

VI.B- L'image dans la Réalité Virtuelle *

VI.B.1- Introduction

Si nous dressons un bref historique de la Réalité Virtuelle, nous relevons le brevet déposé en 1960 par Morton Helig aux Etats-Unis pour un casque de visualisation stéréoscopique intégrant deux écrans de télévision, une sonorisation stéréophonique et même des jets d'air pour modéliser des sensations de vitesse, de température et d'odeur. Cependant, ce système ne permettait que de visualiser de classiques films télévisés. En 1965, Ivan Sutherland améliore le procédé du casque de visualisation en le reliant à un "générateur de scènes", c'est-à-dire le premier dispositif de synthèse d'images. A partir de là, l'Université de Caroline du Nord et la NASA vont améliorer considérablement ces outils. Enfin, en 1985, l'entreprise VP-Research, créée par Jaron Lanier, va populariser le terme "Réalité Virtuelle", en introduisant dans le circuit commercial les casques de visualisation et les premières applications.

Nous voyons ainsi que l'Image à travers sa modélisation, sa synthèse et sa restitution, est une des composantes essentielles de la Réalité Virtuelle. Pour autant, il ne faut pas confondre Réalité Virtuelle et synthèse d'images. Si la première ne peut exister sans la seconde, la synthèse d'images ne propose aucune interactivité avec l'utilisateur, au contraire de la Réalité Virtuelle.

Une définition de la Réalité Virtuelle pourrait être "un ensemble d'outils logiciels et matériels permettant de simuler de manière réaliste une interaction avec des objets virtuels, modélisations d'objets réels".

Nous pouvons illustrer ceci par la photographie ci-dessous où nous retrouvons les divers composants :

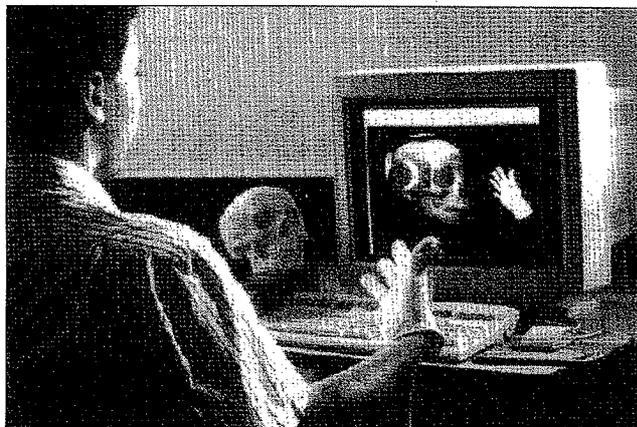


Figure VI.B.1 : Photo Epidaure avec masque : Une application potentielle en Réalité Virtuelle : le médecin peut planifier une opération de chirurgie craniofaciale en utilisant des outils de simulation. Le gant d'interaction lui permet de manipuler et découper le crâne virtuel. En utilisant un visiocasque, il pourrait visualiser l'environnement simulé.

* Cette partie du chapitre a été rédigée par Hervé DELINGETTE et Gérard SUBSOL.

elle *

nous relevons le casque de visualisation stéréoscopique, de tempé- le visualiser de océdé du casque -dire le premier oline du Nord et 985, l'entreprise ité Virtuelle", en et les premières

a synthèse et sa elle. Pour autant, i la première ne une interactivité

ble d'outils logi- raction avec des

nous retrouvons

VI.B.1 : Photo re avec masque : olication elle en Réalité e : le médecin nifier une on de chirurgie xciale en utilisant ls de simulation. d'interaction ret de manipuler per le crâne En utilisant casque, ait visualiser nnement simulé.

JBSOL.

- le dispositif matériel, qui comprend un ordinateur souvent muni d'une carte graphique accélératrice, et des dispositifs d'interaction, dont les plus spectaculaires sont le visiocasque et le gant d'interaction.
- le logiciel, qui permet, d'une part, de modéliser les objets virtuels, ici la représentation d'un crâne, de simuler leur comportement et de synthétiser leurs images, et d'autre part, de gérer les divers dispositifs matériels.

Dans cette partie, nous souhaitons nous focaliser sur les problèmes liés à l'Image. Nous pouvons considérer que l'Image intervient à trois niveaux :

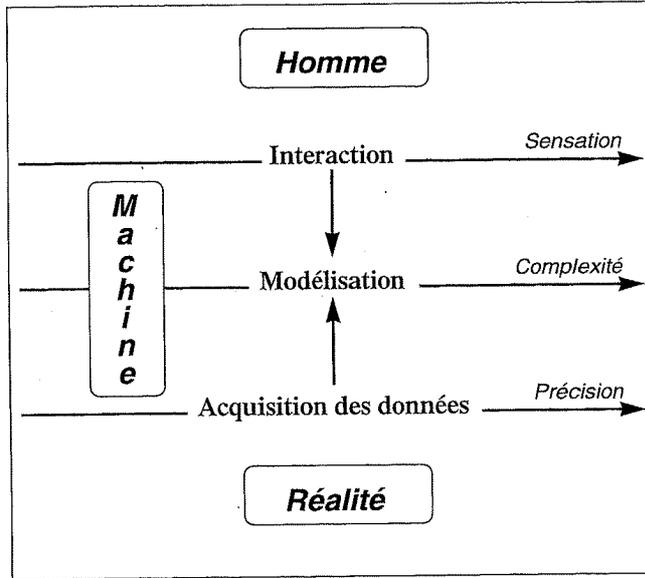


Figure VI.B.2 : Les 3 étapes de la Réalité Virtuelle entre les mondes réel et virtuel. Un dispositif de Réalité Virtuelle peut se décomposer en trois niveaux : l'acquisition des données du monde réel, leur modélisation en objets virtuels et l'interaction entre ces derniers et l'utilisateur.

- l'acquisition des données : afin de construire les objets virtuels, il est nécessaire de pouvoir acquérir les données du monde réel, en particulier à partir de dispositifs prenant des images bidimensionnelles (caméras vidéo) ou tridimensionnelles (imagerie médicale). Le but est d'obtenir les informations les plus précises possible.
- la modélisation : il faut simuler les objets réels, en tout premier lieu leur géométrie, mais aussi leur comportement physique, afin de pouvoir synthétiser l'image de l'objet virtuel avec toute sa complexité. La synthèse à proprement parler de l'image s'effectue par des algorithmes classiques, qui sont, en général, directement codés dans les cartes graphiques accélératrices.

- l'interaction : l'image présentée à l'utilisateur doit donner une sensation de réalisme, ce qui nécessite une visualisation stéréoscopique. De nombreux dispositifs (visiocasques, lunettes) sont disponibles commercialement.

VI.B.2- L'acquisition des données

La vision nous permet de nous repérer dans le monde réel et d'acquérir la plupart des informations à distance sur les objets qui nous entourent. Aussi, beaucoup de systèmes d'acquisition de données utilisent l'image pour fournir les données nécessaires à la modélisation des objets réels.

- La reconstruction stéréoscopique à partir de deux images vidéo. Deux caméras vidéo légèrement décalées prennent deux images de la même scène. Si nous pouvons déterminer quel point de la seconde image correspond à quel point de la première image et si nous connaissons précisément les caractéristiques optiques des deux caméras (en particulier, leurs focales) ainsi que leurs positions relatives, il est très facile d'en déduire la profondeur des points de la scène.

Cependant, si le principe est très simple puisqu'il reprend la perception stéréoscopique de l'œil humain, l'automatisation d'un tel processus se heurte à deux problèmes :

- La calibration des caméras, c'est-à-dire la détermination très précise de leurs paramètres optiques. Les valeurs fournies par les constructeurs ne sont que des moyennes pas assez précises et qui peuvent varier (par exemple, dans le cas d'un zoom). Une des solutions est alors d'utiliser des mires de calibration, c'est-à-dire des objets dont les dimensions sont parfaitement connues et dont l'observation va permettre de trouver les paramètres des caméras. Ce même dispositif peut être utilisé pour définir très précisément les positions des caméras.

L'étape de calibration limite considérablement la généralité du dispositif car, en pratique, à chaque fois que celui-ci est mis en marche, il faudra l'initialiser en plaçant la mire, et suivre un protocole assez lourd, qui ne peut être correctement accompli que dans l'environnement d'un laboratoire.

- La mise en correspondance automatique entre les points des deux images. Les algorithmes très complexes utilisent la corrélation (la comparaison entre des portions d'images) ou la détection de caractéristiques de l'image (points, contours).

L'opération peut être facilitée en projetant un maillage régulier sur les objets, et dans ce cas, la mise en correspondance peut s'effectuer sur les points d'intersection.

A ces deux principales difficultés s'ajoutent aussi les distorsions optiques des caméras, qui sont dues soit à des défauts dans les lentilles, soit à des différences de sensibilité au niveau des capteurs de numérisation. Cela nécessite alors de les modéliser en étudiant, par exemple, la déformation d'une grille régulière.



