

Utilisation d'une réalité semi-virtuelle dans une maquette pédagogique du système soleil-terre-lune

Daniel Viñar Ulriksen

*I wonder if I shall fall right through the earth! How
funny it'll seem to come out among people that walk
with their heads downwards! The Antipathies, I
think.
Alice's adventures in wonderland,
Lewis Carroll.*

Résumé : Sur une maquette reproduisant le mouvement du système soleil-terre-lune, telle qu'on peut en voir dans plusieurs musées de sciences, on ajoute un dispositif robotique et de transmission d'images permettant au visiteur de découvrir la maquette telle que la verrait un homme miniature situé sur la reproduction de la terre. Ainsi, grâce à un double regard, à partir du référentiel absolu de Copernic et du référentiel relatif terrestre, on peut comprendre le mouvement du système: saisons, durée du jour et de la nuit, cycles de la lune, éclipses, etc.

La viabilité du projet est abordée dans différents contextes et des systèmes utilisant d'autres technologies - comme un CD-ROM multimédia -, mais exploitant le même principe, sont proposés.

Introduction

**** ans après Copernic et alors que l'église apostolique et romaine a réhabilité Galilée, le commun des mortels sait en général que la terre est ronde et qu'elle tourne autour du soleil.

Il est cependant moins aisé de comprendre comment l'inclinaison de l'axe de rotation de la terre par rapport à celui de son orbite autour du soleil provoque le phénomène des saisons et influe sur la durée du jour et de la nuit. La relation entre le mouvement de la lune et son éclairage visible est aussi un phénomène plus complexe. Beaucoup de subtilités échappent même à ceux qui possèdent même les notions de physique nécessaires pour comprendre les principes mis en jeu. Je crois¹, par exemple, que la pleine lune se lève toujours exactement en même temps que le soleil se couche, et cela au point cardinal diamétralement opposé sur l'horizon. Pourquoi y a-t-il une face cachée de la lune?

Certes une simple bougie et une orange peuvent suffire à expliquer un certain nombre de choses. Un astrolabe, maquette du système solaire mue par un automate n'ajoute pas grand chose si ce n'est la précision du mouvement, ce qui est avant tout une satisfaction pour les scientifiques.

Dans tous les cas on est obligé d'en arriver à dire : "Imagine ce que voit une puce qui est posée là, sur l'orange. Eh bien, dans la réalité, cette puce sur l'orange c'est toi sur la terre." Il y a là deux efforts de conceptualisation assez complexes : d'abord d'imaginer, à partir du mouvement des astres que l'on observe dans le référentiel de Copernic², leur mouvement relatif dans un référentiel terrestre³; ensuite d'identifier ce mouvement à l'échelle de la réalité.

On propose ci-après un dispositif qui permet virtuellement de se transformer en "cette puce sur l'orange", c'est-à-dire de voir *réellement*, dans toutes les directions et à l'échelle, ce que verrait un être miniature posé sur un point de la sphère représentant la terre. L'alternance entre cette vision miniaturisée (point de vue terrestre) et la vision globale de la maquette (point de vue interstellaire), nous permet d'aborder globalement le phénomène.

On pourra choisir dans l'espace et dans le temps l'observation désirée. En quelques minutes on appréciera les nuits blanches de Saint Petersburg, l'éclipse de soleil du ** *** 19** qui a permis de vérifier les prédictions de la théorie générale de la relativité d'Einstein, le fonctionnement du calendrier Aztèque, etc.

Description générale du dispositif

Un automate permet de reproduire le mouvement du système soleil-terre-lune.

¹ J'écris *je crois*, car c'est un fait que j'ai constaté expérimentalement, en regardant des couchers de soleil à Punta Ballena (Uruguay), mais je ne m'avancerai pas à l'affirmer avec certitude.

² Référentiel du système solaire, lié au centre du soleil et où des étoiles très éloignées paraissent immobiles. On y voit le soleil (la bougie) fixe et les planètes (l'orange) tourner autour et sur elles mêmes.

³ Référentiel lié à un point de la surface de la terre, c'est-à-dire celui dans lequel nous vivons. (ou la peau de l'orange telle que la voit la puce)

Sur la terre est posé un petit un robot que nous appellerons l'*observateur virtuel*. Celui-ci est composé d'un bras articulé tenant l'objectif d'une caméra⁴ que nous appellerons l'*oeil virtuel*⁵. Les mouvements du bras permettent d'orienter l'oeil virtuel dans n'importe quelle direction. Sur commande, l'observateur peut se déplacer sur l'ensemble de la surface de la terre, de manière à obtenir tous les points de vue possibles.

