

# Réalité virtuelle

## Concepts et outils

par **Philippe FUCHS**

*Maître assistant à l'École des mines de Paris (EMP)*

*Équipe Réalité virtuelle et réalité augmentée, centre de robotique, EMP*

et **Guillaume MOREAU**

*Ingénieur de recherche*

*Équipe Réalité virtuelle et réalité augmentée, centre de robotique, EMP*

<b>1. Concepts et applications .....</b>	TE 5 900 - 2
1.1 Définition et finalité .....	— 2
1.2 Les deux problématiques.....	— 3
1.3 Applications .....	— 4
<b>2. Interfaçage comportemental .....</b>	— 8
2.1 Concepts de base de l'immersion et de l'interaction .....	— 8
<b>3. Taxonomie des interfaces.....</b>	— 10
3.1 Interfaces visuelles d'immersion.....	— 10
3.2 Capteurs de localisation.....	— 11
3.3 Gants numériques .....	— 12
3.4 Capture des mouvements du corps .....	— 12
3.5 Interfaces à retour tactile .....	— 13
3.6 Interfaces à retour d'effort .....	— 13
3.7 Interfaces à simulation de mouvement .....	— 14
<b>4. Techniques d'utilisation des interfaces.....</b>	— 14
<b>5. Environnements virtuels .....</b>	— 15
5.1 Modèles.....	— 15
5.2 Crédit des environnements virtuels.....	— 18
5.3 Interaction avec les environnements virtuels .....	— 19
<b>6. Conclusion .....</b>	— 20
<b>Pour en savoir plus.....</b>	Doc. TE 5 900

**L**e domaine technique et scientifique que nous allons expliciter est désigné par un oxymoron surprenant : la « réalité virtuelle ». Cette association de deux termes *a priori* opposés n'est pas innocente : le virtuel est-il l'inverse du réel ? Sans rentrer dans un débat philosophique, inapproprié ici, nous pouvons remarquer cependant que le problème du choix entre le réel et le virtuel se pose à l'ingénieur. Par exemple, dans une phase de conception d'un produit, l'évaluation des qualités de l'objet peut se faire sur sa représentation virtuelle (grâce à un modèle numérique) ou sur un prototype réel. L'ingénieur est souvent confronté au dilemme suivant : soit tester virtuellement à partir d'un modèle paramétrable, mais peut-être irréaliste, soit évaluer un produit réel mais figé. Cette problématique n'est pas nouvelle mais, depuis l'essor des techniques de réalité virtuelle, elle est plus complexe à étudier, car nous verrons qu'elle fait intervenir des critères humains subjectifs. L'expression « réalité virtuelle » étant bien établie maintenant, il faut la prendre telle qu'elle est, avec quelques risques de confusion ou d'incompréhension, que nous nous efforcerons de dissiper. Il est souhaitable de bien définir le domaine qu'elle recouvre et de présenter ses principales applications professionnelles.

Comme toute nouvelle technique, il existait avant son essor des domaines scientifiques connexes qui ont permis son développement. Dans le secteur des loisirs, les films et les animations en images de synthèse ont exploité des créations virtuelles bien avant l'avènement de la réalité virtuelle. Dans les domaines professionnels, la CAO et la simulation de phénomènes physiques sont étudiées virtuellement par l'intermédiaire de modélisations numériques. Mais dans tous ces secteurs d'activité, l'utilisateur de ces mondes virtuels est **spectateur** car il n'(inter)agit pas instantanément, ou si peu, sur ces entités virtuelles. Le lecteur peut cependant rétorquer que dans les jeux vidéo, le joueur est **acteur** en intervenant sur le cours du jeu, mais dans ce cas, le joueur est peu immergé physiquement dans l'environnement virtuel. Les concepteurs de jeux vidéo ne font pas systématiquement appel aux mêmes concepts de base que ceux de la réalité virtuelle, mais à bien des techniques similaires. Les frontières entre le domaine de la réalité virtuelle et ses domaines connexes ne sont pas nettes et immuables. Il faut plutôt voir un continuum entre des environnements virtuels où l'utilisateur est passif et ceux où il est totalement **immergé** « naturellement » et avec lesquels il peut **interagir**. Il faut aussi noter le cas particulier des simulateurs de transport, qui ont permis depuis des dizaines d'années à des professionnels d'interagir avec un environnement virtuel. En fait, dans ce domaine, les professionnels ont exploité les mêmes techniques qu'en réalité virtuelle, mais cette dénomination étant apparue après le développement des simulateurs de transport, jamais un spécialiste de ce domaine ne l'emploiera.

L'évolution des ordinateurs permet de simuler des mondes virtuels de plus en plus complexes avec des possibilités d'interaction. Cela n'est possible qu'au travers de logiciels et d'interfaces matérielles adaptés à cet objectif. L'essor d'Internet, plus important en terme économique et d'utilisation que la réalité virtuelle, offre une nouvelle ouverture à celle-ci. Internet permet ainsi d'exploiter les potentialités des environnements virtuels partagés à distance. Mais si Internet est entré dans beaucoup de foyers, il ne faut pas penser qu'il en sera de même pour la réalité virtuelle car son coût est en général élevé et sa mise en œuvre est sûrement complexe. Au-delà des aspects techniques et économiques, toutes ces évolutions d'Internet et des mondes virtuels posent des enjeux de société [1].

## 1. Concepts et applications

### 1.1 Définition et finalité

La littérature contient plusieurs définitions assez proches de la réalité virtuelle, qui font intervenir des termes identiques ou similaires. Deux d'entre eux ressortent : ce sont **immersion** et **interaction**. Il s'agit donc d'une immersion efficace et partiellement naturelle de l'utilisateur dans un environnement virtuel. Cette immersion doit être analysée sous l'aspect technique et sous l'aspect psychologique, car il s'agit bien de mettre un sujet dans un monde virtuel et non pas seulement de « brancher » son corps à un ordinateur *via* des interfaces matérielles. De même, le sujet doit pouvoir interagir sur ce monde virtuel par des actions pensées et volontaires : l'interaction est donc aussi à étudier sous les aspects technique et psychologique. Ce sont ces deux fonctions essentielles qui posent les problèmes fondamentaux de la réalité virtuelle, aussi bien au niveau matériel (informatique et interfaces) qu'au niveau logiciel, aussi bien au niveau physique qu'au niveau cognitif. Nous avons ainsi proposé une définition de la réalité virtuelle [2] :

« Les techniques de la réalité virtuelle sont fondées sur l'interaction en temps réel avec un monde virtuel, à l'aide d'interfaces comportementales permettant l'immersion de l'utilisateur dans cet environnement. »

Pour bien spécifier les nouveaux problèmes d'interfaçage induits par la réalité virtuelle, nous avons proposé l'expression d'**interface comportementale** : il s'agit d'une interface permettant d'exploiter un comportement humain, comme la manipulation d'objets virtuels avec la main grâce à un gant de données (§ 3.3). Mais cette définition technique ne dit pas quelle est la finalité de la réalité virtuelle. Que recherchons-nous lorsque nous faisons appel à cette technique ? Suivant le cadre d'utilisation, les objectifs peuvent être très différents. Quel est le rapport entre les aspirations d'un artiste exploitant les techniques de la réalité virtuelle et les objectifs d'un ingénieur en bureau d'études ? Dans tous les cas, il s'agit de mettre une personne en activité dans un monde artificiel. Nous avons proposé une finalité de la réalité virtuelle qui synthétise tous ses domaines d'application [3] :

La finalité de la réalité virtuelle est de permettre à une ou à plusieurs personnes des activités sensori-motrices et donc mentales dans un monde artificiel, qui est soit imaginaire, soit une simulation de certains aspects du monde réel.

Les termes « activités sensori-motrices » sont employés pour bien indiquer que la réalité virtuelle permet d’immerger l’utilisateur en exploitant efficacement certains de ses sens et qu’il agit sur l’environnement virtuel par ses réponses motrices, activées par ses muscles. C’est donc bien pour permettre de meilleures immersion et interaction au niveau sensori-moteur que les techniques de réalité virtuelle ont été développées.

#### Exemples :

- Un capteur de localisation à six degrés de liberté permet de manipuler plus aisément en translation et en rotation spatiales des objets dans un espace virtuel tridimensionnel.
- Un casque immersif (visiocasque) permet de regarder efficacement autour de soi en tournant simplement la tête, donc avec un comportement similaire à celui dans un monde réel.
- Une interface à retour d’effort permet de ressentir « presque naturellement » des collisions entre objets virtuels.

La finalité de la réalité virtuelle induit deux catégories d’applications différentes. Dans la première situation, un **monde imaginaire**, la virtualité est utilisée pour créer soit un monde irréel, exploité principalement par des artistes et des concepteurs de jeux, soit pour visualiser des concepts ou des symboles. Ceux-ci permettent à l’utilisateur de se faire une meilleure représentation mentale.

Dans la deuxième situation, une **simulation de certains aspects du monde réel**, la virtualité est exploitée par l’ingénieur pour mieux concevoir, analyser ou évaluer un produit ou un environnement réel. Notons que l’on parle de reproduire seulement *certaines aspects* du monde réel. Il est illusoire de vouloir simuler entièrement le monde réel concerné. Il est plus judicieux de réfléchir, au moment de la conception d’un dispositif RV, pour déterminer les aspects qui doivent être simulés par rapport à l’objectif de l’application. Si la simulation d’un tableau de bord de véhicule sert à analyser son ergonomie, la scène routière n’a pas besoin d’être affichée. Il y a donc pour tout concepteur un travail de réflexion préliminaire sur ce qui doit être simulé.

## 1.2 Les deux problématiques

Les techniques de la réalité virtuelle permettent à une ou plusieurs personnes de s’immerger dans un environnement virtuel et d’interagir avec lui. Le monde virtuel doit être simulé sur du matériel informatique avec la contrainte extrêmement forte du **temps réel**. Le lecteur doit retenir qu’actuellement, avec cet objectif d’interaction en **temps réel**, les techniques informatiques ne permettent pas de simuler tout ce que l’on souhaite : par exemple, il est impossible d’afficher en temps réel des images d’objets de formes complexes avec des reflets réalistes. C’est donc la première problématique de la réalité virtuelle (figure 1) : la **création informatique d’un monde virtuel** sur lequel le sujet peut interagir en temps réel. Les recherches et les développements en informatique se font au niveau matériel et au niveau logiciel. C’est sur ces deux fronts que les chercheurs doivent porter leur effort. Concernant le matériel, les constructeurs d’ordinateurs personnels et de stations graphiques doublent en un ou deux ans leurs capacités informatiques, mais cela n’est pas encore suffisant pour bien des applications en réalité virtuelle. Celles qui ont été développées à ce jour fonctionnent en temps réel mais souvent, soit avec des restrictions d’emploi, soit avec des environnements virtuels peu gourmands en temps de calcul, soit avec des astuces techniques imperceptibles

### Avènement de la réalité virtuelle

La réalité virtuelle est historiquement liée à l’essor de l’informatique. Son développement est décrit dans le livre de Rheingold [4].

Vers **1960** est créée une interface exploitant un comportement, un geste de l’homme : la souris. Cette interface montre pour la première fois à tous les utilisateurs que l’on peut communiquer avec un ordinateur autrement qu’avec un clavier, autrement que sous forme textuelle !

Vers **1970**, le premier casque immersif est réalisé par des chercheurs de l’université d’Utah. Il permet une immersion visuelle dans un monde virtuel grâce à deux mini-écrans. Grâce à un capteur de localisation de la tête, quand on tourne celle-ci, les images correspondant au point de vue de l’observateur sont affichées. Cette première approche montre qu’il est possible de se trouver (de plonger diront certains) à l’intérieur d’un monde simulé. L’image de l’ordinateur (clavier, écran et unité centrale) disparaît des yeux de l’utilisateur.

Vers **1980**, le gant de données vient compléter ces nouvelles interfaces. Les mouvements de la main de l’opérateur, mesurés en temps réel, lui permettent de manipuler des objets virtuels.

Vers **1985**, la commercialisation de matériels et de logiciels spécifiquement dédiés à la réalité virtuelle démarre lentement et prudemment, malgré les dires des médias qui prévoient une envolée des techniques de réalité virtuelle.

Vers **1990**, les premiers développements de la réalité virtuelle voient le jour dans les centres de recherches et dans quelques grandes entreprises.

**Nota :** seules les grandes entreprises s’engagent, à part quelques exceptions, car le retour sur investissement n’est pas garanti par manque de recul et d’expérimentations sérieuses.

par l’utilisateur. Par exemple, les reflets sur les objets virtuels ne sont en général qu’une pâle représentation de reflets réels, mais le sujet peu expérimenté ne s’en aperçoit pas. Les constructeurs d’automobiles, qui souhaitent visualiser en temps réel les reflets exacts sur les carrosseries de voiture, vont devoir s’armer de patience.

La réalité virtuelle implique une immersion et une interaction efficaces d’un ou plusieurs sujets dans un monde virtuel. Cet **interfaçage comportemental** d’une personne avec cet environnement virtuel par l’intermédiaire d’interfaces matérielles et d’un ordinateur est la deuxième problématique multidisciplinaire de la réalité virtuelle (figure 1). Celle-ci fait appel à des domaines bien différents : l’informatique, la physique des interfaces matérielles, la neurophysiologie pour les activités sensori-motrices de l’utilisateur, l’ergonomie et la psychologie pour l’immersion et l’interaction mentales du sujet. Cette approche multidisciplinaire est incontournable, même si certains semblent l’ignorer. Ils risquent de faire une « belle » réalisation technique au niveau informatique mais que seuls les concepteurs peuvent faire fonctionner !

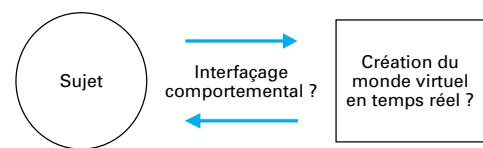


Figure 1 – Problématiques de la réalité virtuelle : création du monde virtuel et interfaçage comportemental

Ces deux problématiques correspondent aux grands domaines de recherche et de développement en réalité virtuelle. L'interfaçage comportemental est présenté au paragraphe 2 et la création du monde virtuel au paragraphe 5.

## 1.3 Applications

### 1.3.1 Applications générales

Nous apportons ici une information générale sur toutes les potentialités de la réalité virtuelle concernant les applications non professionnelles. Il est difficile de faire une classification homogène car certaines applications sont plus en développement qu'en utilisation banalisée, d'autres ont un poids économique réel tandis que d'autres ne sont réalisées que sur un prototype unique. Certaines sont des applications exploitant toutes les fonctionnalités de la réalité virtuelle, à l'inverse d'autres qui sont à la frontière de ces techniques. Si l'on considère que la plupart des jeux vidéo, utilisant partiellement ces techniques, sont des applications de réalité virtuelle, l'importance économique de la réalité virtuelle n'est pas du même ordre de grandeur. Pour notre part, nous considérons que seuls certains jeux sont de réalité virtuelle, lorsqu'ils permettent une immersion et une interaction importantes au niveau sensori-moteur : approximativement, lorsque le joueur interagit avec d'autres types d'interfaces que le clavier ou la manette d'un ordinateur ou d'une console de jeu vidéo.

Suivant la finalité de la réalité virtuelle telle que nous l'avons définie (§ 1.1), il existe deux grands domaines selon que la personne est immergée dans un monde imaginaire ou dans un monde simulant certains aspects du monde réel. Le premier domaine concerne principalement les **œuvres artistiques** qui réagissent au comportement de l'observateur. Celui-ci n'est plus un spectateur passif de l'œuvre mais un spectateur actif face à l'œuvre. Ce domaine artistique est encore marginal car il nécessite des moyens matériels et économiques importants.