Reco.
été fou

Nous vo
et avec le quel
d'un traitemen
objets sont sir
caméras vidéc
tiellement d'u

- Triang
lumine
perme
Conna
de la c
contou
fusion
l'imag

Il s'agit,
d'environ 1 m
assez lent (30
volume limité.
mérite d'être c

La résolt
l'objet. Cepen
fuse, comme le

une sensation de
e. De nombreux
cialement.

l'acquérir la plu-
Aussi, beaucoup
rnir les données

déo. Deux camé-
même scène. Si
correspond à quel
nt les caractéris-
icales) ainsi que
profondeur des

a perception sté-
e heurte à deux

précise de leurs
eurs ne sont que
exemple, dans le
nires de calibra-
ment connues et
des caméras. Ce
ent les positions

du dispositif car,
a l'initialiser en
tre correctement

es deux images.
omparaison entre
l'image (points,

régulier sur les
r sur les points

ons optiques des
s différences de
ors de les modé-



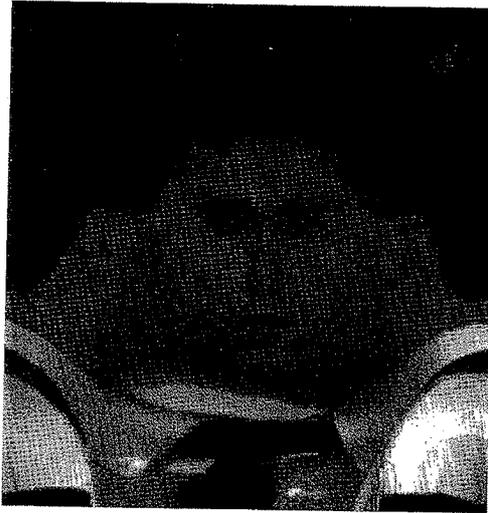
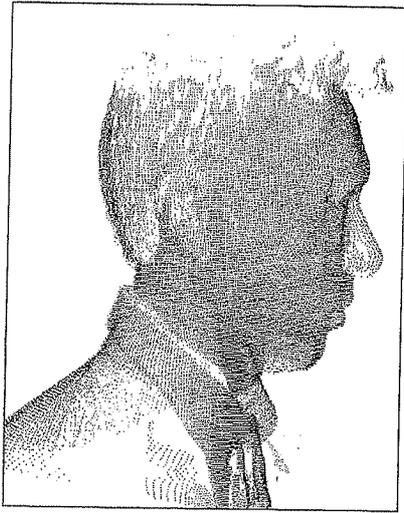
*Figure VI.B.3 : Robotvis : 2 images stéréo + reconstruction 3D.
Reconstruction d'un visage par stéréovision. Ces résultats très précis ont
été fournis par F. Devernay du projet Robotvis de l'INRIA Sophia-Antipolis.*

Nous voyons que la reconstruction stéréoscopique est un processus complexe et avec lequel il est difficile d'avoir des grandes fréquences d'acquisition dans le cas d'un traitement en temps réel. Son avantage réside dans sa parfaite passivité (les objets sont simplement observés et la scène n'est pas perturbée) et le fait que deux caméras vidéo suffisent comme matériel d'acquisition. Actuellement il s'agit essentiellement d'un outil de laboratoire, mais qui peut fournir d'excellents résultats.

— Triangulation laser : un plan laser pivote autour de l'objet, formant une trace lumineuse sur les bords de l'objet. Une caméra vidéo légèrement décalée permet d'acquérir l'image de la trace et donc le contour de l'objet. Connaissant, d'une part, la position du plan laser et, d'autre part, la position de la caméra, nous pouvons facilement en déduire les coordonnées du contour. Après un tour complet, nous pouvons donc reconstituer l'objet en fusionnant les contours. De surcroît, la caméra vidéo peut aussi acquérir l'image correspondant au contour et donc obtenir la texture de l'objet.

Il s'agit, bien entendu, d'un dispositif matériel encombrant (le bras de rayon d'environ 1 mètre, portant l'émetteur laser et la caméra, tourne autour de la scène), assez lent (30 secondes pour le tour complet), ce qui le limite aux objets fixes de volume limité. Cependant, même s'il est aussi relativement cher (100 kF), il a le mérite d'être commercialisé (société Cyberware).

La résolution est très bonne et, de surcroît, nous obtenons aussi la texture de l'objet. Cependant, l'acquisition peut être mauvaise aux endroits de réflectance diffuse, comme les cheveux.



*Figure VI.B.4 : Données Cyberware avec texture.
Acquisition d'un visage par le dispositif Cyberware.
Le nuage de points à gauche fournit la position des points de la grille de droite,
sur laquelle a été plaquée la texture.*

Les deux dispositifs précédents sont fondés sur une image bidimensionnelle et ne peuvent donc acquérir les parties de l'objet cachées par d'autres. Une solution consiste à fusionner plusieurs acquisitions, mais cela pose de gros problèmes de recalage entre toutes ces données. D'autre part, ces deux dispositifs fournissent la géométrie de l'objet, mais ne renseignent pas sur sa physique comme, par exemple, son type de matériau. La modélisation physique devra se fonder sur d'autres types d'acquisition.

– Images volumiques médicales. Les images obtenues par scanographie et Imagerie par Résonance Magnétique sont d'un tout autre type, car elles sont véritablement volumiques (tous les points du volume de l'objet sont acquis) et fournissent des indications physiques précises (l'intensité en un point dépend de paramètres physiques comme l'absorption aux rayons X dans le cas de la scanographie, ou la densité de protons pour l'IRM).

Les images sont extrêmement précises (jusqu'à 256 x 512 x 512 voxels) et, par là-même, très volumineuses en mémoire informatique et complexes à traiter et gérer. L'acquisition reste actuellement assez longue (une dizaine de minutes) et ne convient que pour les structures fixes.

Enfin, notons certaines limitations sur le type de matériau qui peut être ainsi acquis : certains matériaux sont invisibles, d'autres engendrent des artefacts. Enfin, la scanographie n'est pas tout à fait un dispositif passif, car elle émet d'importantes doses de rayons X.

Dans l'...
ral, qu'à une
donc dissoci
mise au poi
médicales. L
il est possibl
physiques de
l'os qui est ri

Ces im
médical, mai
scanographié

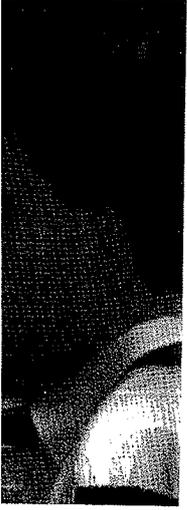


Figur

VI.B.3- L

Les obje
préalablement

– géomé
Celle-c
points :
angles
thèse d
de tous
globale
texture
les strat



le de droite,

dimensionnelle et
es. Une solution
os problèmes de
fs fournissent la
ne, par exemple,
sur d'autres types

scanographie et
type, car elles
de l'objet sont
(l'intensité en
absorption aux
le protons pour

512 voxels) et,
exes à traiter et
minutes) et ne

peut être ainsi
artefacts. Enfin,
et d'importantes

Dans l'image volumique acquise, nous ne souhaitons nous intéresser, en général, qu'à une partie (par exemple, au cerveau dans une image IRM de la tête). Il faut donc dissocier cette structure des autres : c'est le processus de segmentation, dont la mise au point occupe une grande partie des chercheurs en traitement d'images médicales. La segmentation se fonde essentiellement sur l'intensité dans l'image, il est possible de construire des modèles non seulement géométriques, mais aussi physiques des structures : à partir d'une scanographie de la tête, nous segmenterons l'os qui est rigide et la peau qui peut être déformée.

Ces images volumiques ne sont plus utilisées exclusivement dans le milieu médical, mais aussi dans l'industrie. Des moteurs automobiles sont, par exemple, scanographiés pour pouvoir être étudiés sans les démonter.

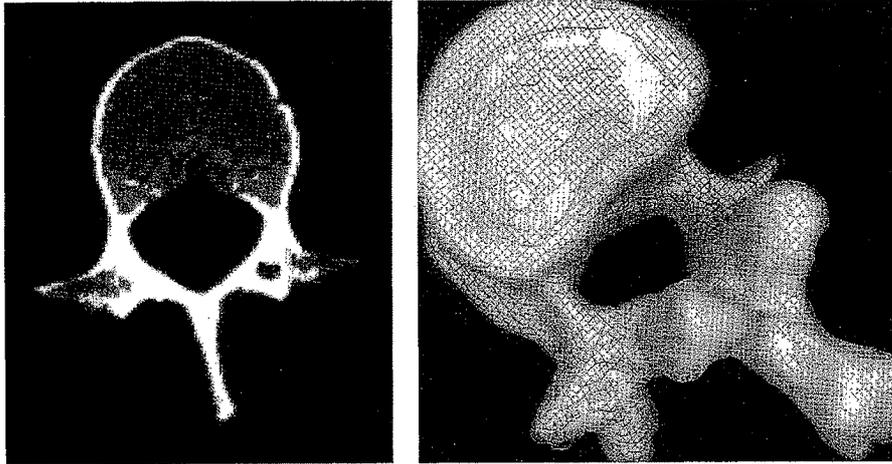


Figure VI.B.5 : Reconstruction tridimensionnelle d'une vertèbre (à droite) à partir de coupes scanographiques (à gauche).