L'oeil est relié à un dispositif d'observation virtuelle, c'est à dire un système d'écrans à l'intérieur d'un casque permettant de reproduire l'image transmise par l'oeil virtuel. L'observateur - réel, cette fois-ci - est assis dans un fauteuil le casque sur la tête. Par une commande, il peut faire pivoter son siège sur 360 degrés. Un ensemble de capteurs enregistre les mouvements du casque, qui sont reproduits en temps réel, à l'échelle, par l'observateur virtuel.

Les caractéristiques optiques et mécaniques du dispositif doivent être étudiées de manière à ce que l'observateur réel voie dans son casque exactement ce que verrait un être miniature de la taille de l'observateur virtuel.

Un deuxième observateur virtuel, pouvant se déplacer sur le plafond de la salle, voir dans l'espace, donne une vision globale de la maquette. Le dispositif optique associé reproduit la réalité à une autre échelle : on est cette fois-ci virtuellement transformé en un géant flottant dans l'espace interstellaire. Sans enlever le casque, on pourra projeter alternativement les deux observations virtuelles, correspondant aux référentiels absolu et relatif, et ainsi appréhender l'ensemble des phénomènes.

Une réalité semi-virtuelle

Il existe des dispositifs analogues qui permettent d'évoluer dans des mondes virtuels, c'est-à-dire dans lesquels les images projetées à l'intérieur du casque proviennent d'un ordinateur et n'ont aucune existence en dehors du silicium de sa mémoire. On a numérisé un espace à trois dimensions⁶ et des capteurs permettent de générer un mouvement virtuel dans ce tas de giga-octets.

Dans le système proposé ici, les images observées n'ont rien de virtuel. Au contraire, elles sont parfaitement réelles. Ce que l'on regarde, ce n'est rien d'autre que la maquette elle-même. Seul le point d'observation est virtuel. Ce que l'on veut, ce n'est pas voir autre chose, mais voir la même chose sous un autre angle, tout en bougeant avec les astres et à une autre échelle.

D'ailleurs on ne cherchera pas à occulter les mécanismes et l'ensemble de l'environnement, bien au contraire. On pourra voir ses amis dans la salle, géants interstellaires analysant patiemment les évolutions de notre petit coin d'univers, ou bien poussières interstellaires derrière la terre. On pourra se voir soi-même, monstre casqué, chirurgien observant son patient de l'intérieur, comme dans un grand magasin, lorsqu'on se surprend soi-même sur un écran de télévision relié au dernier modèle de camescope en démonstration.

Ce choix délibéré a une importance sur le plan pédagogique, car il fournit à l'observateur des points de repère et maintient l'observateur dans une situation expérimentale active et critique, au lieu de l'entraîner dans une simple illusion. Il s'agit de comprendre la réalité et non pas de la reproduire à l'identique.

Il faut remarquer un autre aspect de perception virtuelle : sur son siège, l'observateur réel ne subit pas les accélérations propres au mouvement de l'observateur virtuel. C'est bien là ce que l'on expérimente sur terre, car même face au pendule de Foucault, on ne se sent pas véritablement secoué comme dans un mange. Si l'on place le nord vers le haut⁷, lorsque l'on observe les choses à partir du Cap Horn on verra les gens présents dans la salle la tête en bas, et cela sans nullement sentir le sang qui monte à la tête : c'est comme lorsque l'on retourne le décor et la caméra pour filmer des gens qui marchent au plafond.

Les seuls mouvements qu'il conviendrait de répercuter sur le fauteuil d'observation sont les rotations commandées par la personne qui y est assise, voir les accélérations de déplacement linéaire⁸. En effet, sur le robot, ces mouvements ne sont pas issus de la rotation de la terre sur elle même et autour du soleil, mais par la volonté de l'observateur.

Par ailleurs, l'utilisation de ce dispositif permet de contourner le principal problème des systèmes de réalité virtuelle *classiques* en termes de puissance de calcul nécessaire⁹. En effet, celui-ci concerne essentiellement la

⁴ Il s'agirait de deux objectifs si l'on veut assurer une vision stéréoscopique.