L'exploitation d'un monde symbolique, basé sur des techniques de réalité virtuelle, est modeste. Citons pour exemple l'utilisation symbolique d'architectures urbaines ou routières pour représenter l'organisation d'un réseau de communications téléphoniques ou informatiques. Ce type d'applications est plus en développement dans des laboratoires de recherche qu'en exploitation quotidienne. Cependant, les représentations symboliques dans un environnement virtuel sont quelquefois exploitées dans des simulations du monde réel. Cela est particulièrement vrai dans le cas de formations basées sur les techniques de réalité virtuelle : pour une meilleure compréhension d'une tâche, d'un mécanisme ou d'un processus, une représentation symbolique peut éclairer, comme la représentation par un graphe du déroulement d'une série de tâches à accomplir suivant une séquence donnée.

Le deuxième secteur induit par la finalité de la réalité virtuelle, la simulation de certains aspects du monde réel, est plus exploité en pratique.

Dans le secteur des **loisirs**, des parcs d'attraction et des salles de jeux proposent des activités ludiques dans des environnements virtuels. Certaines de ces activités utilisent les potentialités ludiques de la réalité virtuelle, comme les simulateurs de transport (avions, voitures, navettes spatiales, etc., jusqu'au tapis volant !), les activités sportives plus ou moins réalistes (ski sur piste virtuelle, survol en deltaplane, surf sur mer virtuelle, golf virtuel, etc., figure 2). Ces « loisirs virtuels », où le joueur est immergé « presque naturellement » et interagit physiquement, sont conçus à partir de dispositifs relativement complexes et onéreux. Cela explique qu'on les rencontre presque exclusivement dans des lieux collectifs et rarement chez un particulier. Le lecteur ne doit pas croire que l'évolution des techniques changera ce fait, car il sera toujours difficile techniquement de réaliser de tels dispositifs à un faible coût : pour les simulateurs ludiques de transport, les mouve-



**Figure 2 – Tir à l'arc avec casque et arc instrumenté**  
(doc. Sim Team)

ments réels des personnes sur une plate-forme mobile exigent des efforts mécaniques importants, impliquant des coûts élevés. De même, les dispositifs de sports virtuels impliquent en général des interfaces matérielles onéreuses pour un particulier.

**Nota :** ces attractions de sport virtuel ont un caractère ludique et il ne faut pas les confondre avec les dispositifs sportifs d'initiation ou d'entraînement.

Le développement des **communications**, en particulier d'Internet, a ouvert un nouvel horizon pour la réalité virtuelle : celui de permettre d'être seul ou à plusieurs dans des environnements virtuels distants de la localisation géographique des personnes. Cette possibilité existe sans faire forcément appel aux techniques de la réalité virtuelle, comme pour les cités virtuelles qui fleurissent sur la toile d'Internet : les « concitoyens virtuels » se rencontrent dans des villes virtuelles à partir d'ordinateurs personnels, procurant des communications entre participants mais avec peu d'immersion et d'interaction physiques. La téléconférence classique, la vidéoconférence, est utilisée quotidiennement, mais la téléconférence immersive et interactive, permettant par exemple de manipuler un objet virtuel à plusieurs personnes géographiquement distantes n'est pas employée actuellement et est en développement dans des laboratoires de recherche. Les jeux vidéo en réseaux, multi-utilisateurs, exploitent aussi Internet et rarement les techniques spécifiques de réalité virtuelle. Mais si les immersions et les interactions physiques des joueurs sont faibles en général, les immersions et les interactions mentales peuvent être très importantes, rapprochant cette activité de la finalité de la réalité virtuelle.

**Nota :** les interactions physiques peuvent être importantes dans quelques cas, comme les courses cyclistes sur parcours virtuel : chaque compétiteur utilise son vélo d'appartement relié à son ordinateur personnel. Cette activité est commercialisée, mais est-elle souvent pratiquée ?

Malgré les dires de certains, l'association entre Internet et la réalité virtuelle se développera lentement dans les prochaines années, en dépit des avantages théoriques, à cause de deux freins majeurs : Internet a un faible débit de données et un temps de réponse non déterministe, qui ne sont guère compatibles avec des interactions en temps réel ; la réalité virtuelle implique un interfaçage comportemental complexe à mettre en œuvre chez un particulier (au-delà d'interfaces autres que clavier, écran d'ordinateur et souris 2D).

Si le grand public peut utiliser les dispositifs de réalité virtuelle dans les activités de loisirs et de communication, un autre secteur commence à exploiter ces techniques pour le grand public : celui de la **présentation publique de nouveaux projets environnement-**

taux, urbains, paysagistes ou autres. Il est toujours souhaitable de montrer, avant la réalisation d'un aménagement urbain, ses fonctionnalités et son impact au public ou aux décideurs. La réalité virtuelle se prête bien à cet objectif en permettant de visiter virtuellement le site urbain. Celui-ci peut être visualisé à l'échelle 1 sur grand écran, comme dans les salles immersives avec écran semi-cylindrique. L'interaction y est en général limitée à une simple navigation (déplacement) dans le lieu virtuel.

### 1.3.2 Applications professionnelles

Nous présentons ici les applications de la réalité virtuelle qui sont des outils de travail pour le professionnel. Ces applications peuvent être des outils orientés vers l'objet fabriqué, aidant à sa conception, sa maintenance, son évaluation ou sa vente. Elles peuvent être aussi orientées vers le professionnel pour le former, l'informer, l'aider à communiquer, etc. Avant d'exposer les principales applications suivant les secteurs d'activités, nous présentons une classification des applications de réalité virtuelle en fonction de leur **complexité de mise en œuvre**.

En se restreignant aux véritables applications de réalité virtuelle, la catégorie la plus simple est celle permettant à l'utilisateur une **navigation** dans l'environnement virtuel. L'ordinateur calcule en temps réel les images à partir d'un point de vue qui est modifié par l'utilisateur grâce à un organe de commande : manette, souris 2D ou capteur de localisation (traqueur). Si l'affichage des images se fait sur un simple écran d'ordinateur, nous sommes à la frontière de la réalité virtuelle, l'immersion et l'interactivité étant souvent faibles. Si l'affichage se fait sur un grand écran plat ou semi-cylindrique (quelques mètres de côté ou de diamètre) dans une salle immersive, de type de salle de cinéma, l'immersion visuelle est plus importante et efficace. En général, une seule personne aux commandes de l'ordinateur dirige la navigation et les autres observateurs sont des spectateurs inactifs (figure 3).

Quand l'utilisateur, en général immergé seul dans le monde virtuel, peut **manipuler des objets** avec la main grâce à un gant de données (§ 3.3) ou un capteur de localisation à trois ou six degrés de liberté (traqueur) (§ 3.2), nous sommes dans une catégorie classique d'applications courantes de la réalité virtuelle. L'interaction avec les objets est plus ou moins naturelle et l'immersion visuelle est différente suivant le type d'interface visuelle exploité (§ 3.1) : grand écran plat, salle immersive ou casque de réalité virtuelle (que certains nomment casques immersifs ou visiocasques). Suivant les objectifs recherchés d'immersion visuelle, une interface visuelle peut être plus efficace que les autres : par exemple, un grand écran peut être plus immersif qu'un casque si l'observateur n'a pas à regarder dans toutes les directions. Le champ de vision peut être plus grand face à un grand écran que dans un casque.

Quand l'utilisateur peut **manipuler des objets avec retour tactile** sur un ou plusieurs doigts (§ 3.5), l'application est un peu plus complexe à mettre en œuvre que dans le cas précédent, mais offre de nouvelles potentialités : la personne perçoit plus aisément qu'elle touche ou pas les objets manipulés. Techniquement, ce n'est pas trop complexe à mettre en œuvre, ce qui n'est pas le cas de la catégorie suivante.

Quand l'utilisateur peut **manipuler des objets avec retour d'effort** (§ 3.6), sur la main en général, il va ressentir des forces et éventuellement des couples. La perception de l'environnement virtuel est grandement amplifiée, mais en contrepartie, cela implique une complexité importante de l'interface à mettre en œuvre. Les applications effectives dans le milieu professionnel sont moins importantes, mais beaucoup de chercheurs travaillent dans cette problématique du retour d'effort, qui représente un défi important en réalité virtuelle.

Quand l'utilisateur est en immersion et interaction avec un environnement virtuel sur un **simulateur de transport mobile** grâce à une plate-forme sur vérins, l'application est en général très immersive, mais avec du matériel relativement très onéreux,



**Figure 3 – Simulation de piétons en environnement urbain dans la salle immersive de l'Institut de recherche en informatique et systèmes aléatoires (IRISA) de Rennes** (doc. IRISA)

réservé aux entreprises du domaine des transports et aux parcs d'attraction.

Cette classification a pour but de montrer les principales catégories d'application actuelles par ordre de difficulté technique, mais toutes les variantes sont possibles. On peut ajouter dans tous ces cas un son monophonique, stéréophonique ou spatial (sources sonores localisées dans l'espace virtuel). De même, nous n'avons classé que les applications mono-utilisateur. D'autres possibilités sont offertes si l'on souhaite immerger plusieurs personnes, qu'elles soient sur un même site géographique ou sur des sites distants et reliés par Internet. Enfin, en général, plus l'application a des potentialités intéressantes d'immersion et d'interaction efficaces et plus elle est difficile à réaliser techniquement.

Concernant les **domaines d'applications professionnelles**, nous ne citons que les plus importants en terme de débouchés. Le cas de la conception d'un produit par les techniques virtuelles est présenté au paragraphe 1.3.3. En dehors de ce cas, l'architecture, la médecine, les activités commerciales dont le marketing, la formation du personnel, en particulier à la maintenance, la communication intraentreprise et extraentreprise sont des domaines qui peuvent exploiter efficacement les techniques de la réalité virtuelle.

■ Dans le secteur de l'**architecture**, le développement des techniques de présentation de bâtiments virtuels doit avoir un impact économiquement important à moyen terme, même si, à court terme, des freins culturels et techniques existent. Il n'est pas aussi évident de passer, par exemple, d'une vente de maison individuelle sur plan papier à une vente par immersion dans une maison virtuelle. Nombre de nos concitoyens ne sont pas habitués aux représentations virtuelles et n'ont pas encore une grande confiance en ces outils, malgré leurs potentialités intrinsèques pour l'architecture : une représentation virtuelle tridimensionnelle d'un bâtiment est plus facile à comprendre et à évaluer qu'un plan bidimensionnel sur papier. La perception des dimensions d'un bâtiment à l'échelle 1/1 est une caractéristique utile pour se faire une représentation correcte, surtout en volume. Aucun plan papier ne peut rendre cela, ce qui nous donne la conviction qu'à moyen terme, la réalité virtuelle ne peut qu'être exploitée en architecture.

■ La **médecine** est un autre secteur où la pertinence et l'efficacité des techniques de réalité virtuelle ne font aucun doute : l'imagerie médicale tridimensionnelle, couplée à la réalité virtuelle, aide le praticien à la préparation et à l'exécution d'une opération chirurgicale. La chirurgie est composée de tâches manuelles (sensorimotrices) complexes et spécifiques. L'immersion et l'interaction

sensori-motrices sur un modèle virtuel du corps du patient, issu de l'imagerie médicale, sont exploitables pour l'entraînement des gestes du chirurgien. Elles peuvent aussi permettre une vérification de la stratégie opératoire, avant ou pendant l'intervention. Au-delà de l'activité chirurgicale, la médecine peut profiter de l'essor des techniques virtuelles et du développement d'Internet pour la télémédecine.

**Nota :** en général, la télémédecine concerne plutôt l'échange de données médicales entre médecins ou entre un praticien et son patient. Nous sortons donc du cadre de la finalité de la réalité virtuelle.

La téléchirurgie profite de l'essor des techniques virtuelles : au lieu de pratiquer de grandes incisions sur le corps du patient, le chirurgien peut insérer les outils chirurgicaux par une petite ouverture et téléopérer ses actions. Pour accomplir cette tâche, le chirurgien peut agir sur un modèle virtuel, qui fait interface entre le corps du patient et lui.

■ Cette méthodologie se retrouve en **téléopération sur zone distante ou dangereuse**. Au lieu d'agir à distance par l'intermédiaire direct d'un robot réel, l'opérateur perçoit et commande un robot virtuel, qui est un modèle du robot réel. Le robot virtuel est situé dans un environnement virtuel, qui est un modèle de la scène réelle distante. Les actions de l'opérateur sur le robot virtuel sont répercutées sur le robot réel. Un des intérêts de cette méthode est d'obtenir des perceptions prédictives : si les modélisations sont suffisamment exactes, les réponses aux actions réelles peuvent être prédictées sur la modélisation du robot virtuel dans son environnement virtuel, avant le retour des informations réelles de la scène distante.

■ Un secteur qui verra se développer de plus en plus les environnements réels est celui des **activités commerciales**, dont le **marketing**. La réalité virtuelle peut servir pour l'analyse des outils du commerce : l'étude de l'aménagement d'un magasin est plus efficace s'il est possible d'immerger des consommateurs dans un modèle virtuel, avant construction, pour le tester. L'analyse du comportement d'achat des consommateurs dans un magasin virtuel, conception brevetée, que nous avons conçue avec Sim Team pour l'entreprise IN VIVO [5], permet de valider l'impact des emballages des produits (figure 4).

Ces techniques virtuelles peuvent aussi être un complément au développement du commerce électronique, en proposant une interaction et une immersion plus efficaces. Mais il est difficile de développer sur les ordinateurs personnels grand public des interfaces comportementales à bas prix. Il est délicat de manipuler des modèles 3D d'objets avec une souris classique 2D (c'est une efficace interface comportementale au niveau 2D !). L'immersion visuelle sur un petit écran d'ordinateur restreint le champ d'application des environnements virtuels.

■ Toujours dans le secteur commercial, les **services de vente et d'après-vente** peuvent utiliser la réalité virtuelle pour présenter aux clients le produit qui sera fabriqué.

■ Certaines **formations** [TE 5 975], principalement celles faisant intervenir des actions physiques, composent un secteur qui peut bénéficier des derniers développements des mondes virtuels. Il peut être opportun de former des sujets à des tâches simulées en environnement virtuel. L'écart entre ces actions virtuelles et celles réelles est peut-être non négligeable, mais ce n'est pas forcément un obstacle quand il s'agit d'apprendre un protocole d'opérations ou un comportement spécifique. La formation peut être plus délicate à réaliser s'il s'agit d'apprendre des gestes précis, mais cela est envisageable, comme nous l'avons indiqué pour la formation en chirurgie.

**Exemple :** nous avons collaboré avec la direction de la recherche de la SNCF pour réaliser un simulateur pour la formation à des tâches sur des infrastructures ferroviaires [6].

La formation semble être efficace, comparée à la même formation en environnement réel. La formation en environnement virtuel



Figure 4 – Magasin virtuel pour IN VIVO, conçu et réalisé par l'École des mines de Paris et Sim Team (doc. EMP)



Figure 5 – Maintenance par un opérateur équipé d'un visiocasque et d'un gant numérique (doc. Sim Team)

offre des avantages qu'il faut savoir exploiter : il est possible de changer les conditions et les paramètres de l'environnement (pour faciliter ou complexifier la séance de formation), de former les personnes sans danger, de représenter symboliquement l'environnement pour une meilleure compréhension par le formé. Par exemple, la transparence partielle des objets permet de mieux percevoir leur géométrie tridimensionnelle et/ou leur fonctionnement.