VI.B.3- La modélisation

Les objets virtuels vont être construits à partir des données du monde réel préalablement acquises. Il s'agit d'effectuer une double modélisation :

- géométrique : c'est-à-dire reconstituer la forme géométrique de l'objet. Celle-ci sera définie par une liste de facettes dont les sommets seront des points tridimensionnels. En définitive, ces facettes seront redivisées en triangles qui seront envoyés dans la carte graphique accélératrice pour la synthèse des images. Nous devons aussi définir la couleur de l'objet (la couleur de tous les sommets des facettes), son matériau (qui regroupe les propriétés globales de réflectance - mat, brillant, spéculaire - et de transparence) et sa texture (qui définit l'aspect détaillé de sa surface - les veinures du marbre ou les strates du bois -).

- physique : il s'agit de définir ses caractéristiques physiques (par exemple, sa rigidité ou son élasticité), afin de pouvoir simuler son comportement. En fait, c'est la modélisation physique de l'objet qui va définir sa géométrie (mouvement d'un objet rigide par les équations de la dynamique, déformation d'un objet élastique sous l'action de forces de pression) ou ses propriétés (opacification d'un objet brillant quand on le heurte contre un autre).

Cette double modélisation exige donc, d'une part, une importante puissance graphique pour gérer et afficher la géométrie des objets, et aussi, d'autre part, une énorme puissance de calcul pour pouvoir simuler leurs comportements physiques.

VI.B.3.1- La modélisation géométrique

D'abord quelles peuvent être les structures de données qui permettent de modéliser les objets ? Les plus classiques sont :

- les grilles régulières (par exemple, les maillages rectangulaires). Cette structure de données est alors facile à programmer. De plus, nous pouvons bâtir une représentation continue à base de B-splines, qui s'appuie sur les points de cette grille discrète. Par contre, la grille régulière ne peut représenter tous les objets ; en particulier, ceux de topologie sphérique ne peuvent être représentés par un maillage rectangulaire (comment plaquer une grille sur une boule ?).
- les triangulations. Il s'agit de la représentation la plus naturelle, puisque les cartes graphiques accélératrices l'utilisent. La triangulation permet de représenter tous les types d'objet et il est possible d'obtenir une représentation continue à base de triangles de Bezier. Par contre, cette structure de données est difficile à gérer et tout particulièrement à modifier, car le nombre de faces et d'arêtes par sommet n'est pas constant.

Ces deux types de structures sont en fait très commodes quand :

- les objets sont créés artificiellement par des logiciels modeleurs interactifs. L'utilisateur utilise alors des primitives géométriques simples (souvent à base de polygones et de polyèdres) particulièrement bien paramétrées par ces structures.

Cependant, dans la réalité, les objets sont beaucoup plus complexes : dans une application médicale de la Réalité Virtuelle, un crâne à une topologie compliquée avec beaucoup de trous, ce qui exclut l'utilisation de grilles régulières.

- les objets ne changent pas de topologie. Par exemple, si nous souhaitons créer un trou (perçage) dans un objet, il faut modifier sa structure : enlever des points et les arêtes qui lui sont associées, modifier les facettes. Tout ceci s'avère très compliqué quand la structure de données n'est pas régulière, comme dans le cas des triangulations (un sommet joint un nombre variable d'arêtes et de facettes).

En fait, dans la plupart des bibliothèques logicielles de Réalité Virtuelle qui sont commercialisées (WorldToolkit, Clovis) ou disponibles (MRToolkit), les

interactions e
tion du conta
grilles réguli
des objets vir
réalistes (défi
données sont
le dernier par:

De même
objets. Or, da
avons besoin
me entier. Il fa
lement modifi
les surfaces.

Enfin, pr
géométrique à
mensionnels :

- la recon
te pour
alors :
être cré
importa

- les moc
une sph
vers les
modélis
qualité

Nous pou
pour réduire le

VI.B.3.2- La

Un des pr
des objets afin
alors :

- l'obteni
physique
vent être
homogèr

- la modél
calcul de
rapide, p
quel obje
précisém
Elle dépe

interactions entre les objets, tous considérés comme rigides, se limitent à la détection du contact. Dans ce cas simple, suffisant pour les applications de CAO, les grilles régulières ou les triangulations peuvent être suffisantes. Mais pour gérer des objets virtuels construits à partir de données complexes avec des interactions réalistes (déformation, modification de la topologie), de nouvelles structures de données sont nécessaires. Nous en proposons une, les maillages simplexes, dans le dernier paragraphe.

De même, ces bibliothèques n'offrent que des modélisations des surfaces des objets. Or, dans certaines applications comme la simulation de chirurgie, nous avons besoin de découper l'intérieur d'un objet et donc d'avoir modélisé son volume entier. Il faut donc une structure de données qui couvre le volume, qui soit facilement modifiable et qui soit compatible avec la structure de données représentant les surfaces.

Enfin, présentons brièvement quelques méthodes pour bâtir la modélisation géométrique à partir des données, qui sont en général un ensemble de points tridimensionnels :

- la reconstruction : il s'agit de relier entre eux les points de manière cohérente pour bâtir, en général, une triangulation. Deux problèmes apparaissent alors : d'une part, il existe des ambiguïtés, et des arêtes erronées peuvent être créées, et d'autre part, le nombre de facettes engendrées peut être très important (en particulier, dans l'algorithme du "Marching Cubes").
- les modèles déformables : une primitive géométrique simple (en général, une sphère), composée d'un nombre de facettes raisonnable, est déformée vers les points de données et les interpole. A la fin, nous obtenons une modélisation géométrique au nombre de facettes limité. Bien entendu, la qualité de l'interpolation dépendra de celui-ci.

Nous pouvons aussi utiliser des programmes de simplification de maillage pour réduire le nombre de facettes.

VI.B.3.2- La modélisation physique

Un des premiers paramètres physiques à modéliser est sans doute l'élasticité des objets afin de pouvoir simuler leur contact. Quatre difficultés apparaissent alors :

- l'obtention des paramètres physiques. A chaque point de la modélisation physique, il va falloir donner une valeur d'élasticité. Or ces valeurs peuvent être très difficiles à obtenir, en particulier à l'intérieur d'un objet non homogène.
- la modélisation de la force de contact. Elle nécessite en premier lieu le calcul des intersections entre les objets. Celui-ci doit être extrêmement rapide, puisqu'à chaque itération de la simulation, il faut pouvoir trouver quel objet est en contact avec quel autre. De surcroît, comment calculer précisément la force de contact entre un doigt et une balle de caoutchouc ? Elle dépend de plusieurs paramètres comme la dynamique du doigt, la force

musculaire, la surface de pression, la surface de la balle, etc, paramètres qui sont tous échantillonnés et souvent avec une précision limitée.

- Les formules de la modélisation physique. Une fois que la force de contact a été calculée, comment modéliser le comportement du matériau ? Il existe des formules en élasticité linéaire parfaitement établies, mais qui sont limitées. Quand nous rentrons dans le domaine de la plasticité, des discontinuités rendent la modélisation très difficile et des changements de topologie dans la géométrie peuvent alors intervenir,
- le calcul du résultat. La première idée est d'utiliser la méthode des éléments finis pour résoudre le problème de la modélisation du contact. Mais cela nécessite d'avoir créé un maillage volumique. Or ce maillage (qui doit être constitué d'éléments identiques - triangles, tétraèdres -) ne correspond pas forcément au maillage géométrique, ce qui pose des problèmes de cohérence entre les échantillonnages géométrique et physique. D'autre part, la résolution numérique des schémas par éléments finis peut être longue s'il y a beaucoup de points. Il peut alors être préférable d'utiliser des approximations ou alors de précalculer le maximum possible de résultats (surtout si les formules sont linéaires).

La modélisation physique dans les systèmes de Réalité Virtuelle reste encore du domaine de la recherche. Pourtant certaines applications, par exemple médicales, exigent des modélisations physiques très réalistes. De surcroît, les dispositifs de retour d'effort ne peuvent exister qu'à travers la physique des objets.