⁵ Afin de ne pas alourdir le texte, nous dirons simplement l'*observateur* et l'*oeil*, lorsqu'il n'y a pas d'ambiguïté. Pour distinguer l'observateur réel, c'est-à-dire la personne qui vit l'expérience de réalité semi-virtuelle, nous dirons parfois le *visiteur (du musée)*.

⁶ Voir reconstitution des thermes de Cluny, projet développé à Sophia Antipolis. Remarquons que ce monde virtuel peut provenir d'images purement de synthèse ou d'enregistrements d'images réelles.

⁷ Pure convention, mais bien encrée. Mme Peters, dans son atlas cherchant à donner une vision moins ethnocentrique de notre plante, n'y échappent pas. Je ne connais que deux exceptions : le monument de *La mitad del mundo*, (Quito, Ecuador) et une gravure de Joaquín Torres García.

⁸ Ceci peut être assuré par un dispositif de pistons comme ceux qui équipent les simulateurs de vol.

⁹ Il est vrai que cet argument est chaque jour moins valable.

constitution d'espaces virtuels qui forment de gigantesques bases de données qu'il faut ensuite pouvoir traiter. Cet aspect est ici totalement éclipsé par des problèmes de robotique et d'optique essentiellement.

Ébauche de la maquette et problèmes d'échelle

Afin de pouvoir observer le jour et la nuit, la maquette sera placée dans une salle où règne la pénombre. Le soleil sera la plus forte source de lumière présente.

La salle sera ronde et son plafond pourra être hémisphérique. La maquette est placée soit en hauteur, soit en contrebas, les visiteurs circulant sur un balcon en forme d'anneau tout autour.

Les dimensions relatives du système solaire ne permettent pas de faire une maquette à l'échelle. Il est même impossible de construire le soleil et la terre à la même échelle. On pourra même être amené à représenter un soleil plus petit que la terre.

Il est dans tous les cas indispensable d'expliquer ces données techniques sur des panneaux d'exposition qui seront présentés dans la même salle ou dans une autre, ainsi que dans tout document explicatif du dispositif. Une autre manière de présentation consiste en des séquences virtuelles sur des schémas tridimensionnels animés de changements d'échelle (taille des plantes et du soleil, rayon des orbites).

L'observateur virtuel ne pourra pas non plus être à l'échelle d'un homme sur la terre. Une attention particulière sera accordée au choix de l'échelle relative de l'observateur sur la terre, car c'est d'elle que dépendra en grande partie la sensation perçue dans le dispositif de réalité semi-virtuelle. Ce rapport devra être tel que l'on commence à percevoir l'aspect plan que revêt la surface de la terre observée de très près. Cependant, il peut être intéressant que l'on note encore que l'horizon est la limite de cette approximation locale.

L'utilisation de transmissions par fibre optique permettra au besoin de délocaliser la caméra de son objectif. En réalité, rien n'impose qu'il y ait une quelconque modulation ou échantillonnage du signal lumineux. Seule une étude technique plus poussée permettra de définir la meilleure solution technique. A ce stade, il est difficile d'aller au delà de la description générale donnée plus haut : le dispositif d'observation virtuelle doit reproduire la maquette telle que la voit un être miniature à la surface de la terre.

Dans tous les cas, il est souhaitable d'envisager une vision stéréoscopique afin de conserver une vision en relief.

La conception des maquettes des astres sera confiée à des artistes plastiques. Sur la terre on dessinera la carte des mers et des continents. On pourra y ajouter des reliefs ou quelques points de repère, tels des monuments connus, à une échelle proche de celle de l'observateur virtuel. Ainsi, une tour Eiffel deux fois plus grande que l'observateur virtuel sera perçue comme ayant deux fois la taille d'un homme.

Rappelons que l'on peut déplacer l'observateur virtuel sur la surface de la terre. Le dispositif mécanique assurant cette fonction¹⁰ ne devra pas être un obstacle à l'observation locale. Il y aura certainement un compromis à faire entre cette contrainte et un déplacement éventuel en temps réel de l'observateur sur la surface de la terre.

On pourra placer une grande partie du dispositif électronique et mécanique à l'intérieur de la sphère formant la terre. Sa surface pourra être semi-transparente : lorsqu'elle est éclairée de l'intérieur on verra les mécanismes, et une fois éteinte, on ne verra plus que sa surface. On pourra ainsi distinguer les mouvements de mise en place des automates et l'expérience proprement dite.