■ La **formation à la maintenance et au dépannage** d'un produit ou d'une installation peut être étudiée virtuellement (figure 5). Ces activités sont semblables à toute formation en environnement virtuel, mais dans le cas de la maintenance ou du dépannage de mécanismes ou d'assemblages (voiture, machine, etc.), la perception du retour d'effort sur les mains de l'opérateur est souvent indispensable. Il est cependant plus difficile de réaliser des dispositifs avec retour d'effort ou tactile réellement efficaces. Cette problématique est actuellement abordée principalement dans des centres de recherche.

### 1.3.3 Défis industriels du prototypage virtuel

### 1.3.3.1 CAO et CARV

La CAO (conception assistée par ordinateur) évolue constamment pour mieux répondre aux besoins des concepteurs. Depuis le début de l'introduction de l'ordinateur dans les bureaux d'études, la CAO n'a cessé d'évoluer. Au début, l'objectif était principalement de remplacer le dessin industriel par son homologue numérique en 2D. C'était l'époque du DAO, le dessin assisté par ordinateur. Ensuite, l'ordinateur avait pour tâche de simuler des phénomènes physiques permettant de valider les choix de conception : la CAO « classique » exploitant des méthodes numériques, calculées en temps différé (comme la méthode des éléments finis, etc.). Les résultats obtenus permettaient à l'ingénieur de valider *objectivement* sa conception, sous réserve de la qualité de sa modélisation. La puissance des ordinateurs augmentant, le cas particulier de simulation des lois optiques permettait alors de représenter sous forme d'images photoréalistes le produit fini et donc de juger, *subjectivement*, de son design, de son esthétique. C'était le début de la représentation virtuelle du produit *fini* pour l'utilisateur et non pour le concepteur. Cette représentation était figée et longue à obtenir. Il fallut attendre les ordinateurs actuels aux possibilités encore modestes en temps réel pour introduire la réalité virtuelle dans le domaine de la conception : la CARV (conception assistée par la réalité virtuelle). La réalité virtuelle apporte une nouvelle approche lors de la conception d'un produit : elle permet à un utilisateur de tester et de valider le produit, principalement à partir de critères *subjectifs* (esthétiques, ergonomiques, etc.). Deux fonctionnalités de la CARV sont très intéressantes pour le concepteur :

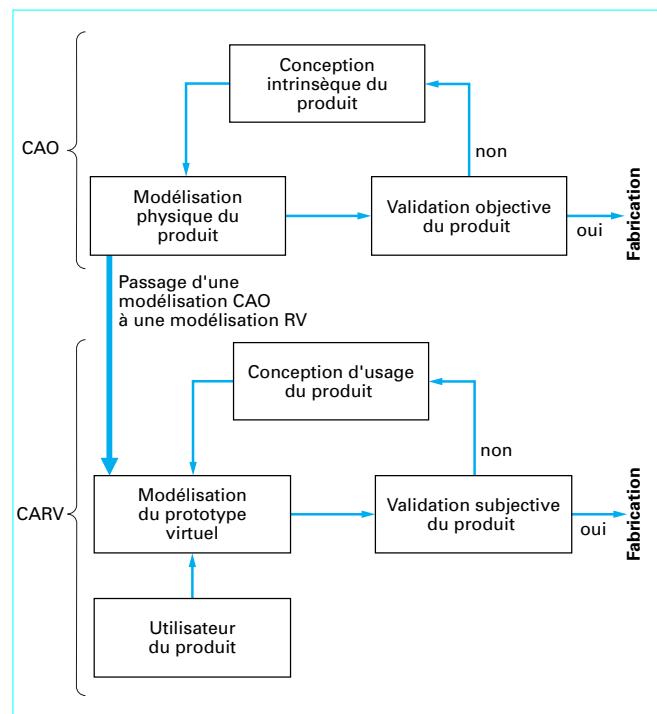
- éviter, partiellement en général, la réalisation de prototypes réels, longs à fabriquer et onéreux ;
  - faire varier des paramètres du produit sur le prototype virtuel pour l'optimiser, en tenant compte de critères subjectifs.

Le défi industriel du **prototypage virtuel** (à ne pas confondre avec le prototypage rapide) permet donc à toute personne (concepteur, testeur, utilisateur ou client) d'être immergé et d'interagir en situation sur le produit avant que ce dernier soit réellement fabriqué.

**Nota :** le prototypage rapide consiste à fabriquer physiquement dans une matière appropriée (résine, etc.) le modèle géométrique du futur produit, durant la phase de conception.

Cela offre de nouvelles possibilités de tests mais aussi de communication et de conception. Il est toujours difficile de se comprendre entre corps de métier différents, entre concepteurs et clients, sur des représentations papier ou numériques. La CARV permet de pallier en partie ces incompréhensions. Mais il ne faut pas croire qu'elle résout par enchantement tous les problèmes, elle ouvre seulement des perspectives. Il peut être efficace de permettre à des personnes de métiers différents de concevoir en collaboration et simultanément (travail collaboratif) à partir d'un même prototype virtuel, et non de travailler séquentiellement. Dans l'exemple classique de la conception d'une voiture, la CARV permet aux stylistes et aux ergonomes de travailler en collaboration plus étroite avant toute réalisation de maquette physique. Mais si les outils sont disponibles, avec leurs limites, il faut aussi un changement de culture qu'impose le travail collaboratif. Il est, pour certains, plus facile de montrer les limites des outils et du travail collaboratif que de remettre en cause ses méthodes de travail. La réalité virtuelle et son exploitation par le travail collaboratif doivent modifier le cycle en V de la conception. A différentes étapes du cycle, des étapes de tests et de validation sont envisageables.

Le prototypage en **CAO classique** peut être schématisé principalement par une boucle. Avant de commencer la fabrication, différentes modélisations physiques (mécanique, thermique, électrique, acoustique, électronique, etc.) sont réalisées sur le modèle numérique du produit pour valider sa conception. Les temps de calcul ont ici peu d'importance, seules la précision et la validité des calculs sont cruciales. Par rebouclage, la conception est affinée.



**Figure 6 – Boucles du prototypage en CAO classique et en CARV**

pour améliorer les caractéristiques objectives du produit par rapport aux lois physiques étudiées.

Le prototypage en **CARV** peut également être schématisé par une boucle : avec l'utilisateur du produit incorporé dans le prototype virtuel, des critères humains subjectifs, non pris en compte en CAO classique, peuvent être analysés dans la boucle de conception. La figure 6 présente ces deux processus [7].

Pour réaliser la modélisation du prototype virtuel, il faut compléter le modèle géométrique du produit par la modélisation fonctionnelle de l'objet (comportement cinématique, acoustique, optique, etc.).

**Nota :** des images photoréalistes du produit sont calculées en connaissant les caractéristiques optiques de leurs surfaces, qui ne sont pas en général incorporées dans les modèles CAO.

Le produit étant en utilisation, la modélisation de la scène où il se situe est souvent indispensable. Par exemple, pour un train, l'infrastructure ferroviaire est utile pour des études d'ergonomie de la cabine de la locomotive.

Toutes ces modélisations doivent être compatibles avec un fonctionnement en temps réel, ce qui est encore un verrou technologique pour le développement de la CARV. C'est un nouveau défi difficile, qui ne sera vaincu que par des efforts conjugués sur l'augmentation de puissance des ordinateurs et sur l'amélioration des modélisations et des logiciels de réalité virtuelle. Un autre défi du prototypage virtuel concerne les moyens de récupération des données utiles des modèles géométriques de la CAO classique, car on ne peut envisager de remodéliser le produit.

**Nota :** les données établies en CAO classique ne sont pas toutes utiles en CARV, comme le tolérancement, les états de surface, les cotations, les procédés de fabrication, etc.

Le lecteur doit bien comprendre qu'un modèle issu de la CAO possède des caractéristiques propres pour la modélisation tridimensionnelle des lois physiques (maillage pour la méthode des éléments finis par exemple). Un modèle pour la RV doit être

exploité en temps réel avec des caractéristiques différentes (visualisation « réaliste » des surfaces par exemple). Comme il doit permettre la simulation en temps réel, son « poids » informatique est crucial. On ne peut pas en général se permettre de représenter sa géométrie complète (chanfrein, jeux entre pièces, filetage, etc.). Mais heureusement, tout n'a pas besoin d'être modélisé avec une grande précision, cela dépend des objectifs de l'application CARV. Le passage d'un modèle CAO à un modèle CARV n'est pas automatique, car des critères subjectifs sont à prendre en compte. Par exemple, avec quelle finesse géométrique doivent être représentées les surfaces courbes pour que leur visualisation soit esthétiquement correcte ? Le passage ne peut être pour l'instant que semi-automatique. Une autre difficulté est aussi à prendre en compte : si les concepteurs veulent changer une caractéristique du prototype virtuel, directement sur lui, il est très difficile de remonter automatiquement l'information sur le modèle CAO.

La CARV peut donc permettre d'analyser, de tester et de valider des critères subjectifs humains.

### 1.3.3.2 Principales applications de la CARV

#### ■ Conception esthétique

La qualité esthétique d'un produit ne pouvant être analysée que par l'homme, ce dernier doit être immergé dans le prototype virtuel. Cette fonctionnalité est très utilisée par les fabricants de produits dont l'aspect esthétique est primordial pour la vente (automobiles, avions, trains, appareils ménagers, etc.). Mais la conception esthétique n'est pas encore évidente car la puissance des ordinateurs et des interfaces visuelles n'est pas toujours suffisante. Les reflets des surfaces et les transparencies des matières sont délicates à rendre en temps réel (c'est-à-dire à calculer en 40 ms pour obtenir une fréquence d'affichage de 25 images par seconde).

#### ■ Conception ergonomique

Un opérateur peut tester l'ergonomie du produit s'il est immergé dans le prototype virtuel et s'il peut l'utiliser fonctionnellement : par exemple, tester l'accessibilité et le confort des commandes d'un poste de travail ou des équipements intérieurs d'un véhicule. La visualisation est presque toujours moins contraignante pour la conception ergonomique que pour la conception esthétique d'un produit. Par contre, si l'étude ergonomique exige une simulation avec des retours d'effort, les difficultés sont importantes et il est parfois impossible de produire une simulation réaliste.

#### ■ Conception de la maintenance du produit

L'étude de l'encombrement des pièces, de leur montage ou de leur démontage, peut être réalisée sur le prototype virtuel pour la conception de la maintenance du produit. Comme pour la conception ergonomique du produit, la simulation des retours d'effort pose des problèmes délicats à résoudre. Il n'est pas toujours très simple de vérifier virtuellement l'assemblage de formes complexes, surtout quand celles-ci sont assemblées manuellement par l'opérateur. Il est actuellement difficile de déterminer en temps réel les collisions entre objets complexes, surtout si certains sont de forme variable, comme les mains d'un opérateur. Et la détermination des efforts corrects des assemblages n'est pas simple non plus. Il faut donc, dans le cas de la conception à la maintenance, étudier si seulement des conditions géométriques d'assemblage sont suffisantes pour la validation ou s'il est indispensable d'ajouter la simulation des efforts.

#### ■ Visualisation de phénomènes physiques

Si un ingénieur peut aisément interpréter les résultats numériques d'une simulation, il n'en est pas toujours de même pour l'utilisateur du produit. L'immersion et l'interaction avec le phénomène physique concerné peuvent alors être efficaces pour valider une conception par rapport à des critères subjectifs de l'utilisateur (client, décideur ou usager). Mais dans ce cas, la simulation du

phénomène physique doit être calculable en temps réel avec un certain niveau de réalisme.

**Exemple :** une simulation en temps réel, avec immersion grâce aux techniques de réalité virtuelle, peut permettre à des marins de visualiser les mouvements d'un bateau en fonction de la houle, à partir d'un code déterminant le comportement du navire.

La CARV peut donc permettre de valider la conception d'un produit à partir de critères subjectifs humains, comme ceux cités précédemment. Bien d'autres cas peuvent être décrits selon le type de produit et en rapport avec ses fonctionnalités. Le lecteur doit retenir que dès qu'une fonctionnalité d'un produit doit être appréciée suivant un critère humain subjectif, la CARV peut être employée, si bien sûr elle est *réalisable* et *réaliste*.

Ainsi, le prototypage virtuel offre de nouvelles méthodes de travail pendant les phases de conception. C'est un outil intéressant dans la démarche de conception. Il peut éviter la réalisation de maquette physique pour réduire les temps et ou les coûts de conception. Les techniques de réalité virtuelle et d'Internet, associant plusieurs personnes distantes sur une représentation virtuelle d'un produit, la « réalité virtuelle distribuée », permettent le travail collaboratif, très utile pour les entreprises travaillant sur plusieurs sites ou sur des installations distantes. Pour suivre la fabrication d'un produit ou l'avancement d'un chantier, la maquette virtuelle permet de représenter l'évolution des travaux à un instant donné. Elle sert de référence et offre différentes représentations visuelles du produit si nécessaire, selon le métier de l'utilisateur.

## 2. Interfaçage comportemental

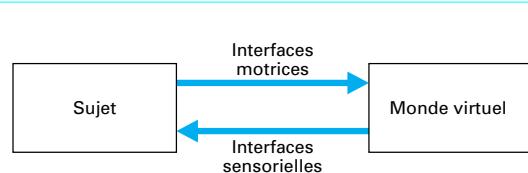
### 2.1 Concepts de base de l'immersion et de l'interaction

Nous mettons ici l'accent sur les difficultés inhérentes à tout dispositif de réalité virtuelle. Elles sont d'ordre technique pour les interfaces, mais aussi d'ordre ergonomique et psychologique, ce que tout ingénieur travaillant dans ce domaine ne doit pas ignorer sous peine d'échec. Malgré l'aspect très technique à première vue de la réalité virtuelle, il ne faut pas oublier que dans tous les cas, nous souhaitons mettre une personne en immersion et en interaction avec un environnement par tous ses sens.

**Nota :** le sens kinesthésique est souvent oublié, ainsi que les perceptions proprioceptives des efforts sur le corps. Le sens du toucher fait partie de la sensibilité cutanée qui englobe le toucher, les perceptions des vibrations, des pressions superficielles et des variations de température.

Après intégration et traitement des informations dans les centres nerveux (cerveau et moelle épinière), ceux-ci transmettent les actions motrices aux muscles squelettiques, ainsi qu'aux muscles oculaires et aux muscles des cordes vocales. Le comportement moteur de l'homme se traduit principalement par des mouvements, à l'exception notable de la parole. Toutes les perceptions sensorielles sont à analyser pour déterminer celles qui sont importantes à simuler selon leur impact sur l'application visée.

Nous avons fait le choix fondamental d'analyser le processus d'immersion et d'interaction sur trois niveaux [3]. Au premier niveau, nous analysons l'interfaçage entre l'homme et le monde virtuel au niveau de ses sens et de ses réponses motrices. C'est à ce niveau qu'il faut réaliser physiquement les « connexions » entre le sujet et l'ordinateur avec les interfaces matérielles appropriées. Nous parlons dans ce cas d'**immersion** et d'**interaction sensorielle**.