VI.B.3.3- La synthèse d'images

Nous avons une scène constituée :

- d'objets tridimensionnels. Chacun est modélisé par sa géométrie (une liste de facettes triangulaires), sa couleur, son matériau et sa texture,
- de sources d'éclairage. Chacune est modélisée par :
 - son type : source ponctuelle, infinie, directive (spot) ou non directive (ambiance),
 - sa couleur,
 - sa direction d'éclairage.

L'observateur regarde cette scène depuis une position avec une caméra définie par ses propriétés optiques :

- sa focale, qui va définir la projection de la scène sur l'écran, une focale infinie correspondant à une projection orthogonale,
- son champ de vision, qui va définir la portion visible de la scène (un cône centré sur la position de l'observateur). Le champ de vision peut aussi être limité en distance (que ce soit de près ou de loin).

Le but est de synthétiser sur l'écran l'image qu'il perçoit. Les écrans des systèmes de Réalité Virtuelle ont couramment une résolution de 1280 x 1024 pixels et de 16 millions de couleurs.

Nous

- la
très
du
coc
rap
loi.
arti

- la s
L'i
pos
les
sés

VI.B.3.3.1-

Elle p

i) R
le:
su

ii) El
la

iii) C
pc

iv) C
di
à c
co
les
sé,
so

- Les
et bl

- Cett
l'opt
diff
lumi
obje
sur t

v) P
d'
cc

Nous pouvons distinguer deux types de synthèse :

- la synthèse en temps réel. Le but est d'obtenir des images à une cadence très rapide (au moins 25 hertz) pour donner une impression de fluidité dans les applications de Réalité Virtuelle. Les algorithmes, en général codés sur les circuits spécialisés des cartes graphiques, doivent être très rapides et intègrent donc de nombreuses approximations par rapport aux lois physiques réelles. De ce fait, le résultat peut quelquefois paraître artificiel.
- la synthèse photoréaliste. Le réalisme est ici le critère le plus important. L'image peut donc nécessiter plusieurs heures de calcul, et il n'est donc plus possible d'interagir avec elle. C'est le domaine de la synthèse d'images pour les effets spéciaux ou la publicité. Deux algorithmes sont couramment utilisés : le lancer de rayons et la radiosité.

VI.B.3.3.1- La synthèse en temps réel

Elle peut se décomposer en 9 étapes:

- i) Recherche des objets situés dans le champ de vision de l'observateur. Seuls les objets qui peuvent apparaître dans l'image vont être traités dans la suite.
- ii) Elimination des facettes arrière. Les facettes dont la normale est opposée à la direction de visée de l'observateur ne peuvent être visibles.
- iii) Calcul des intersections des facettes avec les limites du champ de vision pour n'avoir plus que des facettes à l'intérieur.
- iv) Calcul de l'éclairement des sommets des facettes. L'éclairement, c'est-à-dire la couleur synthétisée, d'un sommet d'une facette est déterminé grâce à des formules d'éclairement local qui prennent en compte, d'une part, la couleur originale du sommet, le type de matériau de l'objet et, d'autre part, les sources de lumière. Le modèle de Bouknight, le plus couramment utilisé, combine un terme d'illumination ambiante et un terme de diffusion des sources de lumière directive :
 - Les calculs sont effectués pour les 3 intensités des composantes rouge, verte et bleue de l'image.
 - Cette formule n'est qu'une approximation assez grossière des lois de l'optique, car elle ne prend pas en compte le terme de réflexion ni ceux de diffusion ou de réfraction. Il n'y a donc aucune gestion des interactions lumineuses entre objets (comme un objet rouge qui illumine son voisin, un objet spéculaire qui en reflète un autre ou un objet qui crée une ombre portée sur un autre). Par contre, le calcul est très rapide.
- v) Projection sur l'écran. Connaissant les caractéristiques de la caméra d'observation, en particulier sa focale, les facettes avec leurs sommets colorés sont projetées sur l'écran.

vi) Ombrage de la facette. Il reste à colorier l'intérieur de chaque facette en fonction des éclairagements des sommets. La méthode de Gouraud, la plus communément utilisée, consiste à interpoler bilinéairement l'intensité en chaque pixel à partir des éclairagements des trois sommets.

Il s'agit ici aussi d'une approximation de l'éclairage (l'éclairage de chaque point intérieur devrait être calculé à l'étape iv)), qui accélère considérablement le processus. Cependant, il arrive qu'il apparaisse des défauts visuels dus à la discontinuité des dérivées des intensités dans deux facettes adjacentes.

vii) Elimination des parties cachées par la méthode du Z-buffer. A chaque pixel calculé sur l'image est associée la profondeur du point projeté. Si le pixel à calculer a une profondeur inférieure à celle du pixel qui a déjà été calculé, il le remplacera. A la fin du processus, nous avons donc éliminé toutes les parties cachées de la scène. Le Z-buffer peut aussi servir à approximer des effets de transparence en combinant les valeurs des points de diverses profondeurs qui se projettent sur le même pixel.

viii) Placage de texture. Le placage de texture est très important en réalité virtuelle, car il permet de rendre très réalistes des scènes très simples géométriquement. Ainsi, un cube composé de six faces sur lesquelles ont été plaquées des photographies, peut devenir une splendide maison avec des détails extrêmement fins. Or le processus de placage est très rapide, puisqu'il consiste à déformer un triangle texturé vers le triangle formé par la facette projetée par une simple interpolation linéaire (en tenant quand même compte de la profondeur de la facette).

La plupart des démonstrations spectaculaires de Réalité Virtuelle utilisent beaucoup de textures pour pallier la faible définition géométrique. En particulier, les stations de travail graphiques Silicon Graphics ont d'énormes capacités mémoire pour stocker les textures.

Néanmoins, dans certaines applications, il est impossible d'utiliser des textures :

- quand elles n'existent pas. Une texture est formée par la représentation des détails d'une surface plane. Or, dans certains cas, il n'est possible que d'avoir les photographies de surfaces gauches (par exemple, les représentations picturales sur les parois tourmentées d'une grotte) et il est alors très difficile de les rendre planes pour pouvoir les plaquer,
- quand la surface sur laquelle les plaquer est de topologie compliquée et, en particulier, si elle est non développable,
- quand la précision géométrique est fondamentale. Ainsi, dans les applications de simulation chirurgicale, les détails des organes doivent correspondre à de véritables facettes et non pas à un simple motif plaqué, car il faut pouvoir détecter et simuler le contact avec un outil.

ix) R
ci
et
C
m
(s
cr
tr
D

- le su
re, p
- la po
surfa
- le lis
voisi
plus
réfle
de ga
de tri
de te

VI.B.3.3.2- I

La syn
Virtuelle, ca
lents. Décriv

- le lar
neux
l'inve
pixel
(réfra
l'obje
laire).

Les im
les lois physi
contacts entre
me réside da
très difficile
rayons. Les i
trop nettes et

- la rad
entre
mique
comp
émet

ix) Réduction des problèmes d'échantillonnage. Du fait de la différence de précision existant entre la définition d'un objet dans l'espace tridimensionnel et la discrétisation liée à la résolution de l'écran, des défauts apparaissent. Ces défauts peuvent être dans chaque image (crénelage des arêtes, déformation des détails) ou n'apparaître que lors de l'animation des images (scintillement). De tels défauts peuvent être intolérables : par exemple, le crénelage variable des lignes représentant les rails dans un simulateur de train ou le clignotement de lumière dans un simulateur de vol nocturne. Diverses méthodes sont proposées pour diminuer ces artefacts :

- le suréchantillonnage : l'image est calculée à une résolution n fois supérieure, puis moyennée localement à la résolution de l'écran,
- la pondération : l'intensité de chaque pixel est pondérée en fonction de la surface des facettes qu'il représente,
- le lissage : l'intensité du pixel est lissée par pondération des intensités de ses voisins. Dans ces algorithmes, tout est fait pour que les calculs soient les plus rapides possible au prix d'approximations (pas d'ombres portées ou de réflexion, transparence limitée). Malgré tout, les cartes graphiques très haut de gamme ne peuvent gérer au maximum que quelques dizaines de milliers de triangles (ombrés par l'algorithme de Gouraud avec Z-buffer et placage de textures) pour des cadences de 25 hertz, ce qui est relativement faible.

VI.B.3.3.2- La synthèse photoréaliste

La synthèse photoréaliste est inutilisable dans les applications de Réalité Virtuelle, car elle est très longue, mais avec, en contrepartie, des résultats excellents. Décrivons brièvement les deux principales méthodes utilisées :

- le lancer de rayons : cette méthode consiste à suivre tous les rayons lumineux émis par la scène et arrivant sur l'oeil de l'utilisateur. En fait, c'est l'inverse qui est modélisé : un rayon part de l'oeil, traverse l'écran en un pixel et suit son chemin en appliquant les lois de Descartes de l'optique (réfraction, réflexion). Sur son trajet, il interagit avec les objets (il s'arrête, si l'objet est mat, le traverse, s'il est transparent, ou est réfléchi, s'il est spéculaire). La couleur du pixel sera donc fonction de ces interactions.