Commandes et déroulement de l'expérience

On définit ci dessous les commandes dans l'hypothèse où elles sont exécutées par le visiteur du musée lui même. L'opportunité de confier les commandes à un opérateur spécialisé est abordée plus loin.

L'interface de commande est intégrée au dispositif de réalité semi-virtuelle, par exemple grâce à des gants, des boutons ou des manettes, visualisés par des incrustations dans l'écran du casque. On pourrait étudier une interface vocale.

Au début le visiteur a une vue globale de la maquette soit directement, par semi-transparence du casque, soit à travers le deuxième observateur virtuel placé au plafond. Dans un menu, il peut choisir des commandes d'initiation, comme une présentation du dispositif, le mode d'emploi ou la mise en place et le lancement d'une expérience.

Il procède ensuite au choix de sa position initiale dans le temps et l'espace. Pour cela il peut soit donner ses paramètres - date et lieu -, soit chercher dans une base un événement remarquable répertorié : aujourd'hui, ici ou ailleurs; l'éclipse totale de soleil survenue à telle date visible de tel pays, les nuits ou les jours perpétuels polaires, etc. Dans la base il pourra y avoir un commentaire de l'événement, documents multimédia à l'appui.

Avec l'éclairage spécifique des manœuvres de la maquette, on voit l'oeil et les astres se mettre en place. L'éclairage d'observation, avec ses zones de nuit et de jour, la face éclairée de la lune, etc. ne se met en place que lorsque démarre l'écoulement du temps.

¹⁰ pour assurer ce déplacement on peut imaginer un robot muni de roues qui est maintenu sur la surface de la terre grâce à une attraction magnétique. Il reste à assurer l'alimentation en énergie du robot.

Parmi les commandes que le visiteur aura à sa disposition au cours de l'expérience, on peut imaginer les suivantes :

- * les commandes *naturelles* transmises par le mouvement de son casque, qui permettent à l'observateur virtuel de reproduire tous les gestes du visiteur,
- * la rotation de son siège (répercutée sur l'observateur virtuel),
- * arrêter l'expérience ou la recommencer avec une autre position initiale,
- * accélérer ou ralentir l'écoulement du temps,
- * affichage de la date et l'heure,
- * consulter certaines données comme l'énergie lumineuse reçue par unité de surface au sol, la température ambiante, le régime de pluie, etc.¹¹.
- * alterner entre les deux observateurs virtuels : point de vue d'un être miniature terrestre et d'un géant volant au dessus du système solaire,
- * visualiser, grâce à des incrustations d'image les deux observateurs en même temps. Pour cela, on pourrait même utiliser des incrustations virtuelles éventuellement en 3 dimensions : une télévision sur laquelle on capte en direct les images animées, schémas (pas trop!), musique, textes (titres tout au plus!), etc. On peut en donner une liste non exhaustive, en répétant les sujets déjà évoqués :
- * se déplacer sur la terre sans arrêter l'écoulement du temps. Cette fonctionnalité peut être difficile à implémenter si l'on veut pouvoir diminuer dans le champ de vue le dispositif de déplacement de l'oeil.

Utilisations

S'agissant d'un automate totalement programmable on pourra aussi bâtir des démonstrations pédagogiques sur un très grand nombre de sujets connexes. Elles pourront être illustrées par des documents multimédia : récit et explications, photos ou images animées, schémas (pas trop!), musique, textes (titres tout au plus!), etc. On peut en donner une liste non exhaustive, en répétant les sujets déjà évoqués :

- * nuits et jours permanents polaires,
- * saisons dans les deux hémisphères, durée du jour et de la nuit,
- * points de lever et de coucher du soleil,
- * éclipses totales et partielles de lune et de soleil,
- * la face cachée de la lune,
- * décalage entre le calendrier Julien et Grégorien,
- * présentation de la maquette,
- * le Petit Prince et l'allumeur de réverbères.

D'autres sujets pourraient aussi être imaginés grâce à des fonctionnalités supplémentaires : cycle des marées, pendule de Foucault, etc.

Viabilité du dispositif et solutions multi-utilisateur

Sans aborder dans les détails les problèmes d'échelle qui méritent une étude approfondie, on peut chercher estimer les dimensions probables du dispositif. En évaluant les ordres de grandeur, on peut aisément se rendre compte qu'il est judicieux d'envisager un observateur virtuel aussi petit que possible et une maquette aussi grande que possible.