**Figure 7 – Interfaçage comportemental d'un sujet dans un monde virtuel**

**motrices**, puisque l'ordinateur est connecté physiquement au corps de l'utilisateur au moyen de ses sens et de ses réponses motrices. Comme nous l'avons indiqué précédemment, pour bien spécifier les problèmes d'interfaçage induits par la réalité virtuelle, nous avons défini l'expression *d'interface comportementale* (§ 1.1) : il s'agit d'une interface qui permet d'exploiter un comportement humain (physique et mental) dans un environnement virtuel. Par exemple, pour permettre au sujet de se déplacer dans ce monde virtuel, nous pouvons lui proposer de marcher physiquement grâce à une interface comportementale composée d'un tapis roulant et d'un guidon de direction. Les interfaces comportementales sont évidemment de deux types : elles sont composées d'*interfaces sensorielles* et d'*interfaces motrices*. Les interfaces sensorielles informent l'utilisateur par ses sens de l'évolution du monde virtuel, comme les interfaces visuelles affichant des images de synthèse. Les interfaces motrices informent l'ordinateur des actions motrices de l'homme sur le monde virtuel, comme le tapis roulant associé à un guidon. À ce premier niveau sensori-moteur, nous pouvons donc schématiser l'*interfaçage physique* entre le sujet et le monde virtuel (figure 7).

**Nota :** nous préférons parler d'interfaçage entre le sujet et le *monde virtuel*, et non avec l'ordinateur, car un des objectifs est que le sujet ne perçoive pas l'ordinateur, mais le monde virtuel, lors de son immersion.

Cette représentation est limitée au premier niveau sensori-moteur d'immersion et d'interaction. Il ne représente donc que partiellement les problèmes d'immersion et d'interaction à étudier. C'est une approche réduite aux aspects techniques de la réalité virtuelle. Ceux-ci ne doivent pas être les seuls abordés sous prétexte que c'est seulement grâce à l'essor des techniques informatiques que les environnements virtuels interactifs sont envisageables. L'interfaçage comportemental pose aussi un problème d'interfaçage mental du sujet : à partir de quels modèles mentaux la personne va-t-elle percevoir, penser et agir ? Le sujet doit avoir un comportement direct dans le monde virtuel, les interfaces devant lui être transparentes. Il est souhaitable que le sujet ait un comportement mental correspondant à une action motrice ou à une perception sensorielle souhaitées (se déplacer, observer, manipuler, etc.) et non qu'il ait un comportement physique spécifique de manipulation d'interfaces matérielles.

Nous devons analyser à un deuxième niveau d'**immersion** et d'**interaction mentales** les problèmes psychologiques que pose l'interfaçage. Nous nous sommes inspirés des travaux du psychologue Rabardel [8] qui décrit dans son approche instrumentale de l'interfaçage une problématique similaire. Elle fait appel à la notion de schéma sensori-moteur : les « automatismes » sensori-moteurs acquis par l'utilisateur dans le monde réel et que nous essayons de transposer dans le monde virtuel.

**Exemple :** pour permettre à un consommateur de se déplacer dans un magasin virtuel, nous lui proposons comme interface comportementale (motrice dans ce cas) un chariot (figure 8). Il le manipule pour se mouvoir dans les allées, sans effort mental exagéré, car il exploite inconsciemment un automatisme acquis dans le monde réel.

Suivant les interfaces comportementales choisies, certains sens ne sont pas stimulés, d'autres le sont différemment que dans le



**Figure 8 – Chariot instrumenté pour le déplacement « naturel » dans le magasin virtuel** (doc. EMP)

monde réel et l'ensemble des stimulations effectives peut donner des incohérences que le cerveau doit gérer sous peine d'échec.

**Exemple :** l'utilisateur marchant sur un tapis roulant perçoit son propre mouvement, visuellement grâce aux défilements des images sur l'écran, proprioceptivement par le mouvement de ses pieds, mais perçoit son immobilité par son système vestibulaire, ne détectant aucune accélération de son corps.

Ce problème des incohérences sensori-motrices est inhérent aux techniques de la réalité virtuelle. Il doit être analysé sérieusement et si ces conséquences sont imprévisibles, il faut réaliser des tests préliminaires pour connaître les éventuelles perturbations sensori-motrices et mentales sur le sujet. Le cerveau peut-il s'y adapter ou va-t-il les refuser ? Les connaissances des spécialistes des sciences cognitives peuvent nous aider à valider les différents interfaçages comportementaux mis en œuvre.

Si des difficultés technico-économiques ne permettent pas d'utiliser un schème sensori-moteur et donc un comportement naturel de la personne, nous pouvons employer à la place une *métaphore virtuelle*. Nous lui proposons une image symbolique de l'action ou de la perception souhaitée.

**Exemple :** dans le magasin virtuel, nous aurions pu proposer au consommateur de se déplacer « symboliquement » en cliquant simplement avec une souris sur le plan du magasin affiché à l'écran. Cette métaphore virtuelle est facilement compréhensible par l'usager mais elle ôte la notion d'immersion et d'interaction « naturelles ».

Nous pouvons exploiter aussi la substitution sensori-motrice, si certains sens ou certaines réponses motrices sont techniquement difficiles à réaliser. Par exemple, il est peut-être difficile de transmettre des efforts sur la personne par une interface à retour d'effort. Il est possible de contourner partiellement la difficulté en substituant le sens de perception des efforts par l'ouïe : l'utilisateur manipulant un objet, quand ce dernier rencontre un obstacle, un son est émis. Cette substitution n'est pas aussi efficace qu'avec des retours d'effort mais permet de prévenir l'utilisateur de l'obstacle.

**Nota :** les développements de notre méthodologie d'immersion et d'interaction mentales dans un monde virtuel interactif sont présentés dans nos travaux de recherche [3].

Mais pour aborder tout dispositif de réalité virtuelle, il faut également analyser l'immersion et l'interaction du sujet à un troisième niveau, l'**immersion** et l'**interaction fonctionnelles**, qui

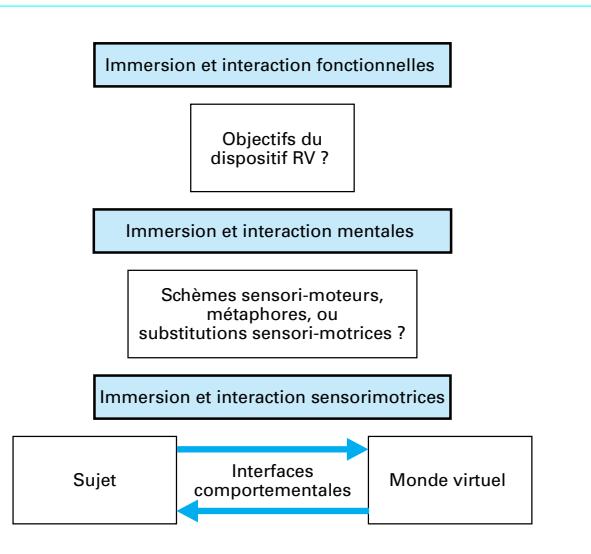


Figure 9 – Méthodologie d'analyse en trois niveaux de l'immersion et de l'interaction du sujet dans un monde virtuel

représente les objectifs de l'application. Ce niveau ne doit pas être occulté par les difficultés induites par les deux premiers. Quelles sont les fonctions que le dispositif RV doit proposer pour réussir l'application, tout en sachant qu'il ne s'agit pas de faire une copie « la plus réaliste » du monde réel. Comment la personne doit-elle se déplacer, si besoin ? Comment doit-elle observer le monde virtuel qui l'entoure ? Comment doit-elle agir sur ce monde ? Toutes les réponses à ces questions doivent permettre de déterminer les objectifs des immersions et des interactions fonctionnelles (figure 9). Pour analyser l'interfaçage entre l'homme et le monde virtuel, il faut en conséquence faire appel à des connaissances multidisciplinaires. Des travaux de recherche sont encore en cours dans ce domaine, tous les aspects techniques, ergonomiques et psychologiques n'ayant pas été étudiés en profondeur et testés dans des applications effectives. Nous pouvons espérer qu'après plusieurs années d'expérimentation, le savoir-faire dans ce domaine sera plus conséquent et permettra la conception de dispositifs de réalité virtuelle plus appropriés. Le paragraphe suivant présente ce qui est maintenant bien maîtrisé techniquement : les interfaces matérielles, disponibles commercialement, permettant de concevoir des interfaçages comportementaux de l'homme dans un monde virtuel.

### 3. Taxonomie des interfaces

Les interfaces matérielles spécifiques à la réalité virtuelle ont été à la source de l'essor et de l'engouement du public pour les mondes virtuels interactifs. Ce paragraphe présente les principales interfaces disponibles commercialement, en les classant en fonction des sens ou des réponses motrices sollicitées.

#### 3.1 Interfaces visuelles d'immersion

##### 3.1.1 Casque de réalité virtuelle ou visiocasque

Il est apparu un nouveau type de matériel pour la vision dans les années 1980 : le casque immersif ou visiocasque (HMD :

*head-mounted display*) dont l'objectif est d'immerger entièrement l'observateur en lui proposant une vision stéréoscopique à l'aide de deux petits écrans, placés près des yeux. Pour permettre l'accommodation des images affichées, deux systèmes optiques s'insèrent entre les yeux et les écrans. Ceux-ci sont techniquement difficiles à réaliser car ils doivent fournir un grand champ visuel. Ce dernier, malgré les progrès réalisés, est toujours plus faible que celui du système visuel humain : il est compris entre 50° et 120° en général, au lieu de 180° pour la vision humaine, les yeux et la tête étant fixes. Les casques disposent d'un capteur de localisation de la tête de l'utilisateur permettant d'afficher les images correspondant à la direction de sa tête. C'est l'**immersion du regard** qui est le principal progrès de ce type d'interface visuelle. L'observateur se sent immergé visuellement, au cœur du monde virtuel. Mais si cette potentialité est très intéressante en théorie, elle se heurte à bien des difficultés techniques et psychologiques. Il n'est pas évident pour les constructeurs de casques de réaliser un champ de vision suffisamment grand, avec une zone de vision stéréoscopique conséquente et d'afficher des images de résolution satisfaisante. La difficulté technique principale est la fabrication de mini-écrans de très haute résolution. Si un observateur peut se satisfaire de 1 000 pixels horizontalement sur un écran d'ordinateur, observé sous un angle de vision de 25° environ, il ne peut accepter la même quantité de pixels répartis sur 50° à 80°.

**Nota :** pour obtenir un champ de vision de 120°, totalement stéréoscopique (vu par les deux yeux), l'angle de vision pour chaque écran doit être de 120° ! Cela n'est pas possible actuellement. Pour un œil, le champ de vision monoscopique proposé dans un visiocasque est de 80° maximum.

Les écrans les plus performants en terme de résolution (très onéreux) étant limités à 1 280 pixels, les visiocasques sont encore des interfaces visuelles limitées en ce qui concerne la définition des images. Des difficultés psychologiques existent aussi pour l'usager d'une telle interface : la personne, surtout novice, se sent isolée des autres et a souvent du mal à trouver ses repères dans le monde virtuel. La vision stéréoscopique, surtout si elle est mal réglée ou si le visiocasque est mal positionné, procure des contraintes et des fatigues visuelles. Il faut en conséquence être très prudent dans l'utilisation d'une telle interface et prendre les précautions d'usage avec des tests préalables de réglage, dont ceux de la distance interoculaire et de la netteté des images.

Il existe principalement deux types de casques immersifs actuellement commercialisés : les visiocasques avec écrans à tube cathodique (CRT) et les visiocasques avec écrans à cristaux liquides (LCD). L'avantage principal de la technologie des casques CRT est la résolution relativement correcte de l'affichage (jusqu'à 1 280 × 1 024 pixels par œil). Les inconvénients en sont la masse, l'encombrement et surtout le prix, comparativement aux casques immersifs à écrans à cristaux liquides. Il faut compter de plusieurs dizaines de milliers à cent mille euros pour ce type de casque. Le champ de vision peut être réglé jusqu'à 120°, mais c'est souvent au détriment de la zone de vision stéréoscopique (*overlap*) qui peut abaisser jusqu'à 40 % du champ de vision total, voire moins.

Les visiocasques avec écrans à cristaux liquides sont comparativement moins chers (environ 10 000 €), mais leur résolution est plus faible : au mieux, deux mini-écrans couleur de 800 × 600 pixels chacun. La vision devant de tels écrans à faible résolution donnerait l'impression d'observer la scène à travers un maillage dû aux interstices entre les pixels s'il n'y avait pas de système optique adapté. Pour résoudre ce défaut, il faut dépixelliser optiquement par différentes techniques : film polymère composé de millions de microlentilles, défocalisation des images, etc. Des recherches importantes sont entreprises pour augmenter le nombre de pixels sur les écrans LCD, mais le marché étant relativement faible, les nouveaux écrans LCD à plus forte résolution tardent à apparaître.

##### 3.1.2 Projection sur écran

Malgré l'attrait des casques de réalité virtuelle, un grand écran plat ou courbe peut fournir dans bien des cas une immersion

visuelle plus performante, selon le degré d'immersion fonctionnelle recherché. Dans notre application de magasin virtuel, nous avons préféré faire l'immersion visuelle sur grand écran en projetant une image à haute résolution ( $3\,072 \times 1\,536$  pixels), composée de six sous-images de vidéoprojecteurs standards  $1\,024 \times 768$  pixels. L'immersion du regard (regarder dans toutes les directions) n'étant pas indispensable, l'immersion devant une grande image est préférable et plus efficace. Les dispositifs de (rétro)projection existent depuis plusieurs dizaines d'années, depuis l'apparition de la simulation en aéronautique. Les grands moyens techniques et financiers consacrés à la simulation ont permis de fabriquer des interfaces visuelles présentant une qualité de résolution élevée. Différents dispositifs permettent la projection des images. Elles peuvent être affichées sur un ensemble de moniteurs jointifs, fournissant une image plate. C'est la technique du *mur d'images*. Une autre solution consiste à exploiter des vidéoprojecteurs qui permettent des images de grande taille. Plusieurs techniques de vidéoprojecteurs sont en concurrence : principalement, les tritubes (CRT), les LCD et les DLP (*digital light processing*) à base de matrice DMD (*digital micromirror device*). Ils présentent tous certains avantages et diffèrent par leur résolution, leur puissance lumineuse, leur contraste, leur fréquence de rafraîchissement et leur facilité de maintenance. La vidéoprojection peut se faire en projection directe, avec l'appareil du côté de l'observateur, ou en rétroprojection par derrière l'écran. Les dispositifs multiprojecteurs doivent être réglés pour permettre le raccordement (*edge blending*) entre les images de chaque vidéoprojecteur ainsi qu'une répartition homogène des couleurs et des intensités sur l'écran, qui peut être plat ou courbe. Cette technique permet d'atteindre des champs de vision de  $180^\circ$  avec des écrans semi-cylindriques qui équipent en général les salles immersives équipées de plusieurs dizaines de sièges.

### 3.1.3 Bureau immersif

Un autre type d'interface visuelle est apparu dans les années 1990 : le bureau immersif. Celui-ci affiche « sur un bureau » de type planche à dessin, les images, stéréoscopiques en général, projetées avec les mêmes techniques de rétroprojection que précédemment (figure 10). De plus, l'observateur porte souvent un capteur de localisation sur la tête qui permet d'afficher les images en relief en fonction de la position de sa tête. Il peut alors partiellement se déplacer pour observer l'objet virtuel suivant plusieurs points de vue. L'immersion visuelle tridimensionnelle est importante et est exploitée principalement pour l'observation d'un objet. Certains bureaux immersifs sont composés de deux écrans perpendiculaires jointifs (un horizontal et l'autre vertical) pour augmenter le champ de vision. Ces interfaces sont bien adaptées à l'observation à deux ou trois personnes, comme dans le cadre de la revue de projet en bureau d'études.