Les images sont alors très proches de la réalité, puisqu'elles sont fondées sur les lois physiques. Par contre, il faut une énorme puissance de calcul pour gérer les contacts entre les rayons et tous les objets de la scène. La difficulté de cet algorithme réside dans le calcul des intersections entre le rayon et les objets. Enfin, il est très difficile de simuler le phénomène de diffusion à moins de créer de nouveaux rayons. Les images obtenues par lancer de rayons apparaissent donc, en général, trop nettes et trop contrastées aux bords des objets :

- la radiosité : cette méthode consiste à simuler les échanges énergétiques entre les différentes facettes de la scène par les formules issues de la thermique. Par ce biais, il est alors facile de gérer le phénomène de diffusion. La complexité algorithmique est évidemment très élevée, car chaque facette émet vers toutes les autres.

Cependant, il est très difficile de simuler la réflexion et les effets de transparence. Aussi les meilleures images photoréalistes sont-elles obtenues par la combinaison de ces deux méthodes.

Enfin, il existe certains algorithmes pour rendre légèrement floues les images photoréalistes, afin de simuler les effets de la profondeur de champ (mise au point) et du temps d'ouverture (bougé).

VI.B.4- L'interaction

Étudions tout d'abord les exigences auxquelles il faut satisfaire pour obtenir une bonne perception de l'image et, en particulier, une bonne vision stéréoscopique :

- une bonne résolution de l'image, afin d'obtenir un bon piqué. Il faut noter que même si l'image est d'assez bonne qualité en nombre de pixels, des défauts peuvent apparaître, comme les effets de moiré ou de crénelage dus aux problèmes d'échantillonnage. Il est donc nécessaire d'avoir non seulement un grand nombre de pixels, mais aussi d'utiliser des procédures d'anti-crénelage, ce qui exige, entre autres, un grand nombre de couleurs pour avoir des dégradés de teinte imperceptibles,
- un grand contraste. Dans une image faiblement contrastée, l'observateur force pour distinguer les objets dans l'image, ce qui amène des malaises,
- un champ de vision important. En effet, l'oeil a un champ de vision de 200 degrés latéralement et 120 degrés verticalement. Même si nous n'avons pas le même pouvoir de séparation entre le centre de l'oeil où la précision est excellente, et les côtés où la visualisation n'est sensible qu'au mouvement, ce champ important est nécessaire. Autrement, l'individu perd ses repères angulaires et va croire qu'il a fait un demi-tour quand il n'en fait qu'un quart. Cette perte de repère peut alors engendrer des malaises.
- un temps de latence quasi nul. Il faut que l'interaction entre le système vestibulaire, l'oeil et la main soit homogène. Si l'observateur tourne la tête, c'est-à-dire qu'il sent le mouvement et que la visualisation ne suit pas, il va vite être pris de malaise. De même, si l'individu bouge le bras et qu'il ne visualise pas immédiatement le mouvement de celui-ci dans l'image, il va essayer de refaire le mouvement, déstabilisant ainsi son geste,
- la fréquence de rafraîchissement de l'image. Elle doit être importante pour que l'animation soit fluide. La valeur habituelle est de 25 images par seconde. Néanmoins, pour pouvoir éliminer les effets stroboscopiques ou de clignotement, les fréquences de rafraîchissement atteignent alors 50 hertz. Ceci nécessite des algorithmes de modélisation et de synthèse qui soient deux fois plus rapides,
- la stabilité de l'image. Les systèmes de visualisation sont souvent couplés à des capteurs de position. Or, si ceux-ci ne sont pas assez précis, l'image devient instable et bouge légèrement, ce qui peut donner des malaises,

- l'adéquation
scopique
regards
plage ex
source c
par exer
synthèse

- masse e
pour ne
visiocas
sur le ne
fois très
sont con
vidéo et
Enfin, n

Pour obte
l'observateur ve
l'oeil gauche. D

VI.B.4.1- Le:

Une paire
l'image droite s
images provien
sique. Pour réal
glyphique utilis
gauche permet c
nit des résultats
liquides ou à de
lisation, success

De telles l
car peu lourdes.
teur voit l'extéri
tête (puisque la
voire trois persc
doivent être dan

La résoluti
il se pose le prof
qui peut engendr

VI.B.4.2- Le:

Le visioica
Contrairement a
virtuel. Techniqu

- l'adéquation des paramètres physiologiques. Dans le cas de lunettes stéréoscopiques, l'observateur accomode ses yeux sur l'écran, mais focalise son regard sur les objets virtuels qui apparaissent devant ou derrière. Ce découplage entre la distance d'accommodation et celle de focalisation peut être à la source de malaises. L'écartement des yeux doit aussi être pris en compte, par exemple, pour obtenir une superposition précise quand des images de synthèse sont mélangées à des images réelles,

- masse et encombrement. Un système de visualisation se doit d'être léger pour ne pas fatiguer l'observateur. Contrairement aux casques utilitaires, les visiocasques ne reposent pas uniquement sur le dessus de la tête, mais aussi sur le nez, ce qui est les rend plus instables (malgré des contrepoids quelquefois très encombrants) et plus fatigants à porter. De surcroît, les visiocasques sont connectés à des fils (il serait assez difficile de faire passer deux canaux vidéo et audio par liaison hertzienne) qui peuvent gêner les mouvements. Enfin, nous pouvons aussi ajouter l'inconfort dû à la chaleur.

Pour obtenir une visualisation stéréoscopique, il faut que l'oeil droit de l'observateur voie une scène soigneusement décalée par rapport à celle que perçoit l'oeil gauche. Deux types de systèmes existent pour obtenir une telle visualisation.

VI.B.4.1- Les lunettes stéréoscopiques

Une paire de lunettes stéréoscopiques est un dispositif qui ne laisse passer l'image droite synthétisée que dans l'oeil droit et la gauche dans l'oeil gauche. Les images proviennent du même écran, en général, celui d'une station de travail classique. Pour réaliser un tel dispositif, il existe plusieurs méthodes : le procédé anaglyphique utilise de simples filtres de couleur pour séparer l'image (le filtre rouge à gauche permet de ne laisser que la composante bleue et réciproquement), mais fournit des résultats décevants ; les dispositifs les plus récents font appel aux cristaux liquides ou à des filtres polarisants qui font écran à une fréquence élevée, à la visualisation, successivement, sur l'oeil gauche et sur l'oeil droit.

De telles lunettes sont peu chères (quelques kF) et relativement commodes, car peu lourdes. Par contre, elles ne permettent pas une réelle immersion (l'utilisateur voit l'extérieur et son champ de vue est limité) et limitent les mouvements de la tête (puisque la visualisation se fait sur un écran plat). De plus, seulement deux, voire trois personnes peuvent regarder en même temps avec des lunettes, car elles doivent être dans le même axe de visualisation.

La résolution peut être très élevée (celle d'un écran de station de travail), mais il se pose le problème de la dissociation distance focale-distance d'accommodation, qui peut engendrer des malaises.

VI.B.4.2- Les visiocasques

Le visiocasque est le dispositif de Réalité Virtuelle le plus spectaculaire. Contrairement aux lunettes, il permet de s'immerger complètement dans le monde virtuel. Techniquement, nous pouvons en distinguer deux types :

- les casques à cristaux liquides : des petits écrans à cristaux liquides (par exemple, ceux utilisés dans les mini-téléviseurs) sont placés devant les yeux, une lentille permettant de focaliser à l'infini. La précision reste assez mauvaise, car la résolution est assez faible (300 x 200 pixels) et de surcroît, les diodes émettrices sont regroupées en triades, une rouge, une verte et une bleue, ce qui fait que suivant la couleur, elles ne s'allument pas à la même position, d'où un manque de piqué. De plus, des dispositifs permettent de rendre l'image légèrement floue pour ne pas percevoir les pixels. Par contre, ces dispositifs sont peu onéreux.

- les casques à tubes cathodiques : les cristaux liquides sont remplacés par des tubes cathodiques miniaturisés. La résolution et le piqué sont alors excellents. Cependant, à cette taille, il n'est possible que de fabriquer des tubes cathodiques en noir et blanc. Pour obtenir la couleur, il faut placer des filtres colorés à cristaux liquides qui changent régulièrement de couleur (rouge, vert, bleu) reconstituant ainsi la trichromie. De tels dispositifs sont plus onéreux.

Dans les deux cas, nous retrouvons les défauts des casques : un champ de vision limité, accentué par le recouvrement nécessaire aux champs des deux yeux pour obtenir une stéréoscopie correcte, un certain encombrement et une masse qui les rend fatigants à porter.

Ce dernier problème peut être résolu par l'utilisation de casques autoportés (du type BOOM), soutenus par un bras articulé, mais qui limite les mouvements.