Par exemple, avec les données suivantes¹² :

observateur virtuel	10 cm
rayon de l'orbite de la terre	15 m
diamètre de la terre	4 m
rayon d'orbite de la lune	5 m

¹¹ Remarquons que de telles données peuvent impliquer une base de données spatio-temporelle qui devient vite gigantesque : données climatologiques, historiques, etc.

¹² Il s'agit ici d'une hypothèse haute des dimensions.

je crois deviner que l'on peut obtenir une perception de la maquette tout à fait saisissante. Ces dimensions aboutissent à une salle d'environ 45 m de diamètre. Il s'agit donc d'un projet qui atteint les dimensions d'un planétarium plutôt qu'une petite maquette dans une salle d'exposition.

Compte tenu de ces premières approximations, la viabilité du projet paraît compromise tant qu'il s'agit d'un dispositif mono-utilisateur tel qu'il est décrit ci-dessus. Il est donc nécessaire d'étudier la possibilité de mettre en place plusieurs postes d'observation.

La première solution consiste à multiplier le nombre d'observateurs virtuels. Cependant, la présence de plusieurs robots indépendants risque vite de poser des problèmes (à moins d'établir un véritable code de la route, ce qui n'est pas non plus à écarter).

Plutôt que de laisser la mobilité totale à chaque participant, on peut constituer un *vaisseau* d'observateurs virtuels ayant chacun la liberté de regarder dans n'importe quelle direction, mais se déplaçant ensemble sur la surface de la terre. Un opérateur spécialisé commande le vaisseau et l'ensemble de la maquette¹³.

Il faut remarquer que dans ce cas de figure, les observateurs virtuels se voient mutuellement. Par un dispositif acoustique les participants pourront même communiquer entre eux. En fait, les participants réels se voient virtuellement transformés en petits robots. Le commandant pourra même se présenter en tant que robot, et seulement après dévoiler la supercherie, en montrant qu'il n'est autre qu'un être humain qui commande la marionnette dans la peau de laquelle il s'est glissé. Il conviendra donc de réfléchir à l'habillage que l'on donne aux observateurs virtuels puisque c'est sous cet aspect que l'on découvrira ses voisins ou que l'on se verrait soi-même dans une glace.

Cette solution de vaisseau posera aussi des problèmes d'échelle. Il faudra par exemple s'assurer, lorsque l'on veut observer une éclipse de soleil, que l'ombre de la lune soit assez grande pour couvrir l'ensemble du vaisseau.

On pourrait aussi envisager un autre type d'observateur virtuel, permettant plusieurs observations simultanées. Par exemple, à travers un objectif de type *fish eye*, on peut obtenir une observation dans n'importe quelle direction moyennant un traitement adéquat de l'image et non un déplacement de l'objectif. Cependant, outre l'impossibilité d'assurer une vision stéréoscopique et le problème entièrement ouvert du traitement de l'image, cette deuxième solution change légèrement l'expérience : on verra le monde semi-virtuel comme observé en maintenant la tête fixe, ou regardant à travers une bulle dans toutes les directions. On ne sera plus un être qui évolue dans l'espace : se baisser ce n'est plus regarder à ras de terre.

Variantes et dérivées du projet

Versions totalement virtuelle

Il est probable qu'une version totalement virtuelle du système soit moins onéreuse¹⁴.

Chaque élément de la maquette (soleil, terre, lune) serait alors, soit réalisé physiquement puis numérisé en trois dimensions, soit conçu directement sur ordinateur. Les mouvements et les éclairages sont alors produits virtuellement par l'ordinateur, et non plus réellement sur un automate mécanique.

La notion même de réalité semi-virtuelle serait perdue, ainsi que le charme d'un mécanisme d'horlogerie plutôt que quelques *chips* électroniques¹⁵. Mais les fonctionnalités du système demeurent et peuvent même se voir accrues.

L'observateur virtuel¹⁶ pourra être capable d'évoluer sur trois dimensions et ainsi se rapprocher ou s'éloigner de chacun des astres.