## 3.2 Capteurs de localisation

Les capteurs permettant une **localisation spatiale en temps réel** de tout point géométrique sont exploités couramment en réalité virtuelle. Ces capteurs de localisation, ou *traqueurs*, servent en général à positionner une partie du corps de l'utilisateur : la tête de l'utilisateur portant un visiocasque, la main ayant un gant numérique, etc. La personne peut donc agir sur le monde virtuel avec ce type d'interfaces motrices. Le capteur permet de mesurer les six paramètres (trois angles et trois distances) liés aux six degrés de liberté de tout solide. Le capteur universel n'existe pas. Tous les capteurs présentés ont au moins une contrainte d'exploitation ou des performances restrictives. Les principes physiques exploités actuellement sont variés, chacun ayant au moins un avantage par rapport aux autres. Nous ne citons ici que les principaux capteurs exploités en réalité virtuelle.



Figure 10 – Bureau immersif *Baron* de BARCO

### 3.2.1 Capteurs mécaniques

Avec ce type de capteur, il existe une liaison mécanique entre l'objet à localiser et son environnement, tout en laissant des libertés de mouvement à l'objet. La liaison mécanique est composée de bras articulés à l'extrémité desquels se trouve une rotule permettant des orientations angulaires. Les mouvements relatifs au niveau de la rotule ainsi qu'entre les barres mécaniques du système articulé ne sont que des rotations. Celles-ci sont mesurées par des potentiomètres ou des capteurs optiques incrémentaux. Ces mesures, aisées à réaliser, procurent les principaux avantages de ce type d'appareil. Les mesures sont très précises, rapides (plusieurs centaines par seconde) et le temps de réponse est très court, de l'ordre de quelques millisecondes. Un autre avantage est le prix relativement faible. L'inconvénient majeur est évidemment la limitation de l'étendue des mouvements. Ce capteur est principalement utilisé pour mesurer les mouvements de la tête, par exemple lorsque l'on désire faire des mesures d'ergonomie précises à l'intérieur d'un véhicule ; le conducteur restant assis, la contrainte de mouvement n'est pas très gênante.

### 3.2.2 Capteurs électromagnétiques

Ces capteurs sont constitués d'un émetteur, d'un ou plusieurs récepteurs et d'une unité électronique de mesure. L'émetteur est composé d'un ensemble de trois bobines, qui propage dans une zone sphérique de 1 m de rayon environ trois champs électromagnétiques, alternativement dans le temps. Le récepteur est également constitué de trois petites bobines qui mesurent les champs magnétiques, variables en fonction de la position du récepteur par rapport à l'émetteur. À partir de ces neuf mesures, les six degrés de liberté du récepteur par rapport à l'émetteur sont déterminés à la fréquence de 100 Hz environ. L'unité électronique, qui contrôle l'ensemble, transmet les valeurs calculées à l'ordinateur en communication avec l'appareil. Elle peut gérer plusieurs récepteurs (4 à 36 suivant le constructeur). L'ordre de grandeur du temps de réponse du capteur est en pratique de plusieurs dizaines de millisecondes.

Le problème principal de ces capteurs est qu'ils ne peuvent pas fonctionner dans un environnement métallique. Le champ magnétique variant dans le temps crée des courants de Foucault

dans les pièces métalliques, ce qui perturbe les mesures. Pour atténuer les courants de Foucault, un constructeur a choisi de réaliser les mesures avec des champs magnétiques impulsionsnels, générant peu de tels courants.

Les capteurs électromagnétiques présentent de bonnes performances en précision, en fréquence de mesure et ils ne sont pas sujets à des zones d'occultation dans leur étendue de mesure, comme les autres types de capteurs. Ils sont donc les plus employés pour les applications de la réalité virtuelle, malgré leur prix relativement élevé (plusieurs milliers d'euros). Ils ont pour principaux inconvénients la liaison électrique par câble, qui est une entrave à la liberté de mouvement de l'utilisateur, et l'obligation d'éliminer toute pièce métallique de leur environnement.

### 3.2.3 Capteurs à ultrasons

Ce type de capteur a pour principe physique la mesure de distances par des temps de propagation d'ultrasons dans l'air. La technique consiste à exciter à une fréquence ultrasonore donnée trois céramiques piézo-électriques qui se situent aux sommets d'un ensemble triangulaire, de 10 à 20 cm de côté. Un autre ensemble triangulaire plus petit de trois récepteurs recueille les trois ultrasons émis sur chaque récepteur. Les neuf mesures des différents temps de vol des ultrasons entre les émetteurs et les récepteurs permettent de déterminer la position du triangle composé des récepteurs. Il faut noter que cela n'est possible que si les émetteurs sont orientés vers les récepteurs, en conséquence, la zone d'étendue de mesure est limitée par des zones d'occultation.

L'unité électronique gère les émissions d'ultrasons et mesure leur temps de vol. Elle en déduit les paramètres de position et contrôle la communication avec l'ordinateur, en envoyant une cinquantaine de mesures par seconde. La liaison électrique par câble avec le récepteur est une autre entrave à la liberté de mouvement. Les capteurs à ultrasons ont pour principaux défauts leur faible précision et d'être facilement brûlés par tous les appareils qui émettent des ultrasons et par les échos sur les parois. Le faible coût de ce type de capteur est son principal avantage.

### 3.2.4 Autres types de capteurs

À partir du traitement d'images acquises par des caméras, il est toujours possible, en théorie, de déterminer la position d'un objet à l'aide d'au moins deux caméras. Mais les problèmes d'appariement stéréoscopique et d'occultation sont difficiles à résoudre dans le cas général. La lourdeur des calculs pour les traitements d'images en temps réel est un frein actuel au développement de ces techniques. Les solutions obtenues ne sont exploitable qu'au cas par cas. Il n'existe pas beaucoup d'offres commerciales pour une simple localisation spatiale, exploitable en réalité virtuelle, si ce n'est le cas de la capture de mouvement du corps (*motion capture*, § 3.4).

Il existe une série de capteurs, nommés capteurs sans source émettrice, dont les principes de mesure reposent sur la détection du champ magnétique terrestre, du champ de gravité ou des accélérations du mouvement de l'objet observé : les inclinomètres, les compas et les accéléromètres. Certains commencent à apparaître sur des casques immersifs à faible prix. Ils ont l'avantage d'être moins onéreux mais ils sont peu précis en général. Ces types de capteur ne donnent pas intrinsèquement les six degrés de liberté, sauf s'ils sont couplés entre eux.

## 3.3 Gants numériques

En réalité virtuelle, il est souvent nécessaire d'immerger la main de l'observateur pour lui permettre de manipuler un objet. C'est dans ce but que l'on a réalisé des gants numériques (gant de don-

nées). L'utilisateur peut alors saisir presque naturellement un objet virtuel et le manipuler. Mais il faut remarquer qu'un simple capteur de localisation peut en général suffire à la prise et à la manipulation d'un objet. Grâce aux capacités du virtuel, il suffit, par exemple, de détecter le rapprochement entre l'objet et un curseur manipulé par le capteur de localisation pour savoir que la personne veut manipuler l'objet. Cela explique que peu d'applications exploitent les gants numériques et que par conséquent, leur développement commercial soit lent.

Les gants numériques permettent de mesurer les mouvements relatifs des doigts par rapport à la main. La difficulté principale est de mesurer les rotations des phalanges des doigts avec des dispositifs souples, légers et fiables. Plusieurs principes sont exploitables : déformation de fibres optiques ou variation de résistance pour les principaux gants. Les problèmes techniques sont la répétabilité, la précision et la fiabilité des dispositifs car les gants sont des solides déformables qui s'ajustent plus ou moins bien aux dimensions des mains de chaque utilisateur. Pour déterminer complètement les mouvements absolus de la main et des doigts, il faut bien sûr ajouter un capteur de localisation sur la main.

Un principe de gant numérique est basé sur la déformation de deux ou trois fibres optiques par doigt, chaque fibre mesurant une rotation d'une partie du doigt. Les fibres optiques sont reliées à un dispositif optoélectronique. Une des extrémités de chaque fibre optique est pourvue d'une LED tandis qu'un phototransistor se trouve à l'autre extrémité. Quand la fibre est droite, il n'y a pas diminution de la lumière transmise. Par contre, si la fibre est assez courbée, l'intensité lumineuse transmise est atténuée. La variation d'intensité de la lumière est fonction de l'angle de courbure de la fibre, ce qui permet de la mesurer. La précision des angles aux articulations n'est pas très élevée, de l'ordre de dix degrés. La calibration du gant est indispensable car les mesures dépendent de la déformation du gant qui doit s'ajuster à la morphologie de mains différentes.

La variation de résistance est aussi exploitée pour des gants numériques élaborés, employant des jauge de contrainte souples. En fonction de l'allongement du support sur lequel la résistance est fixée, sa valeur se modifie. Le gant numérique mesure de dix-huit à vingt-deux rotations. La calibration du gant est aussi indispensable. Ce type de gant est nettement plus performant et plus cher. Les mesures sont transmises à la fréquence de 100 Hz et la résolution performante est de l'ordre du degré (figure 11).

## 3.4 Capture des mouvements du corps

Cette technique de capture des mouvements du corps (*motion capture*) a surtout été développée pour l'animation de personnages de jeux vidéo. Tous les dispositifs ne fonctionnent donc pas obligatoirement en temps réel. La réalité virtuelle profite indirectement des recherches et des développements dans ce domaine. Deux techniques principales sont concourantes. La première solution consiste à employer un grand nombre de capteurs de localisation électromagnétiques que l'on fixe sur une combinaison. C'est la combinaison de données qui donne des résultats intéressants pour le suivi du mouvement du corps si elle est équipée de nombreux capteurs (16 par exemple) judicieusement placés, mais le coût est en conséquence très élevé. Le nombre de câbles liés à la personne est une gêne non négligeable dans cette solution, sauf si les mesures sont transmises par un émetteur radio que porte la personne. Les caractéristiques métrologiques sont liées à celles des capteurs de localisation.

La deuxième solution consiste à observer les déplacements de repères collés sur le corps par traitement d'images. Ces marques sont, par exemple, des sphères blanches ou des réflecteurs infrarouges sur la combinaison. Les caractéristiques avec un ensemble de plusieurs caméras et éclairages donnent une précision de l'ordre de 1 mm sur une étendue de 2 ou 3 m. Le nombre de



**Figure 11 – Gant Cyber Glove de Virtual Technologies**  
(doc. Immersion SA)

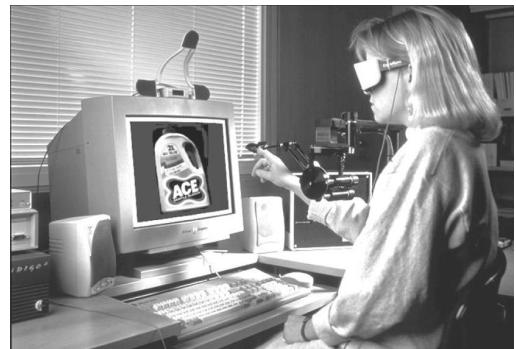
caméras, qui peut dépasser la dizaine, dépend de la zone de mesure et des risques d'occultation qui est le problème majeur de cette technique.

### 3.5 Interfaces à retour tactile

Les interfaces à retour tactile sont des dispositifs qui permettent de stimuler la peau de la personne. Elles sont encore peu répandues et peu commercialisées, car beaucoup d'applications se passent de ce type d'interface. Les informations tactiles fournissent à l'utilisateur des indications sur la rugosité de la surface de contact de l'objet virtuel ou sur le glissement relatif de l'objet. Si l'ensemble de la peau participe au sens du toucher, il est particulièrement important au niveau des mains où l'on fixe ce genre d'interface. Les principes physiques de ces interfaces sont basés sur les vibrations de bobines, sur la pression pneumatique ou sur les matrices d'aiguilles. Un constructeur emploi des bobinages électriques pour créer des vibrations d'amplitudes variables. En excitant ces bobines, des vibrations sont créées sur la peau des doigts et l'utilisateur ressent des objets au toucher. Le principal défaut de ces bobines est l'impossibilité d'appliquer spatialement des *stimuli* variables localement sur la peau, ce que peuvent fournir les interfaces tactiles à matrices d'aiguilles. Avec ce dernier type d'interface, on peut, par exemple, simuler les arêtes ou les sommets d'une forme prismatique.

### 3.6 Interfaces à retour d'effort

Une interface à retour d'effort exerce sur la personne des forces et des couples de contact. Elles ont plusieurs fonctions : appliquer des efforts variables sur le corps de la personne, résister partiellement au mouvement de cette dernière ou lui empêcher tout mou-



**Figure 12 – Interface à retour d'effort Phantom créant trois forces sur l'extrémité d'un doigt** (doc. Sim Team)

vement. Mécaniquement, les seules forces utilisables sont les forces par contact. Il y a deux types de solutions : soit le mécanisme créant des efforts s'appuie sur une autre partie du corps, soit le mécanisme s'appuie sur un socle. La première solution, *retour d'effort interne* (§ 3.6.2), permet une plus grande liberté de mouvement, mais a pour principal inconvénient la masse du mécanisme porté par la personne. La deuxième solution, *retour d'effort externe* (§ 3.6.1), présente les avantages et les inconvénients inversés.

Les caractéristiques métrologiques des interfaces à retour d'effort sont vitales pour une simulation réaliste, en particulier les caractéristiques dynamiques. L'appareil doit être précis et avoir une bande passante suffisante : les fréquences de transmission des efforts doivent être en général élevées pour une simulation correcte des efforts. Cette caractéristique de bande passante est importante et dépend de celles du système mécanique et des actionneurs électriques. Une difficulté est d'éviter les vibrations parasites et le manque de raideur du mécanisme qui peut empêcher de transmettre des efforts brefs et nets.

#### 3.6.1 Retour d'effort externe

Les premières interfaces sur le retour d'effort ont employé de grands manipulateurs conçus pour la téléopération. Cette technique permet à l'opérateur de manipuler l'extrémité du bras maître avec des retours d'effort venant du bras esclave dans le monde téléopéré. La réalité virtuelle a exploité ces systèmes à retour d'effort, mais au lieu d'efforts réels, l'ordinateur crée des efforts virtuels. La structure mécanique est similaire à celle d'un robot manipulateur, équipée d'actionneurs, de capteurs angulaires et d'une poignée. Les actionneurs sont souvent électriques. La fréquence d'échantillonnage est de l'ordre de la milliseconde. Les inconvénients majeurs de ces systèmes sont l'encombrement et le prix élevé. Un autre inconvénient est la difficulté de manipulation dans certaines positions. L'interface Phantom a une extrémité manipulable (manchon, poignet ou stylet) ayant six degrés de liberté (figure 12). Suivant le modèle, l'étendue de travail est plus ou moins grande et les retours d'effort créés sont soit seulement les forces, soit les forces et les couples.

Les manettes à retour d'effort sont moins encombrantes mais ont une zone de travail limitée. Elles ont au moins trois degrés de liberté et les retours d'effort créés sont principalement les forces. Les moteurs électriques doivent avoir des caractéristiques dynamiques élevées pour simuler correctement les retours d'effort.

### 3.6.2 Retour d'effort interne

Les interfaces à réaction externe n'agissent que sur la main. La solution pour des efforts sur tout un membre supérieur du corps est de placer un mécanisme, nommé *exosquelette*, s'appuyant et agissant tout le long du bras et jusqu'à l'épaule, si nécessaire. Ces interfaces portables permettent un retour d'effort sur le poignet, le bras et l'épaule grâce à un ensemble de barres mais ont une masse totale non négligeable. Les efforts appliqués sont créés par des moteurs à courant continu, par exemple, trois pour l'épaule, un pour le coude et un pour l'avant-bras. L'interface peut reproduire la masse et l'inertie d'un objet virtuel tenu en main. Elle permet également de contraindre les mouvements de l'opérateur. Mais les difficultés techniques de réalisation sont importantes, surtout pour les actionneurs qui doivent avoir des performances élevées tout en étant relativement légers. Une entreprise propose plusieurs modèles d'exosquelettes avec différents degrés de liberté. Le système complet, pesant 9 kg, a six moteurs à courant continu : trois à l'épaule, un au coude et deux au poignet. Les dimensions de l'exosquelette sont réglables suivant la morphologie de la personne. Un système plus complexe permet d'appliquer des efforts sur les doigts, la main, l'avant-bras, le bras et l'épaule. Une partie du mécanisme est supportée par un portique fixe, mais cela réduit l'étendue de travail.