En conclusion, tous les systèmes de visualisation stéréoscopique nécessitent le doublement de la puissance graphique, puisqu'il faut créer deux images légèrement décalées. D'ailleurs, il arrive quelquefois que le visiocasque ne soit utilisé qu'en vision monoscopique (la même image devant les deux yeux), l'essentiel étant alors d'apporter une immersion.

VI.B.5- Un exemple concret de développement

Dans ce paragraphe, nous souhaitons illustrer les explications ci-dessus par la description d'un système de Réalité Virtuelle développé dans le projet Epidaure de l'Institut National de la Recherche en Informatique et en Automatique de Sophia-Antipolis.

Ce système de Réalité Virtuelle concerne un simulateur de chirurgie cranio-faciale. La chirurgie craniofaciale s'adresse à des patients atteints de graves malformations ou lésions crâniennes. Cette chirurgie reconstructrice consiste à découper des fragments osseux du crâne et à les repositionner, afin de modifier la forme globale de la boîte crânienne. La difficulté essentielle de ce type d'opération chirurgicale, hormis la durée de l'intervention, est de pouvoir appréhender en trois dimensions la forme des fragments à découper, ainsi que leur position finale.

Le
planific
patient
mais a
visualisa

La

VI.B.5

Il e
du crâne

Po
mique s
meilleur
l'acqui
à une fo
à une ce

Po
phiques
les imag
mation d
une repre

Les é

Lors
ge et le cr
mations. (

Le but du simulateur est de proposer des outils informatiques permettant la planification de l'opération, ainsi que la visualisation de l'aspect du visage du patient après l'opération. Ce simulateur n'a jamais été utilisé en situation réelle, mais a permis de valider auprès des chirurgiens les concepts de simulation, de visualisation et d'interaction.

La réalisation de ce simulateur peut se décomposer en trois étapes.

VI.B.5.1- Acquisition des données

Il est nécessaire d'obtenir l'information correspondant à la forme du visage et du crâne du patient. Plusieurs modalités d'acquisition sont envisageables.

Pour acquérir la forme du crâne, il est nécessaire d'utiliser une image volumique scanographique (rayons X). En effet, c'est cette modalité qui offre le meilleur contraste entre les tissus osseux du crâne et les tissus mous. Cependant, l'acquisition précise de la forme complète du crâne implique l'exposition du patient à une forte dose de rayons X. C'est pourquoi le nombre de coupes est souvent réduit à une centaine, ce qui donne une précision de l'ordre de 2 millimètres.

Pour la forme du visage, nous pourrions aussi utiliser les images scanographiques de la tête. Cependant, les images obtenues par triangulation laser telles que les images Cyberware sont d'une meilleure résolution, et surtout, ajoutent l'information de texture à celle de la géométrie du visage. Ces images texturées autorisent une représentation graphique extrêmement réaliste du visage.

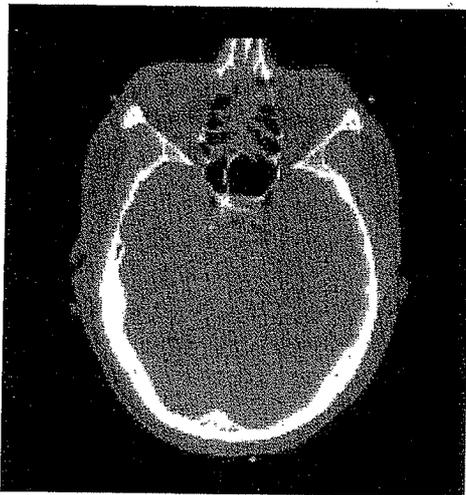


Figure VI.B.6 : Une coupe scanographique d'une tête.
Les éléments osseux apparaissent en teinte claire et les tissus mous en teinte grisâtre.

Lorsque deux modalités différentes d'acquisition sont employées pour le visage et le crâne, se pose le problème de la mise en correspondance de ces deux informations. Grâce à des algorithmes de recalage développés dans le projet, nous pou-

vous trouver automatiquement la transformation rigide (translation et rotation) entre les données du visage acquises par scanographie et par le capteur Cyberware. Nous appliquons alors celle-ci aux données scanographiques du crâne pour les mettre dans le même repère géométrique que celles du visage provenant du capteur Cyberware.

VI.B.5.2- Modélisation

Les organes anatomiques comme le crâne sont particulièrement difficiles à modéliser à cause de leur complexité topologique et géométrique. Seuls des maillages non structurés (comme, par exemple, la triangulation) sont capables de représenter ce niveau de complexité topologique.

Nous avons opté pour une nouvelle représentation appelée "maillage simplexe", qui permet la même généralité de représentation que les triangulations, mais autorise une plus grande flexibilité en termes de déformation et de contrôle de forme. Un maillage simplexe peut-être utilisé pour représenter une surface ou un volume.

Un maillage simplexe de surface est caractérisé par une connectivité entre sommets de 3 et un maillage simplexe volumique par une connectivité de 4 (voir figure ci-dessous). Une relation de dualité topologique relie cette représentation avec celle des triangulations.

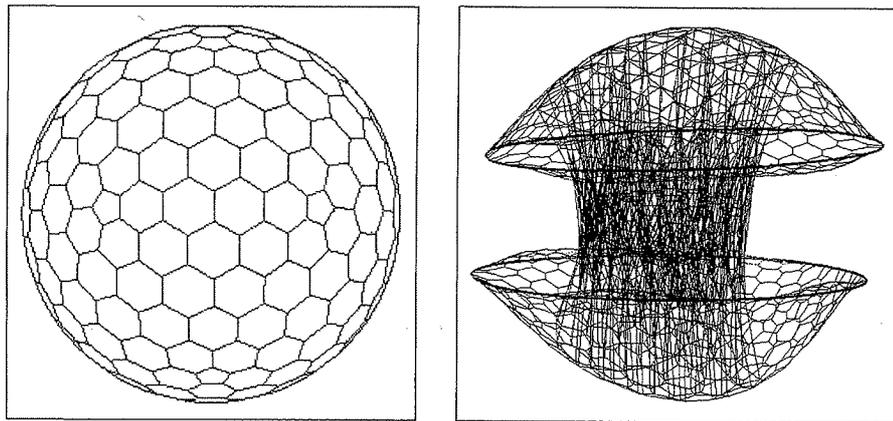
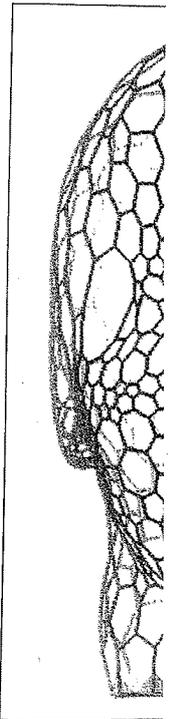
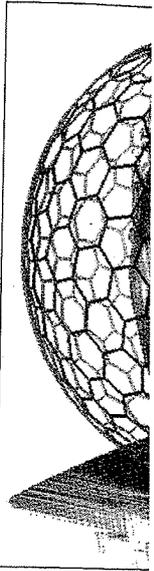


Figure VI.B.7 : Maillages simplexes de surface (à gauche) et volumique (à droite).

En raison de la complexité des formes à modéliser, nous utilisons le principe des modèles déformables. Un maillage simplexe sphérique est initialisé à proximité des données à modéliser. Sous l'action de forces internes et externes, ce maillage va se déformer. Les forces internes garantissent un niveau de continuité de la surface, alors que les forces externes attirent la surface vers les données initiales. Des algorithmes itératifs de raffinement et d'adaptation permettent d'ajouter des sommets et de restructurer le maillage, afin qu'il approxime correctement les données initiales. Des procédures semi-automatiques autorisent le changement de topologie du maillage.

La figure



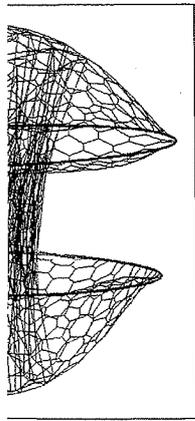
Après raffi

et rotation) entre Cyberware. Nous pour les mettre en avant du capteur

ment difficiles à riquer. Seuls des sont capables de

le "maillage simplangulations, mais contrôle de forme. ou un volume.

connectivité entre activité de 4 (voir te représentation



ique (à droite).

ilisons le principe itialisé à proximiternes, ce maillage e continuité de la données initiales. tent d'ajouter des ectement les don- e changement de

La figure ci-dessous montre trois différentes étapes de la modélisation du visage.