On pourra aussi introduire plusieurs images des astres, comme des vues réelles depuis une sonde spatiale, un satellite ou un avion ; plusieurs types de cartes (véritable reliefs, interactives avec des données hypermédia, , des

¹³ Cette alternative introduit indirectement une composante pédagogique tout à fait intéressante : une intervention humaine comme guide. On peut à ce sujet comparer deux planétariums en France : celui de La Villette et celui du Palais de la Découverte. Dans le premier, le "spectacle" est entièrement enregistré. Dans le deuxième, un "thésard" est aux commandes du système, il commente ce que l'on voit au micro, nous montre un astre avec une flèche lumineuse, revient en arrière,... Personnellement, ce dernier m'a bien plus captivé, et même fasciné.

¹⁴ en particulier pour en réaliser plusieurs exemplaires.

¹⁵ Dans *** illustre les raisons d'avoir peur de la réalité virtuelle. Citons le sexe virtuel (sans sida peut-être, mais certainement sans âme), la violence des jeux. On tente ici une étape intermédiaire : voir de manière virtuelle la réalité *vraie*, si ce mot peut avoir un sens. J'ai l'idée que la version mécanique et concrète d'un tel engin, pourrait nous aider, au moins un tout petit peu, à explorer ce nouveau monde.

¹⁶ L'observateur virtuel ne serait plus le robot, mais un accès virtuel "classique" aux données stockées dans un ordinateur.

schémas du système solaire. Sur terre l'observateur verrait un paysage habituel et en s'élevant il passerait en "fondu-enchaîné" à des vues d'avion, de satellite, puis à une carte.

Produits pour la diffusion au delà du musée

A partir du système décrit, on pourra développer toute sorte de produits dérivées comme des films ou des applications multimédias - CD-ROM, par exemple -. Dans les deux cas des techniques spéciales pourront ou non être utilisées : 3 dimensions, 360 degrés, réalité virtuelle, etc.

Ceci permettra une diffusion beaucoup plus vaste de l'outil pédagogique réalisée.

Versions moins ambitieuses

Une autre possibilité consiste à aborder le développement dans "l'autre sens", et réaliser une maquette avec un système d'exploration moins sophistiqué qui permette de réaliser les films et applications multimédia mentionnés ci-dessus, sans pour autant assurer l'interactivité envisagée plus haut.

On peut l'envisager aussi bien sur un système semi-virtuel que totalement virtuel.

Dans le premier cas, le robot ne serait plus guidé par un système d'accès virtuel en temps réel, mais pourrait être téléguidé¹⁷, en fonction de la prise de vue à enregistrer. La visualisation s'effectuerait sur un écran (éventuellement en trois dimensions) et pourrait être numérisée et stockée pour son intégration dans un système multimédia.

Autres domaines d'application

Le concept d'observation semi-virtuelle est en fait beaucoup plus vaste. Sa définition en est simple : Une paire de caméras (pour assurer la stéréoscopie) est reliée à un dispositif d'observation virtuelle (casque ou lunettes), les caméras sont fixées sur un dispositif robotique qui permet de les orienter dans n'importe quelle direction. Ce dispositif reproduit les mouvements de l'utilisateur à travers un système de capteurs.

Bien qu'il se rapproche plus d'un dispositif classique d'observation vidéo constitué par une télévision reliée à une caméra, que de systèmes futuristes faisant appel à une importante puissance de stockage et de calcul, ce dispositif permet véritablement de se transformer, comme par magie, en un être d'une autre taille et d'une autre apparence.

On peut imaginer une infinité d'applications de ce concept, en particulier pédagogiques, culturelles ou ludiques :

- Moyennant une alternance entre une vision globale et locale, comme dans l'application décrite ci-dessus, un dispositif pédagogique permettrait de développer les compétences de lecture d'un plan,
- En évoluant dans une maquette, on peut effectuer une visite virtuelle de n'importe quel site ou monument,
- N'importe quel jeu de rôles se déroulant dans une scène réalisable sous forme d'une maquette peut être implémenté,
- On peut même envisager d'intégrer d'autres fonctionnalités que la vision: à travers deux robots équipés en guerriers, deux personnes s'affrontent dans un combat semi-virtuel sans se faire mal. Le public pourra observer le combat *réel* des deux robots.

¹⁷ Il existe des réalisations de ce type de système. Certains effets spéciaux cinématographiques en sont un exemple (*2001, l'odyssée de l'espace, la guerre des étoiles,...*). En architecture aussi, on utilise des mini-caméras pour filmer des maquettes de manière à visualiser le bâtiment à sa taille réelle.