On peut aussi créer des forces appliquées indépendamment sur plusieurs doigts : ce sont les gants à retour d'effort. Certains gants appliquent des forces sur les doigts par l'intermédiaire de mécanismes et de câbles reliés à des moteurs électriques. Un gant utilisant trois petits vérins pneumatiques fixés sur la paume de la main a aussi été développé. Chaque vérin, monté sur une rotule, exerce une force variable sur un doigt. Avec de tels gants à retour d'effort, il est possible de simuler, par exemple, la déformation d'un objet dans la main avec ses efforts de résistance. Ces dispositifs, s'ils peuvent appliquer des efforts sur la main, informent aussi sur la position des doigts. Dans ce cas, le système n'est pas qu'une interface sensorielle mais aussi une interface motrice, ce qui donne une interface mixte.

### 3.7 Interfaces à simulation de mouvement

Les interfaces à simulation de mouvement permettent de changer l'orientation du corps dans l'espace. Techniquement, le déplacement du corps d'une personne impose des moteurs très puissants et implique des prix élevés. Ces interfaces sont fabriquées principalement pour les applications professionnelles ou pour les parcs d'attractions. Nous pouvons avoir des interfaces moins puissantes avec les sièges de simulation, mono-utilisateur, qui changent seulement l'orientation de la personne assise. Dans la même catégorie, il existe des interfaces à simulation de mouvement où la personne est debout sur une plaque mobile, telle qu'une planche de surf. Les mouvements des sièges sont commandés par des moteurs électriques, par des vérins pneumatiques ou hydrauliques, plus puissants. Ces interfaces ont deux inclinaisons, tangage et roulis, et certaines peuvent se soulever de quelques centimètres.

Les simulateurs avec mouvement de cabine sont employés depuis plusieurs dizaines d'années dans le domaine des transports, en particulier en aéronautique pour la formation des pilotes en simulateur. Ces systèmes permettent des immersions de très haute qualité. Les actionneurs sont les pièces maîtresses de ce type d'interface. Ils sont pneumatiques, électriques, ou hydrauliques pour les charges de plusieurs tonnes. Ils sont disposés deux par deux sur chaque côté d'un triangle, permettant les six degrés de liberté sur des débattements de plusieurs dizaines de degrés. Ils peuvent atteindre des vitesses proches de 1 m/s.

## 4. Techniques d'utilisation des interfaces

Ce paragraphe expose les principales difficultés rencontrées lors de l'utilisation des interfaces comportementales. Comme nous l'avons indiqué, ces difficultés sont de plusieurs ordres : technique, psychophysique, ergonomique et psychologique. Au niveau technique, et plus précisément pour les caractéristiques météorologiques souhaitées des interfaces matérielles, comment déterminer ces caractéristiques par rapport à l'application ? Cela n'est possible que si le concepteur connaît parfaitement les caractéristiques psychophysiques des sens et des réponses motrices de l'homme. Par exemple, la limite de fusion des images stéréoscopiques (c'est-à-dire l'angle maximal de parallaxe horizontale entre les points homologues gauche et droit) doit être connue pour tous ceux qui utilisent la vision stéréoscopique (images en relief). Nous avons remarqué que ce n'est malheureusement pas toujours le cas et que des interfaçages visuels sont incorrectement conçus. Nous ne pouvons passer en revue ici toutes les caractéristiques psychophysiques humaines, mais nous indiquons les règles de base à respecter.

Il serait théoriquement souhaitable que les caractéristiques météorologiques des interfaces matérielles permettent d'exploiter toutes les capacités psychophysiques humaines. Mais en général, les interfaces ont des caractéristiques inférieures : en vision, l'acuité humaine d'un œil emmétrope est d'une minute d'angle. Il faudrait donc, dans un casque immersif, au moins 10 000 pixels horizontalement sur un champ de vision de 180°, ce qui est impensable actuellement. Tout concepteur doit en conséquence réfléchir pour savoir si les qualités des interfaces utilisées sont suffisantes par rapport à l'immersion et à l'interaction fonctionnelles désirées.

Aux niveaux ergonomique et psychologique, le manque de recul dans l'interfaçage avec des environnements virtuels doit contraindre le concepteur à réaliser des tests de validation. Il ne peut se contenter de concevoir théoriquement les interfaces et de les tester lui-même, car le fonctionnement des interfaçages sera souvent perçu différemment par l'usager.

Au-delà de ces considérations générales, il faut aussi ne pas hésiter à tester les interfaces pour vérifier les caractéristiques météorologiques annoncées par les constructeurs. Ils sont souvent peu loquaces dans leurs notices techniques et ils ne peuvent donner que les paramètres intrinsèques de leur matériel. Comment celui-ci fonctionnera en situation, tout en sachant que ses qualités dépendent de caractéristiques techniques, psychophysiques, ergonomiques et psychologiques ? Pour le préciser, nous indiquons pour l'exemple quelques recommandations pour le **choix d'un visiocasque**.

Il faut d'abord regarder des images très simples pour observer séparément les différentes qualités du casque. À regarder des images d'un environnement complexe, les qualités mais surtout les limites et les éventuels défauts du casque n'apparaissent pas à l'observateur car il regarde dans ce cas l'environnement et non l'interface. Les points suivants doivent être vérifiés :

- appréciation de la résolution des images (soit avec un texte de taille variable, soit avec des lignes verticales d'un pixel d'épaisseur), du contraste (variation de bandes grises), de la luminance ;

- observation de la fréquence d'affichage des images. La fluidité des mouvements est à observer en déplaçant une figure simple (carré, etc.) ;

- appréciation du champ de vision pour chaque œil : par exemple, en mettant un cadre d'un pixel sur le pourtour des deux images : toutes les lignes sont-elles visibles quels que soient les réglages de positionnement du casque et quels que soient les utilisateurs ?

- observation de la zone de vision stéréoscopique et de la limite de perception de différence de profondeur entre deux lignes verticales à profondeur différente ;
- appréciation de l'encombrement et de la masse du casque après un temps conséquent par rapport au temps d'utilisation normal ;
- tests de la fatigue visuelle due à la vision stéréoscopique pendant un temps suffisamment long ;
- perception des interstices entre pixels, en focalisant ou non le regard sur les écrans ;
- observation de l'affichage correct des images quand la tête tourne rapidement et de la stabilité des images quand la tête est immobile (cela dépend principalement du capteur de localisation et de la station graphique) ;
- tests de réglage de la distance interoculaire, de la netteté et de la fixation de l'appareil ;
- évaluation psychologique de la facilité d'usage et du confort de la personne portant un visiocasque.

En conclusion, l'évaluation des interfaçages comportementaux dans un environnement virtuel demande une analyse très poussée, car il s'agit de nouveaux types d'interfaçages peu expérimentés à grande échelle. Leur compréhension et leur usage font appel à bien des domaines multidisciplinaires des sciences exactes et des sciences humaines.

## 5. Environnements virtuels

Une expérience de réalité virtuelle immerge un ou plusieurs utilisateurs dans un monde virtuel. Nous appelons environnement virtuel la description informatique de ce monde. Il s'agit de représenter à l'aide de l'outil informatique un monde représentant plus ou moins fidèlement la réalité. La représentation faite à l'utilisateur est essentiellement visuelle, mais pas uniquement. Le paragraphe 3 a montré la variété des types d'interfaces qui existent entre l'environnement virtuel et l'utilisateur. La géométrie constitue néanmoins un élément fondamental de l'environnement. C'est pourquoi, dans le paragraphe concernant les modèles des environnements virtuels (§ 5.1), la priorité est donnée à la modélisation géométrique des environnements virtuels.

### 5.1 Modèles

Un environnement virtuel est constitué d'objets évoluant en fonction du temps dans une scène décrite en trois dimensions. La modélisation purement géométrique est décrite dans un premier temps, les aspects temporels, c'est-à-dire l'animation des mondes virtuels sont abordés ensuite (§ 5.1.6).

#### 5.1.1 Modélisation géométrique

La première question est de savoir ce que l'on cherche à modéliser : il est évident qu'un fluide incompressible est différent d'un système de pendules. L'objet le plus simple, par conséquent le plus utilisé, est le **solide rigide indéformable**. Il est régi par six paramètres qui déterminent sa position et son orientation dans l'espace. Il existe d'autres types d'objets dans un environnement virtuel :

- les **solides articulés** : ce sont des solides rigides indéformables reliés entre eux par des liaisons (liaison de type pivot par exemple). Ils sont utilisés pour décrire des objets articulés comme

les bras robotiques ou tout simplement les humanoïdes de synthèse. Leur contrôle s'effectue par leur position et leur orientation dans l'espace, ainsi que par les degrés de liberté associés aux liaisons ;

— les **solides déformables** : leur déformation suit les lois de la mécanique, comme par exemple la peau d'un être vivant ou une balle se déformant au contact du sol. Il est donc nécessaire de calculer l'évolution complète de leur forme avant de pouvoir effectuer un rendu visuel ;

— les **modèles non solides** : ils représentent essentiellement tout ce que l'on ne peut associer à la notion d'objet. Généralement, le coût de calcul associé à la simulation de ces modèles est très élevé, ce qui fait qu'ils sont extrêmement rares dans les environnements virtuels. Néanmoins, un jet de lave, par exemple peut être représenté par un modèle dit particulaire, c'est-à-dire un ensemble de sous-modèles reliés mécaniquement entre eux.

Une fois déterminé le type d'objet, il faut faire le choix de sa représentation géométrique. La première possibilité est une représentation volumique, où l'objet est déterminé par l'espace qu'il occupe. La seconde méthode consiste à représenter la frontière de l'objet, c'est-à-dire une surface généralement fermée. La représentation volumique semble plus naturelle, mais si l'on cherche à effectuer le rendu visuel d'un objet non transparent, l'information frontière est suffisante. De plus, les algorithmes de rendu utilisés en temps réel (§ 5.3.3) sont aujourd'hui basés sur des algorithmes de rendu de surface. Cependant, dans le cas de modélisations à partir du monde réel, les **modèles volumiques** peuvent s'avérer très utiles (§ 5.1.2). Ils sont ensuite convertis en **représentation surfacique** (§ 5.1.3).

#### 5.1.2 Représentation volumique

Les modèles volumiques représentent un objet par le volume qu'il occupe. Deux techniques sont employées : la première est celle de l'énumération spatiale, la seconde se base sur la **CSG** (*constructive solid geometry*).

L'**énumération spatiale** consiste à séparer des éléments de volume de l'espace à trois dimensions, en distinguant ceux dont l'objet à modéliser est présent de ceux dont il est absent. Reste ensuite à déterminer une politique pour les éléments de l'espace discret (appelés *voxels*) qui ne sont pas entièrement remplis par l'objet. Le choix du maillage utilisé est fondamental puisqu'il détermine à lui seul la précision et la concision de la représentation de l'objet. Lors d'un maillage régulier d'un espace discret cubique de largeur  $\ell$  avec  $n$ , la précision obtenue est égale à  $\ell/n$  pour une taille de l'ordre de  $n^3$ . Il existe de nombreuses améliorations des modèles à base de voxels, les plus célèbres étant les *octrees* qui sont une subdivision récursive de l'espace permettant de diminuer la complexité en espace (figure 13). Les représentations volumiques sont surtout utilisées pour les données médicales qui consistent généralement en plusieurs images 2D correspondant à des coupes différentes.

La **CSG** est au contraire une technique orientée conception de pièces, qui consiste à appliquer des opérations ensemblistes sur des volumes de base. Parmi les opérations, on trouve l'intersection, l'union et la différence. Cette technique particulièrement intuitive est utilisée pour la conception de pièces composées d'un même bloc de matière. La précision et la concision des modèles CSG dépendent essentiellement du nombre de primitives de base utilisées. La plupart des outils de modélisation 3D proposent aujourd'hui un mode de CSG, même si celle-ci ne constitue pas leur mode de représentation de base. En effet, la CSG pose le problème du calcul de l'objet final à partir des primitives de base, qui suppose une représentation sous-jacente, généralement basée sur des primitives surfaciques. La CSG n'est pas adaptée au rendu en temps réel dans le cas général, mais peut avoir des applications pour le calcul d'intersections par exemple.

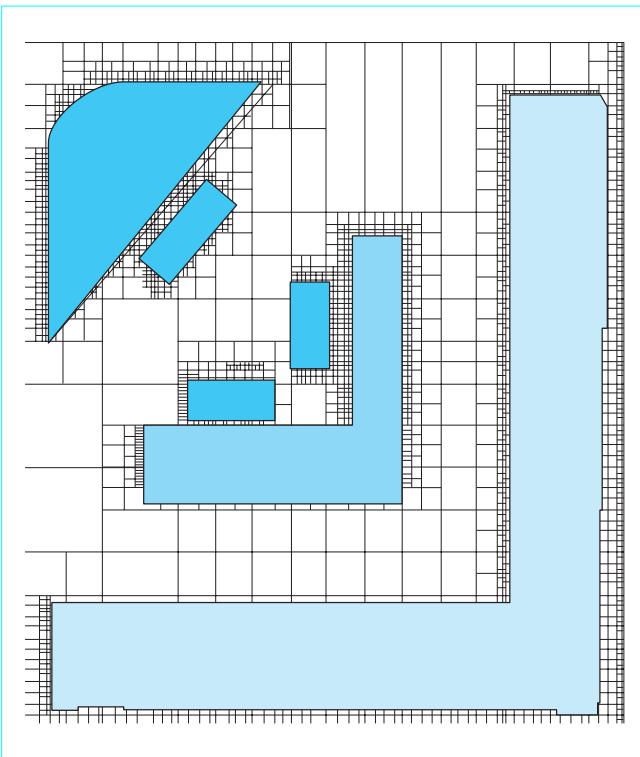


Figure 13 – Représentation de l'espace libre sous forme de quadtree, équivalent 2D de l'octree

### 5.1.3 Représentation surfacique

Comme expliqué précédemment (voir aussi § 5.3.1), les modèles surfaciques sont plus adaptés au rendu visuel en temps réel. Ces modèles sont aussi appelés **modèles Brep** (*boundary representation*). Il s'agit donc d'utiliser un type de représentation qui allie à la fois facilité de calcul et compacité de représentation. En règle générale, les représentations utilisées sont descriptives. On ne détermine pas une surface dans une application de réalité virtuelle par une équation algébrique implicite, dont la compacité ne permet pas forcément le calcul des intersections avec un rayon lumineux, essentiel pour le rendu visuel.

**Nota :** le problème de l'intersection d'une droite avec une surface implicite n'a pas de solution analytique dans le cas général. Il faut alors recourir à des méthodes numériques, à exclure dans le cas du rendu en temps réel où le nombre de surfaces peut être très important.

La première représentation, qui est aussi la plus utilisée, fait usage d'une union de surfaces planes polygonales. Pour simplifier, les polygones sont même triangulés (utilisant pour cela notamment la triangulation de Delaunay [9]). Le triangle constitue ainsi la primitive plane de surface fermée la plus simple pour le rendu visuel. Les différents sous-systèmes graphiques vendus sur le marché implantent tous le rendu de triangles ou de bandes de triangles. Très peu d'entre eux sont capables de prendre en charge d'autres types de surfaces, les conversions de surfaces en triangles étant alors à la charge de l'application, et par conséquent du processeur central, alors indisponible pour d'autres tâches.