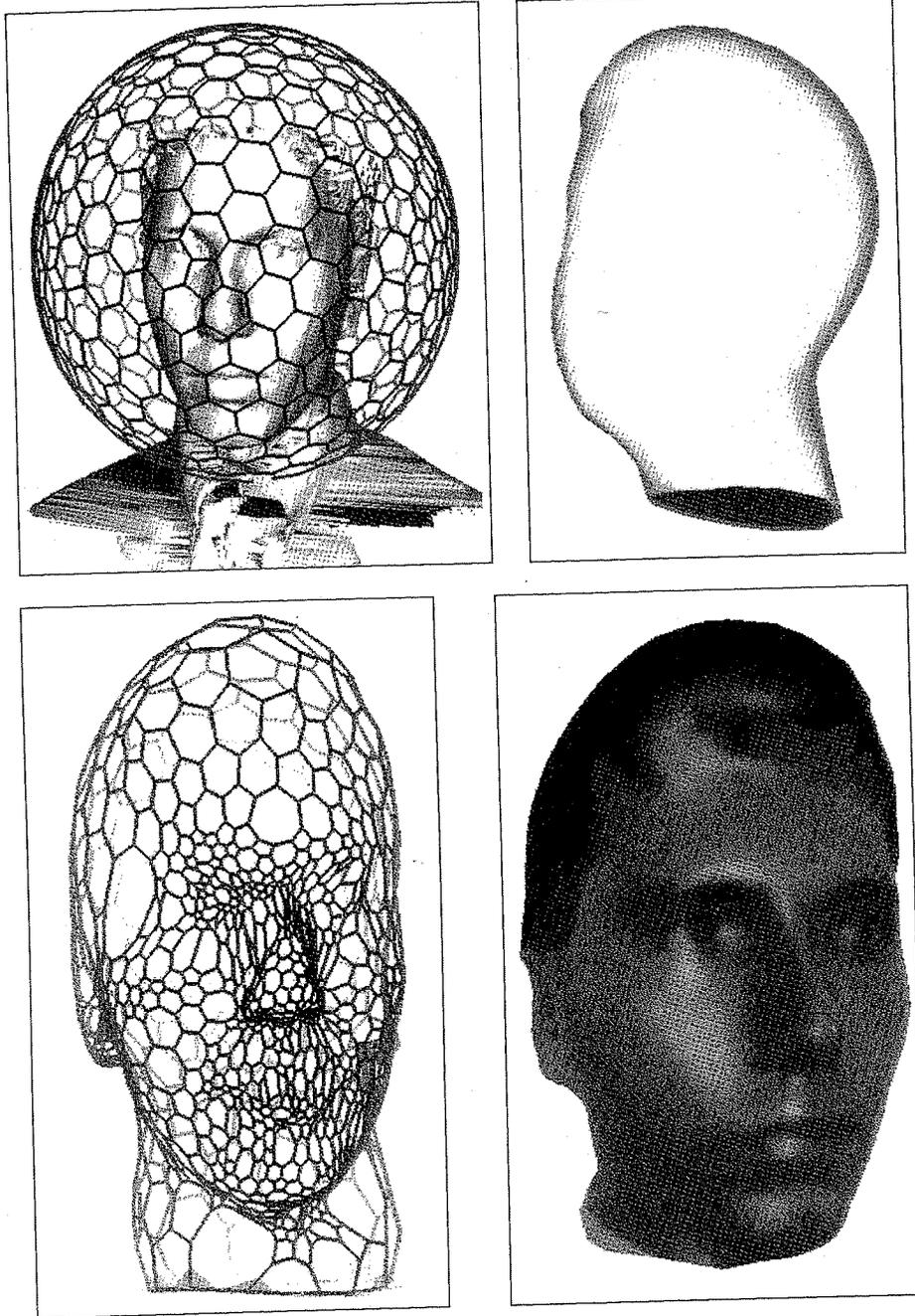
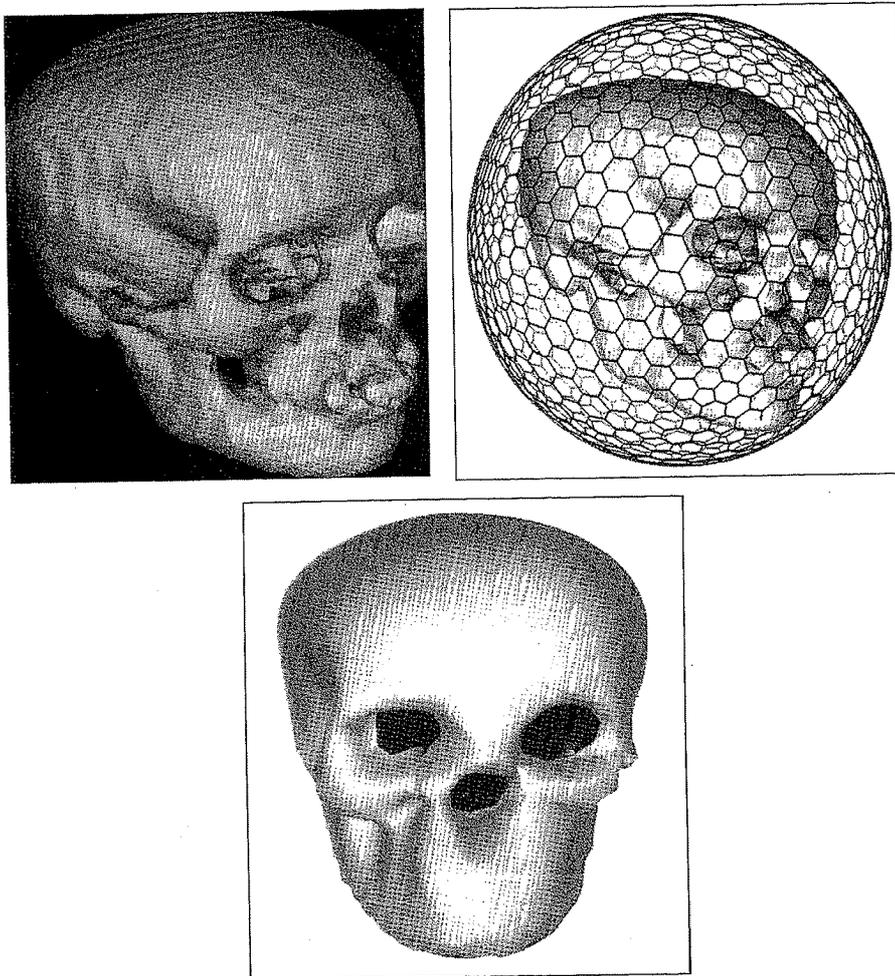


Figure VI.B.8 : Modélisation du visage.
Le maillage se déforme à partir d'une sphère.
Après raffinement et adaptation, le maillage approxime correctement le visage.

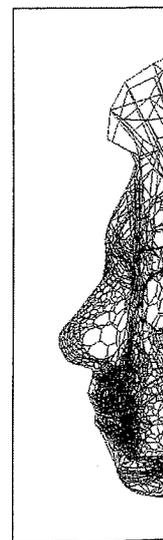
Pour la modélisation du crâne, nous extrayons, tout d'abord, à partir de l'image volumique scanographique, une isosurface correspondant à la surface du crâne. Le maillage est ensuite appliqué sur l'isosurface pour obtenir un modèle de l'enveloppe externe du crâne (voir figure ci-dessous).



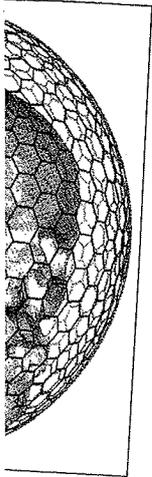
*Figure VI.B 9 : Modélisation du crâne.
Le modèle du crâne est extrait à l'aide d'un maillage simplexe appliqué sur une isosurface extraite de l'image scanographique volumique.*

Afin de réaliser la visualisation de l'aspect du patient après l'opération, il est nécessaire de disposer d'un modèle déformable volumique modélisant les tissus mous reliant le visage au crâne. Ainsi, un déplacement d'un fragment osseux entraînera le déplacement des tissus mous, lequel, par réaction, induira un déplacement du modèle de visage.

La création en désignant int crâne. Une proc reliant ces deux miques ayant de liens élastiques (sous).



ord, à partir de
à la surface du
r un modèle de



La création des modèles volumiques correspondant aux tissus mous se fait en désignant interactivement une zone sur le modèle de visage et sur celui du crâne. Une procédure automatique construit un maillage simplexe volumique reliant ces deux zones avec une épaisseur donnée. Ainsi, 11 modèles volumiques ayant des épaisseurs différentes ont été construits pour représenter les liens élastiques existant entre la peau du visage et le crâne (voir figures ci-dessous).

