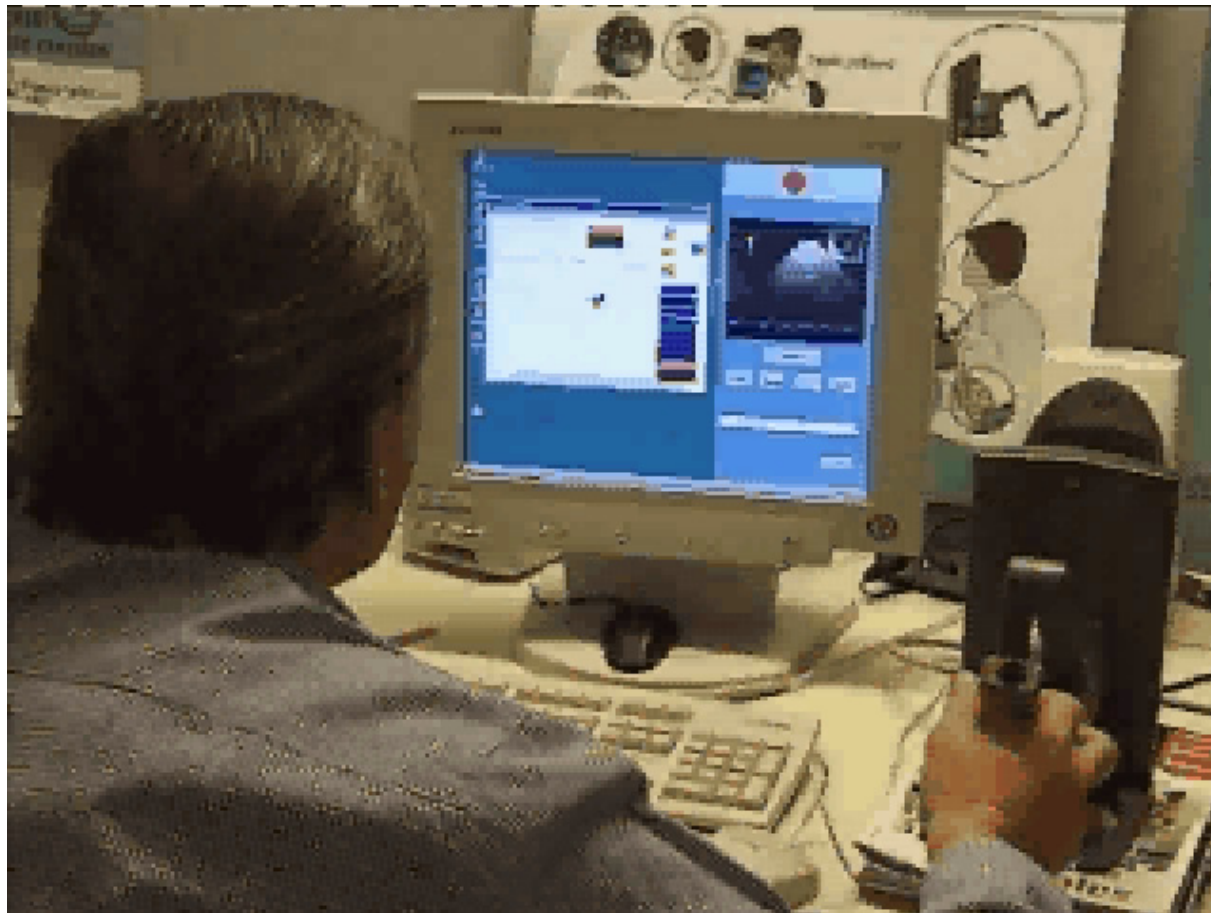
Le poste de commande, côté du médecin expert, envoie ses ordres de positions et reçoit la position du robot porte sonde distant ainsi que les informations de pression exercée sur l'abdomen de la patiente virtuelle.



Expérience 2: le robot TER



MD. Marc Althuser contrôle à distance la sonde en ressentant un retour d'efforts, il voit sur l'écran les images échographiques. La vraie sonde bouge sur l'abdomen du patient.



Résultats des expériences de télé geste sur Numéris & avec un codage prédictif du geste d'ordre 0



Période d'échantillonnage	10 ms	100 ms	250 ms	500 ms
Fréquence	100Hz	10Hz	4Hz	2 Hz
rendu haptique	très bon	bon	quelques vibrations	quelques vibrations et oscillations
Contrôle	naturel	réduit en terme de vitesse de gestes	difficile	très difficile
Conclusion	réaliste	réaliste des gestes lents	nécessité d'extrapolateurs plus fins	nécessité d'extrapolateurs plus fins

Résultats



Les expériences ont tout d'abord été menées sur la patiente virtuelle et ensuite avec le robot TER:

→ Validation des gestes sur la patiente virtuelle:

- ⇒ Bristol – UK (système maître – expert médical) vers Meylan – France (système esclave – patiente virtuelle)
- ⇒ Paris (système maître – expert médical) vers Meylan – France (système esclave – patiente virtuelle)
- ⇒ Meylan – France (système maître – expert médical) via Meylan – France (système esclave – patiente virtuelle)

→ Validation du calibrage statique:

- ⇒ Bristol – UK (système maître – expert médical) vers Meylan – France (système esclave – patiente virtuelle)
- ⇒ Meylan – France (système maître – expert médical) via Meylan – France (système esclave – patiente virtuelle)

→ Application au robot TER pour la validation médicale

- ⇒ Meylan – France (système maître – expert médical) via Grenoble (système esclave – vrai patient ou phantom médical)



Conclusion



Les expériences montrent que:

- Les gestes lents sont possibles sans limite en rotation et en translation
- Les gestes traditionnels sont possibles
- Le poste de commande procure une immersion
- Les manipulateurs prennent facilement en main le poste de commande
- Il y a un intérêt pour l'apprentissage de gestes: possibilité d'enregistrement des gestes - positions et pression synchronisées avec les images échographiques

Conclusion



Mon apport spécifique sur ce projet a été plus spécifiquement:

- Le toucher d'un maillage avec l'introduction de la notion de voisinage pour le geste lié à l'examen échographique
- Le télé calibrage statique de la surface de travail pour la patiente distante
- La notion de télé calibrage dynamique pour l'identification du modèle mécanique en temps réel
- L'implémentation du poste de commande haptique dans le télé-service de télé-échographie
- Les différents tests de télé-gestes sur réseaux Numéris et sur réseau LAN.

Merci!



Je remercie tout spécialement le docteur Marc Althuser et ses patientes, le professeur Jean-Marc Ayoubi du CHU de Grenoble et Marc Schneider interne au CHU de Grenoble, pour leur participation aux tests de l'ensemble du service de télé-échographie, pour la curiosité et l'enthousiasme qu'ils ont montrés.

Merci également aux partenaires du projet TER:

- ⇒ Sinters, Toulouse
- ⇒ Praxim, Grenoble
- ⇒ France-Telecom R&D, Meylan
- ⇒ TIMC-IMAG, UMR 5525 UJF & CNRS, Grenoble
- ⇒ LVR, EA 2078, IUT de Bourges
- ⇒ CHU de Grenoble
- ⇒ CHU de Tours