Intuitivement, la représentation de triangles ne permet pas de représenter des formes lisses, à moins d'utiliser de nombreux triangles. De plus, la modélisation d'un objet uniquement à partir de triangles s'avère fastidieuse dès que l'objet devient complexe. C'est pourquoi la modélisation 3D s'attache aujourd'hui à utiliser d'autres types de surfaces, quitte à utiliser des algorithmes de

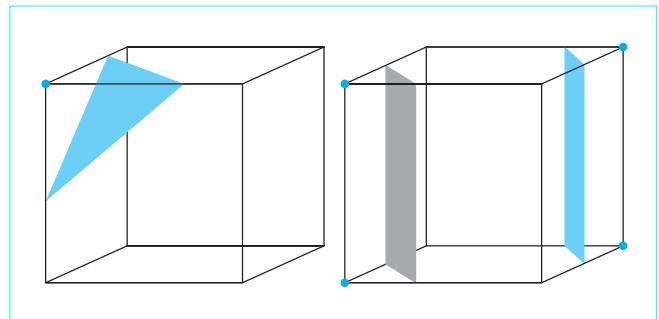


Figure 14 – Construction des triangles à partir des valeurs des sommets du cube dans l'algorithme des *Marching Cubes*

triangulation qui généreront des ensembles de triangles pour le rendu. Les carreaux de Bézier et les NURBS (*non uniform rational b-spline*) sont très utilisés dans le monde de la CAO. Ces modèles permettent de représenter des formes complexes, tout en maintenant une faible complexité en espace et des propriétés intéressantes, notamment en assurant une continuité entre deux surfaces. Toutefois, les sous-systèmes graphiques actuels ne permettent pas leur rendu en temps réel, même si certains laboratoires de recherche y travaillent.

### 5.1.4 Algorithmique géométrique

Nous mettons ici en évidence les problèmes liés à l'algorithmique géométrique et énonçons les principes des solutions. Les deux problèmes principaux pour le créateur d'un environnement virtuel sont la **conversion d'un modèle volumique en modèle surfacique** et la **tessellation**. Cette dernière est l'opération qui consiste à convertir un modèle surfacique basé sur des surfaces gauches en modèle à base de polygones, voire de triangles. Cela constitue en soi une question fondamentale de la réalité virtuelle à cause des contraintes de temps réel mentionnées au paragraphe 5.3.1.

**Nota :** pour en savoir plus, le lecteur pourra se référer à des ouvrages spécialisés comme [9].

Comme mentionné plus avant, les modèles volumiques sont généralement les modèles construits à partir de données réelles. Il existe plusieurs techniques de conversion vers des modèles surfaciques, mais la technique de référence reste celle dite des **Marching Cubes**, mise au point par Lorensen et Cline en 1987 [10]. Considérant un espace de voxels binaires (vides ou pleins), il s'agit alors de déterminer la topologie de la surface à l'intérieur de chacun des voxels en fonction des valeurs des voxels adjacents (figure 14). Les sommets des cubes constituant les voxels sont ainsi « valués », ce qui permet de construire des triangles élémentaires (de 0 à 4 par cube). L'union des ces triangles élémentaires forme la surface. L'inconvénient de cet algorithme porte sur le nombre de triangles générés, ainsi que la génération possible de triangles aberrants. Il existe d'autres algorithmes, mais la plupart d'entre eux utilisent l'algorithme des *Marching Cubes*.

Un autre problème classique de la construction de modèles surfaciques à partir de données réelles est celui de la **conversion de nuages de points**. Un certain nombre de techniques de numérisation 3D fournissent en sortie un ensemble de points 3D qui correspondent à une surface ou à un ensemble de surfaces. Il s'agit donc de déterminer la surface  $S$  construite à partir d'un ensemble de points 3D  $p \in P$  de la surface réelle  $\Sigma$ , vérifiant  $\forall p \in P, \exists x \in \Sigma, x = p$  ou  $x$  proche de  $p$  [11]. Le type d'algorithme à utiliser dépend de la densité et de la régularité du nuage de points, en tenant compte du fait qu'un nuage très dense fournit un volume de données qu'il faut traiter par des techniques de décimation et qu'un nuage peu dense donne une faible qualité. La conservation des propriétés

topologiques de la surface reconstruite n'est pas évidente pour tous les algorithmes. Seules les méthodes reconstruisant des maillages polygonaux sont évoquées ici. De façon générale, on distingue quatre types de méthodes :

— les méthodes de *subdivision spatiale* : le principe consiste à subdiviser la boîte englobante de  $P$  en un ensemble de cellules disjointes puis à sélectionner les cellules traversées par des surfaces, et enfin à calculer une surface à partir des cellules sélectionnées. Par exemple, si l'espace est subdivisé en voxels à qui on affecte une valeur de remplissage, on revient au problème de la conversion d'un modèle volumique ;

— les méthodes à *fonction de distance* : une fonction de distance est définie ici comme une fonction dont la valeur absolue est la plus courte distance entre un point de l'espace et un point de la surface. Elle est négative à l'intérieur du volume délimité par la surface et positive en dehors. Hoppe [12] approxime les fonctions de distance en calculant des plans tangents locaux qu'il oriente grâce à un algorithme de propagation. La fonction de distance ainsi construite est appliquée pour sélectionner des voxels frontière dont les sommets ont donc des signes opposés. Là encore, l'algorithme des *Marching Cubes* est utilisé ;

— les méthodes à *déformation de l'espace* : il s'agit de déformer une surface initiale jusqu'à ce qu'elle constitue une bonne approximation de la forme, c'est-à-dire des points de  $P$ . Ces méthodes sont essentiellement utilisées lorsque l'on dispose déjà d'une approximation grossière de la surface. Il existe des approches géométriques (déformation de l'espace en fournissant des points sources et des points cibles, comme dans le *morphing*). Il existe aussi des approches physiques (en utilisant des systèmes masses-ressorts où les points du maillage sont reliés aux points de  $P$  par des ressorts) ;

— les méthodes de *croissance de surfaces* : c'est l'approche duale de l'approche précédente. Il s'agit cette fois de partir des points et de leurs propriétés de surface. Boissonnat [9] propose de relier deux points proches et d'ajouter des points pour construire progressivement une surface en utilisant une approximation des plans tangents locaux.

■ Les logiciels de CAO ainsi que les logiciels d'infographie permettent de construire des modèles 3D à partir de surfaces non polygonales, fournissant ainsi des outils de travail plus naturels et des modèles d'aspect plus lisse. Malheureusement, si les surfaces non polygonales s'adaptent bien à la problématique de l'image de synthèse ou de la CAO, la contrainte de temps réel de la réalité virtuelle ne permet que de visualiser de petits modèles. Dès lors, il faut convertir les surfaces non polygonales en surfaces polygonales, voire en un ensemble de triangles. Cette activité est appelée **tessellation**. Le problème de la tessellation se décompose en deux sous-problèmes : la tessellation d'une surface unique qui est relativement bien maîtrisée et la tessellation d'un ensemble de surfaces qui forment un même objet (généralement, on cherche à conserver certaines propriétés, comme la continuité). Par exemple, lors de la tessellation de deux surfaces adjacentes, la bordure peut être décomposée selon deux lignes brisées différentes, ce qui a pour conséquence de générer des intersections et des trous entre les surfaces (figure 15). Le remède consiste généralement à déplacer les points de contrôle de la triangulation. Cela pose de façon plus générale la question de l'évaluation d'une triangulation, c'est-à-dire du choix d'une tolérance  $\varepsilon$ , qui pour un modèle  $M$  fournit une triangulaire minimale  $T$  telle que  $\|T - M\| \leq \varepsilon$ . D'une part, l'algorithme optimal n'existe pas, d'autre part, la quantification visuelle de la tolérance  $\varepsilon$  est difficile. De façon générale, les outils de tessellation permettent de spécifier des contraintes sur les triangulations (par exemple, identité entre les frontières des surfaces initiale et finale, identité volumique...). Il est possible aussi que des triangles quasi dégénérés (triangles dont une arête est très courte par rapport aux deux autres) soient construits. Dans ce cas, le calcul de la normale effectué par un produit mixte mal conditionné est perturbé, il survient alors des problèmes lors du rendu visuel qui utilise ces informations sur la normale.

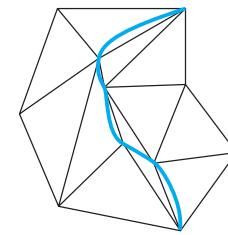


Figure 15 – Problème apparaissant lors de la tessellation de deux surfaces adjacentes

### 5.1.5 Optimisation des modèles

La disponibilité d'un modèle surfacique polygonal n'est pas une garantie suffisante pour la visualisation en temps réel. L'étape suivante consiste à diminuer le nombre de triangles présents dans le modèle. Les techniques les plus courantes sont succinctement présentées ici.

#### ■ Texturation

Dans le langage courant, la texture d'un objet représente son état de surface. En informatique graphique, c'est une image en deux dimensions plaquée sur une surface 3D, qui sera ensuite projetée sur le système d'affichage. L'utilisation de textures permet de diminuer le nombre de polygones d'une scène, par exemple pour représenter du texte écrit sur une surface. Une simple surface peut aisément remplacer les centaines de triangles utilisés pour restituer la géométrie des lettres. Elle peut aussi servir à représenter des détails en trois dimensions mais dont la taille est minime par rapport au reste de la surface. Lorsque l'on représente la Terre vue de l'espace, on utilise généralement une simple sphère triangulée avec une texture projetée plutôt que de détailler les différents éléments du relief terrestre. Le processus de texturation consiste à trouver l'image de texture à plaquer sur la surface, puis à déterminer (idéalement) l'isomorphisme entre les coordonnées d'un point de l'image et une surface quelconque dans l'espace 3D. Cet isomorphisme n'existe bien entendu pas pour tous les types de surfaces, ce qui oblige à imaginer différents algorithmes. Une surface non dépliable, comme une sphère, ne peut pas être texturée simplement par une double interpolation.

#### ■ Niveaux de détail

La technique des niveaux de détail (LOD : *levels of detail*) consiste à diminuer le nombre de polygones affichés d'un objet en fonction de la façon dont l'utilisateur perçoit cet objet : un objet lointain ou petit nécessite moins de détails qu'un objet proche ou gros. Cela est vrai pour deux raisons principales. Le centre d'intérêt de l'image est généralement au centre de l'écran et de taille respectable. De plus, l'image est constituée d'une suite de pixels discrets, les détails dont la projection est de taille inférieure à un pixel ne sont pas conséquent par représentables. Reste alors à créer des niveaux de détail différents, c'est-à-dire des modèles 3D polygonaux dont le nombre de polygones est décroissant, à déterminer les critères de transition d'un modèle à l'autre et enfin à effectuer ces transitions lors du rendu. La création des niveaux de détail se fait hors ligne, le plus automatiquement possible grâce à des logiciels de *décimation*. La commande de transition est bien entendu effectuée en ligne. Elle se révèle extrêmement simple dans les bibliothèques logicielles les plus courantes : seule la distance entre l'objet et l'observateur est prise en compte. Quant à la transition elle-même, elle peut consister en une simple modification du modèle 3D, ou bien en interpolations 3D qui donnent moins d'artefacts visuels, au détriment du temps de calcul.

### 5.1.6 Modèles pour l'animation

Les modèles géométriques ne permettent pas à eux seuls de recréer des environnements virtuels réalistes. Ce monde virtuel doit pouvoir évoluer, soit en fonction des actions de l'utilisateur, soit par une animation prévue à l'avance par le concepteur de l'environnement virtuel, soit encore de façon autonome et en réagissant aux actions de l'utilisateur. Dans le cadre de la réalité virtuelle, l'intérêt porte essentiellement sur les mouvements de corps solides rigides et articulés et peu encore sur les modèles de matière déformables pour des questions de temps de calcul. Dès lors, l'animation d'un monde virtuel se décompose en trois couches d'abstraction [13].

#### ■ Animation descriptive

La couche la plus basse est constituée par les modèles dits descriptifs du mouvement ; il s'agit de reproduire les effets indépendamment des causes. Intuitivement, cela correspond aux principes qui régissent le dessin animé. L'animateur fournit les positions clés des objets à des instants différents et une méthode d'interpolation, la machine se chargeant alors de calculer les positions intermédiaires. Les techniques employées vont de l'animation dite *keyframing*, où l'animateur fournit des positions dans un certain nombre de repères, à des versions plus évoluées, comme la cinématique inverse, bien connue des roboticiens, où l'animateur fournit des positions terminales dans un repère cartésien et la machine recalcule des coordonnées articulaires de la chaîne cinématique. Le *morphing*, qui est une technique d'interpolation entre deux images 2D peut s'apparenter aussi à l'animation descriptive.

#### ■ Animation génératrice

Les modèles descriptifs ne permettent de décrire des mouvements physiquement réalistes qu'en fonction du talent de l'animateur. Les modèles dits générateurs [14] s'attachent donc à reproduire des mouvements réalistes en y introduisant les lois de la mécanique. Les notions mises en œuvre sont celles de la simulation informatique [15]. Les avantages portent sur le réalisme des mouvements, la réduction du nombre de degrés de liberté du système et un paramétrage rendu plus facile par l'utilisation de grandeurs ayant une réalité physique.

#### ■ Animation comportementale

La description du mouvement uniquement à l'aide de la physique s'avère trop compliquée à mettre en œuvre pour des organismes vivants. Un niveau d'abstraction supplémentaire est indispensable, il s'agit de l'animation comportementale [16]. Les modèles comportementaux actuels sont organisés autour d'une boucle dite de perception-décision-action et font référence à la théorie de la perception écologique [17], selon laquelle un objet est perçu par un être vivant par ses *affordances* (néologisme anglais intraduisible qui désigne ce qu'il est possible de faire avec cet objet) plutôt qu'en tant qu'objet. En ce qui concerne la simulation interactive du comportement des êtres vivants, la tendance actuelle est à l'utilisation d'automates parallèles [18] [19] [20] qui permet une description réactive et modulaire, tout en rendant possible l'interaction avec l'utilisateur, ce qui semble impossible avec les approches traditionnelles de l'intelligence artificielle comme les moteurs d'inférence.

#### ■ Acquisition de mouvement

Cette dernière technique d'animation des mondes virtuels est à classer à part des trois précédentes. Elle est de plus en plus utilisée dans le domaine du jeu vidéo. L'acquisition de mouvement (*Mocap* : *motion capture*) consiste à acquérir des mouvements humains à l'aide de marqueurs positionnés sur un être vivant (généralement un humain) et filmés depuis un ensemble de caméras. Les positions 3D des marqueurs sont calculées à partir des images des caméras, permettant ensuite d'appliquer des mouvements à un squelette articulé. Cette technique peut s'inscrire dans

le cadre de l'animation descriptive puisqu'elle décrit explicitement les mouvements, génératrice puisque ces mouvements obéissent forcément aux lois de la physique et même comportementale puisque ces mouvements sont des actions complètes d'un comportement (s'accroupir, envoyer un ballon...). La complexité en temps est très faible ; par contre, la mémoire requise est proportionnelle au pas de temps, au nombre d'articulations, ainsi qu'à la durée du mouvement acquis. Cela suppose de disposer de mouvements cycliques, passant par une position neutre, ce qui est rarement le cas pour l'être humain [21]. Par exemple, une acquisition de marche humaine et une acquisition de course nécessitent une transition entre ces deux états. De plus, aucun paramétrage explicite ne ressort des données de Mocap, impliquant en théorie une acquisition différente par être à animer.