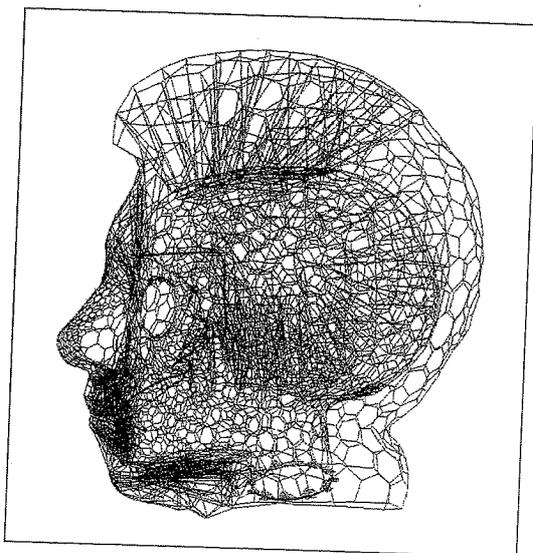
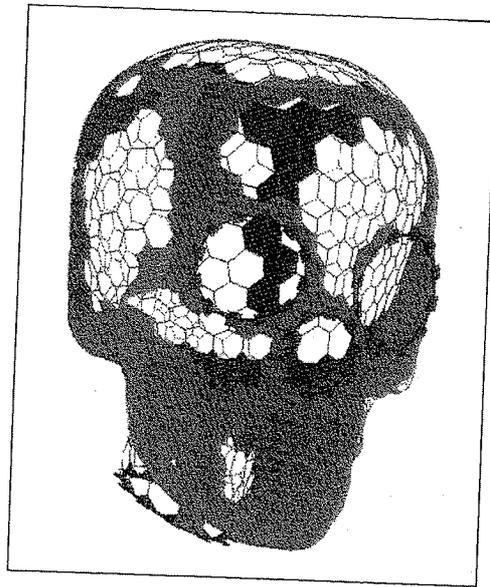


Figure VI.B.10 :
Modélisation des tissus mous.
Les modèles volumiques
des tissus mous relient
la peau du visage au crâne.

on, il est
es tissus
x entraî-
ment du

VI.B.5.3- Simulation

La simulation proprement dite comporte essentiellement trois aspects :

- le découpage de fragments osseux,
- le déplacement de fragments osseux,
- la visualisation de l'aspect du visage après déplacement.

Des outils d'interaction tridimensionnelle sont utilisés pour rendre plus intuitives ces différentes tâches. Deux capteurs de position tridimensionnelle Polhemus, placés sur un gant, permettent d'utiliser la métaphore de la "main virtuelle" (voir la première figure). Le second capteur permet de détecter l'ouverture ou la fermeture de la main virtuelle. Trois fonctionnalités sont attachées à celle-ci.

La première consiste à déplacer des objets de façon que le déplacement relatif d'un objet corresponde au déplacement de la main de l'utilisateur. La deuxième consiste à créer, lors de la fermeture de la main virtuelle, un champ de potentiel répulsif qui déforme un maillage simplexe au voisinage de la main. Enfin, la dernière fonctionnalité correspond au principe du "curseur de surface virtuel" : le déplacement de la main de l'utilisateur est transformé en un déplacement d'un curseur sur une surface. Ce curseur étant lié à la surface, il devient possible de désigner avec une grande précision et une grande facilité un point déterminé de la surface.

Le découpage des fragments osseux s'effectue de manière complètement interactive. L'utilisateur désigne les points du polygone le long duquel sera découpée la boîte crânienne. Ces points peuvent être désignés à l'aide de la souris ou du curseur de surface. Une fois le contour désigné, une procédure automatique sépare le fragment du crâne du reste de la boîte crânienne.

Le déplacement des fragments découpés s'opère à l'aide ou de la "main virtuelle" ou de la souris. Un facteur d'échelle peut être appliqué afin de permettre un positionnement précis des fragments.

Enfin, l'étape de reconstruction prend place après le déplacement des fragments osseux. Les modèles volumiques des tissus mous agissent en réaction sur le modèle déformable du visage.

VI.B.5.4- Conclusion

Ce système de simulation chirurgicale montre la nécessité d'intégrer les différentes composantes technologiques d'un système de Réalité Virtuelle. Cette intégration logicielle et matérielle représente, en pratique, une tâche importante et très coûteuse en temps.

Pour le système de simulation chirurgicale, une interface graphique écrite avec la bibliothèque graphique Motif/OpenGL, intègre le module de modélisation, de découpe, de manipulation et de déformation interactive. L'utilisation de modèles déformables ayant une géométrie évoluant au cours du temps, rend l'utilisation de produits de développement commerciaux tels que "WorldToolkit" inadaptée. La visualisation utilise un accélérateur graphique par l'intermédiaire de la bibliothèque graphique.

*Figure VI.B.1
Simulation
du résultat.
L'enfoncement
de la partie
osseuse frontale
se répercute sur
la forme générale
du visage.
La texture permet
d'obtenir un
grand réalisme.*

Bibliographie

La Réalité Virtuelle
Les Réalités Virtuelles
The Science of Virtual Reality
(Addison-Wesley)
Introduction à la Réalité Virtuelle
de Paris.

pects :

ordre plus intuitif
elle Polhemus,
tuelle" (voir la
ou la fermeture

acement relatif
: La deuxième
op de potentiel
infin, la dernière
est" : le déplace-
d'un curseur sur
à désigner avec
urface.

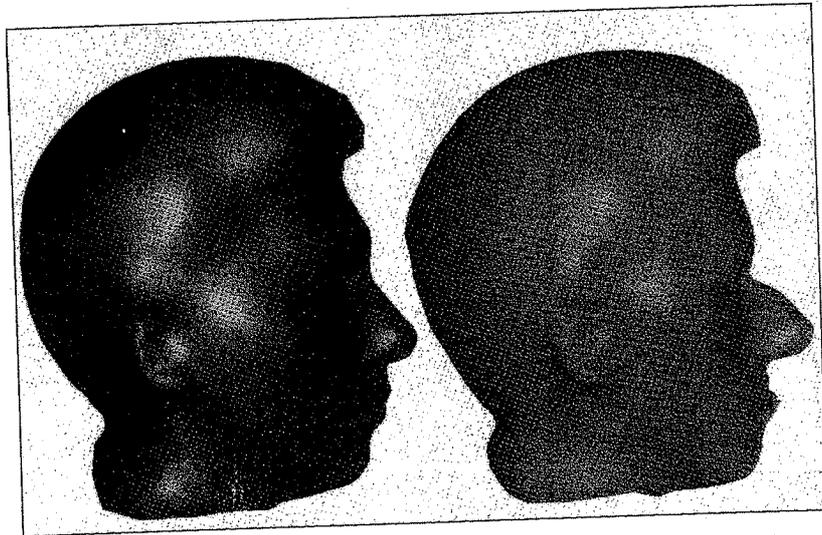
complètement
uel sera décou-
la souris ou du
omatique sépare

le la "main vir-
de permettre un

ement des frag-
i réaction sur le

intégrer les diffé-
e. Cette intégra-
ante et très cou-

ique écrite avec
nodélisation, de
tion de modèles
l'utilisation de
" inadaptée. La
e la bibliothèque



*Figure VI.B.11 :
Simulation
du résultat.
L'enfoncement
de la partie
osseuse frontale
se répercute sur
la forme générale
du visage.
La texture permet
d'obtenir un
grand réalisme.*



Bibliographie

La Réalité Virtuelle, Grigore Burdea et Philippe Coiffet (Hermes).

Les Réalités Virtuelles, Claude Cadoz (Flammarion, collection Domino).

The Science of Virtual Reality and Virtual Environments, Roy S. Kalawsky (Addison-Wesley).

Introduction aux techniques de la Réalité Virtuelle, Philippe Fuchs, Ecole des Mines de Paris.

Introduction aux techniques de synthèse des images, Pascal Gros, cours de l'Institut EURECOM

Un grand nombre d'observations et de remarques présentées dans cette partie proviennent d'exposés des journées de travail du Groupe de Travail "Réalité Virtuelle" (GDR-PRC "Communication Homme-Machine", CNRS/MESR) et de cours de l'école d'été CIMPA-CIMI-INRIA-UNESCO "Réalité Virtuelle" (Nice, juillet 1995).

VI.C

VI.C.1- I

Au cours des serveurs centraux. Dans le même temps de façon continue d'être à l'évolution pour utiliser par un grand nombre de contextes.

Les chercheurs et qu'il y a des ordinateurs qui apparaissent et même de tenir la génération de données avec la réalité. En attendant qu'ils deviennent des experts.

Une fois la technologie change, il faut alors qu'il corresponde à l'usage d'une nouvelle génération de compétences. Par exemple, beaucoup ont du mal à apprendre au prix de quelles sacrifices, quelles sont celles qui sont à l'école pour apprendre à taper au clavier pendant des décennies, l'apprentissage.

* Cette partie de la conférence française, adaptée de HCI'94 (Glasgow University Press)
** J'emploie ce terme "interactivité" pour désigner l'interaction que le