## 5.2 Création des environnements virtuels

Le concepteur d'environnements virtuels ne va bien évidemment pas programmer à chaque fois la description géométrique et l'animation de son monde virtuel. Il existe un certain nombre d'outils dédiés à la création de mondes virtuels. Ces outils sont reliés à des exécutifs en temps réel par l'intermédiaire des fichiers qu'ils génèrent et que les noyaux de réalité virtuelle sont capables de relire. Il existe une norme pour ces fichiers, appelée VRML (Virtual Reality Modeling Language). Cette norme n'est pas la seule et elle existe en différentes versions et acceptations. Néanmoins, elle constitue une référence incontournable.

### 5.2.1 VRML

VRML est un standard ISO/CEI 14772 ; il porte le nom de VRML 97 depuis décembre 1997. Sa prochaine évolution devrait être le standard x3d actuellement en cours de définition par le consortium Web3D. Historiquement, le langage VRML a été initié par la bibliothèque Open Inventor de Silicon Graphics. Il s'agissait d'un langage de définition hiérarchique de scènes 3D sous leur forme géométrique. Par rapport à Open Inventor, VRML fournit en plus des primitives d'animation (descriptive), des liens avec le Web et avec le langage Java. De plus, le système des nœuds prototypes permet aux concepteurs de créer leurs propres nœuds pour planter de nouvelles fonctions. Reste que peu de logiciels sont capables d'exporter directement des animations, les applications de réalité virtuelle se contentent généralement d'utiliser les nœuds liés à la géométrie. Tous les modeleurs géométriques sont néanmoins aujourd'hui capables d'exporter plus ou moins directement des scènes au format VRML.

### 5.2.2 Logiciels

En ce qui concerne la création géométrique des mondes virtuels, il existe deux principaux types de logiciels.

■ **Les logiciels de CAO** sont dotés de fonctions d'exportation de scènes au format VRML car les principales applications de la réalité virtuelle sont aujourd'hui des applications industrielles. Il faut cependant noter que les modèles des logiciels de CAO sont construits à partir de surfaces non-polygonales qu'il faut convertir (§ 5.1.4). En outre, les modèles exportés ne sont pas prêts pour la visualisation, il faut encore les habiller : la scène ainsi exportée ne comporte ni couleurs de matériaux, ni éclairage par exemple.

■ **Les logiciels d'infographie** existent sous différentes formes : certains sont destinés à calculer le rendu d'images fixes, d'autres permettent de calculer des animations comme une suite d'images fixes, d'autres enfin sont dédiés à l'animation interactive. Parmi ces derniers, certains sont capables d'exporter leurs animations et de les relier à des moteurs de visualisation en temps réel existants,

tandis que les autres se contentent d'effectuer ces animations dans un contexte interne, en permettant d'appeler certaines fonctions extérieures.

En 2001, apparaissent sur le marché des logiciels spécifiquement dédiés à l'animation de mondes virtuels comme SKOL de Cryo Networks, Motivate de Motion Factory. Ces logiciels intègrent tous des notions d'animation comportementale, ce qui les place à un niveau d'abstraction plus élevé que les logiciels d'infographie classiques, tout en rendant leur prise en main plus ardue.

### 5.2.3 Acquisition de données à partir du monde réel

Dans le cadre des applications industrielles de la réalité virtuelle, en dehors des applications liées directement à la CAO, la conception d'un monde virtuel peut nécessiter la construction d'un modèle 3D d'une partie du monde réel. Cela est notamment le cas pour les applications médicales de la réalité virtuelle où un modèle 3D d'un organe du corps humain doit être reconstruit. Un ensemble de coupes scanner ou d'images IRM permettent de reconstruire un modèle volumique qui est converti ensuite en un modèle superficiel. Les techniques dites de numérisation 3D sont celles qui permettent d'obtenir des nuages de points denses qui ont convertis à l'aide des techniques présentées au paragraphe 5.1.4.

## 5.3 Interaction avec les environnements virtuels

Une fois les modèles géométriques créés, ainsi que les données qui permettent de faire évoluer les environnements virtuels, il faut confier l'ensemble à un exécutif chargé de la restitution de certaines informations à l'utilisateur. Il faut aussi prendre en compte les actions de l'utilisateur et leur influence sur l'environnement.

### 5.3.1 Contraintes

Dans une expérience de réalité virtuelle, les types d'applications cités (§ 1.3) l'ont prouvé, les retours sont encore essentiellement visuels. Le rendu visuel est donc une des composantes fondamentales des applications de réalité virtuelle. Pour ne pas paraître saccadée, une animation doit avoir une fréquence de l'ordre de 25 Hz (24 Hz pour le cinéma, 25 Hz et 30 Hz pour la télévision). Cet ordre de grandeur doit être pondéré par l'importance du retour visuel dans l'application. Quoi qu'il en soit, cette contrainte est très importante puisque le temps dont dispose une machine pour effectuer le rendu d'une image à partir d'une scène 3D est extrêmement court (40 ms). Ce temps peut encore diminuer si l'on utilise plusieurs écrans ou si l'on affiche des images stéréoscopiques.

Plus contraignant encore, les autres interfaces peuvent fonctionner à des fréquences encore plus élevées. Un capteur de localisation magnétique atteint sans problème une fréquence supérieure à 100 Hz, les interfaces à retour d'effort peuvent nécessiter des fréquences de l'ordre de 1 000 Hz. Le non-respect de ces fréquences est une des causes connues du mal des simulateurs.

Le degré de réalisme atteint par une expérience de réalité virtuelle dépend fortement des fréquences de fonctionnement des diverses interfaces, le temps de réponse global se mesurant par le temps écoulé entre une action de l'utilisateur et son effet sur ses sens par l'intermédiaire des interfaces qui retournent une information (l'écran par exemple). Les plus gros consommateurs de temps de calcul sont essentiellement la détection des interactions — et notamment la détection des collisions (§ 5.3.2) —, la mise à jour de l'environnement (par exemple, le calcul des déformations d'un modèle physique) et bien sûr le rendu visuel.

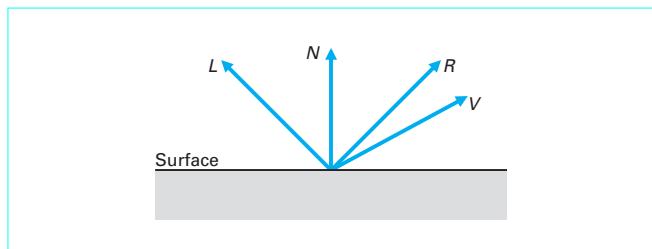


Figure 16 – Directions de réflexion de la lumière incidente

### 5.3.2 Détection de collisions

La détection de collisions est l'un des problèmes fondamentaux de l'interaction en réalité virtuelle. Elle est nécessaire pour la navigation ainsi que pour le retour d'effort, et est utilisée aussi bien pour empêcher les interpénétrations que pour lancer les algorithmes de déformation. En théorie, si l'on se place dans le cas où les modèles géométriques sont exprimés sous forme de polygones, des triangles en général, il suffit de tester l'intersection entre les triangles de la scène deux à deux. Malgré l'hypothèse effectuée, il subsiste deux questions : en premier lieu, la complexité du calcul est fonction du carré du nombre de polygones de la scène. Il s'agit d'une complexité au pire, puisque celle-ci peut être améliorée en structurant la scène ou en effectuant des approximations. Toutefois, cette complexité laisse augurer que l'algorithme fonctionne à une fréquence réduite. Malheureusement, pour les systèmes à retour d'effort dont la fréquence de fonctionnement est élevée, l'approximation de l'instant de collision est sujette aux problèmes classiques du sous-échantillonnage (non-détection de collisions, détection unique même s'il y a plusieurs collisions). De plus, afin de connaître la réaction de l'environnement virtuel à la collision (répulsion, déformation), il faut être capable de calculer l'instant précis de la collision.

*Nota* : pour en savoir plus, le lecteur est invité à se reporter à [22].

### 5.3.3 Rendu visuel en temps réel

Une image de synthèse 3D dépend de la position et de la géométrie des objets de la scène, mais aussi des matériaux qui les composent, de l'éclairage ainsi que de la position et des paramètres d'une caméra virtuelle. La caméra virtuelle est modélisée selon le principe d'une caméra standard à projection centrale (perspective). Le modèle d'éclairage utilisé est un modèle simplifié dû à Phong [23] qui distingue trois types d'intensités lumineuses (figure 16) :

- l'intensité ambiante est un terme constant remplaçant les interréflexions ;
- l'intensité diffuse est la lumière réfléchie de façon uniforme et isotrope lorsqu'un rayon lumineux frappe une surface ;
- la réflexion spéculaire  $R$  correspond aux pics de luminosité atteints lorsque la direction d'observation est la symétrique de la direction d'éclairage par rapport à la normale à la surface.

Phong a proposé un modèle défini par l'équation suivante :

$$I_s = I_a + K_d \sum_{sources} \langle N, L_j \rangle I_{obj} I_j + \sum_{sources} K_s(j) \langle R_j, V \rangle^n I_j$$

où  $L$  est la direction de la source lumineuse,  $V$  la direction du point de vue,  $K_d$  est le coefficient de réflexion diffuse de la surface,  $K_s$  son coefficient de réflexion spéculaire et  $n$  un coefficient qui dépend de la surface (variant de 1 pour les surfaces mates à 200 pour les surfaces les plus brillantes).

Ce modèle fournit donc une intensité lumineuse constante pour chacun des triangles. La complexité est proportionnelle à la fois au nombre de triangles et au nombre de sources lumineuses. En 1971,

Gouraud [24] a proposé d'éliminer les discontinuités d'intensité aux bords des triangles en proposant une double interpolation linéaire : l'intensité lumineuse aux sommets des triangles est calculée comme la moyenne des intensités calculées pour les triangles auxquels les sommets appartiennent. À partir de ces trois valeurs, on interpole des valeurs sur l'ensemble des points du triangle. Phong propose ensuite une interpolation non plus des intensités, mais des normales à la surface, fournissant ainsi un meilleur rendu, mais au prix d'un coût supérieur.

Reste alors à éliminer les triangles qui n'apparaissent pas sur l'image : le cône de vision est défini par le centre optique de la caméra virtuelle et les quatre sommets du rectangle correspondant à son plan image. Certains triangles sont aussi masqués par les triangles situés devant eux. Cette étape est appelée **élimination des parties cachées**. Historiquement, on utilisait l'algorithme « du peintre » qui consistait à calculer la profondeur de chacun des triangles et à les afficher par profondeur décroissante. L'algorithme du *z-buffer* consiste quant à lui à stocker dans une mémoire tampon la couleur et la profondeur d'un pixel de l'écran. Si un nouveau pixel calculé est à une profondeur inférieure, la mémoire tampon est mise à jour.

**Nota :** pour en savoir plus sur les algorithmes d'élimination des parties cachées, le lecteur est invité à se reporter à [25].

### 5.3.4 Restitution sonore

La restitution de son 3D est un des enjeux actuels de la réalité virtuelle. Le coût de calcul est encore très élevé par rapport à la puissance des machines ; les cartes sons appelées 3D ne sont à l'heure actuelle que des cartes produisant des effets 3D, mais sans permettre à l'utilisateur une localisation sonore précise. La restitution sonore stéréophonique standard ne permet en effet à l'auditeur que de localiser un son dont l'origine est entre ses deux oreilles. L'effet sonore est produit par la déformation de l'air qui fait vibrer les tympans, puis converti en impulsions nerveuses envoyées au cerveau. Chaque oreille perçoit un son à un instant et une intensité différents, déformé en fonction des perturbations provoquées par la forme de son pavillon. Pour connaître le son créé par une vibration, il est nécessaire de connaître la réponse impulsionnelle de la source dans l'oreille. Cette fonction, la *head related transfer function* (HRTF), et plus précisément sa transformée de Fourier, est spécifique à chaque être humain. La fonction HRTF dépend de l'azimut, de l'élévation et de la fréquence du signal source, ainsi que de la distance à la source. C'est pourquoi la synthèse de son 3D est rendue particulièrement complexe. Il existe des bibliothèques de fonctions HRTF plus ou moins adaptées à certains types de population, mais les meilleurs résultats sont obtenus en mesurant effectivement la fonction HRTF d'un utilisateur. Certains systèmes comme Ambisonics [26] n'utilisent pas les fonctions HRTF et commencent à être commercialisés en 2001.

### 5.3.5 Outils informatiques pour le rendu visuel

La plupart des logiciels liés à la réalité virtuelle offrent d'abord un moteur de rendu visuel performant, utilisant au mieux les possibilités d'une ou de plusieurs cartes graphiques 3D. Ces cartes fournissent au développeur un ensemble de fonctions permettant

l'affichage d'une scène 3D avec un éclairage simple et un rendu rapide. Dans le monde professionnel, Open GL s'est imposé comme un standard de fait. Les cartes graphiques 3D du marché, ainsi que les machines haute performance exécutent directement des commandes Open GL, ce qui décharge le ou les processeurs de la tâche de rendu. Open GL est une bibliothèque fournissant un niveau d'abstraction très bas, permettant de l'implanter directement sur un circuit intégré, mais sa programmation est cependant malaisée. C'est pourquoi de nombreuses bibliothèques utilisant un sous-système Open GL ont été développées. Certains sont spécialisées pour le temps réel comme IRIS Performer, commercialisée par SGI, ou WordToolkit de Sense8. Une bibliothèque graphique doit comporter des fonctions de scalabilité et de modularité, c'est-à-dire que l'ajout d'un processeur ou d'une carte graphique, l'utilisation de plusieurs écrans ou le changement de type d'interface de visualisation ne doit pas nécessiter un nouveau développement de l'application.

### 5.3.6 Autres outils informatiques

Le rendu visuel n'est pas la seule composante d'une application de réalité virtuelle. D'autres bibliothèques doivent prendre en compte le retour sonore, le retour d'effort, la détection de collision, et plus généralement tout ce qui a trait à l'évolution du monde virtuel et aux interactions avec l'utilisateur. Chaque bibliothèque est spécialisée dans une fonction précise, ce qui rend l'intégration des différentes interfaces difficile, sauf à construire ses applications au-dessus d'un noyau générique ouvert. Parmi les fonctions des bibliothèques, on peut citer la synthèse du retour d'effort, la synchronisation entre des mondes virtuels distribués, la génération de son spatialisé.

## 6. Conclusion

Après ce tour d'horizon des potentialités de la réalité virtuelle et des problématiques scientifiques qu'elle génère, nous constatons que bien des noeuds technologiques restent à surmonter. De nombreux centres de recherche et entreprises du domaine travaillent actuellement sur les **interfaces à retour d'effort**, aussi bien sur la structure mécanique que sur la partie logicielle. C'est un défi scientifique et technique difficile à relever car les algorithmes doivent fonctionner en temps réel (la fréquence optimum étant *a priori* de 1 000 Hz) et parce que aucune solution mécanique ne peut répondre parfaitement à toutes les caractéristiques d'une interface à retour d'effort idéale.

D'autres centres de recherche mènent des réflexions sur l'**immersion** et l'**interaction efficaces** pour chaque type d'application. Ces travaux sont **pluridisciplinaires**, induits par les exigences de la réalité virtuelle, dont la finalité est de mettre un sujet humain dans un environnement virtuel. Ce ne sera que par la confrontation des exigences des différents domaines scientifiques (informatique, physique, neurophysiologie, ergonomie et psychologie) que tout projet de réalité virtuelle pourra être efficacement conçu et profitable à ses utilisateurs.