La simulation du pilotage

par Claude Mechoulam

■ Les simulateurs de missions aériennes permettent aujourd'hui à un pilote de s'entraîner à toutes les opérations d'un vol complexe, à l'intérieur d'une zone d'exercice de l'ordre du quart de la France, avec un environnement très réaliste.

■ L'élément clé des simulateurs est un système de calcul d'images numériques qui synthétise en temps réel la scène occupant le champ de vision du pilote, à partir des informations stockées dans une base de données.

■ Les technologies électroniques et informatiques développées pour ces calculs d'images numériques sont maintenant appliquées à l'animation cinématographique et à la conception assistée par ordinateur.

Claude Mechoulam, ingénieur civil des mines, dirige le développement de la génération synthétique d'images à SOGITEC.

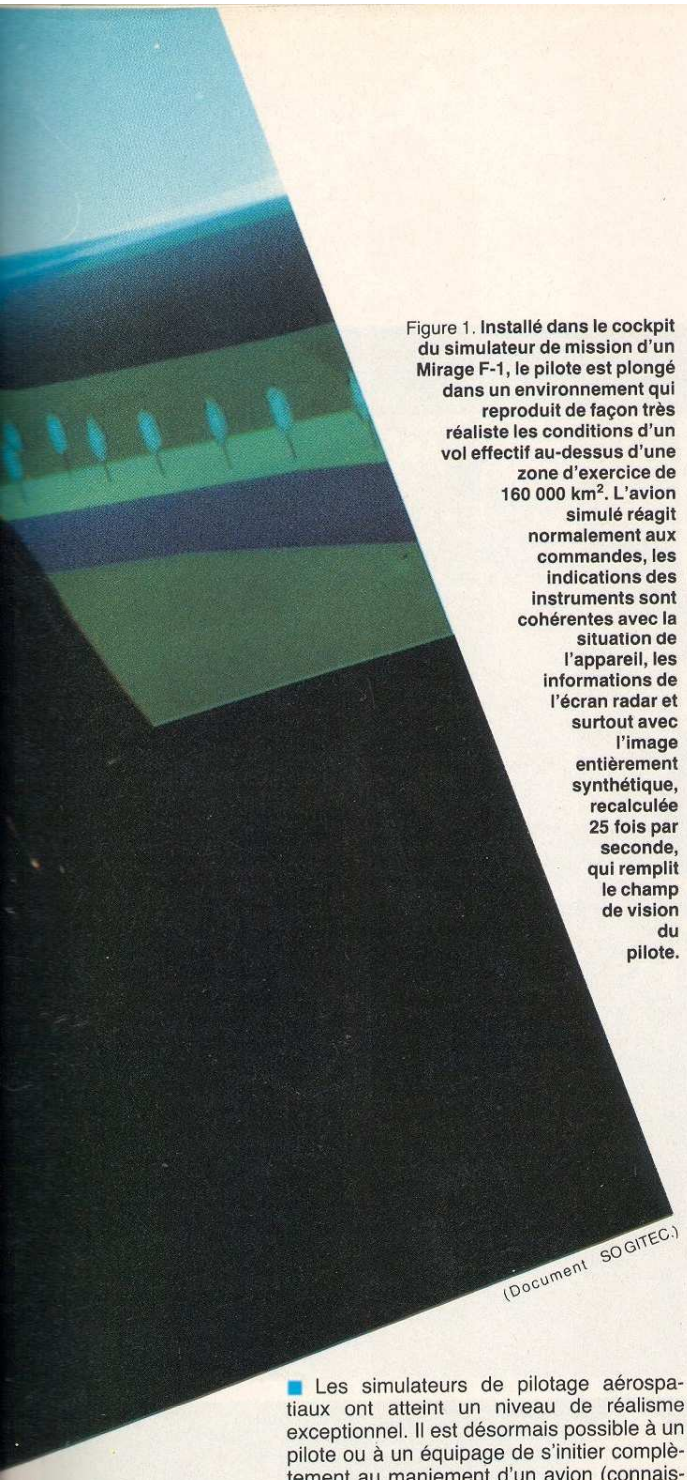


Figure 1. **Installé dans le cockpit du simulateur de mission d'un Mirage F-1, le pilote est plongé dans un environnement qui reproduit de façon très réaliste les conditions d'un vol effectif au-dessus d'une zone d'exercice de 160 000 km². L'avion simulé réagit normalement aux commandes, les indications des instruments sont cohérentes avec la situation de l'appareil, les informations de l'écran radar et surtout avec l'image entièrement synthétique, recalculée 25 fois par seconde, qui remplit le champ de vision du pilote.**

(Document SOGITEC.)

■ Les simulateurs de pilotage aérospatiaux ont atteint un niveau de réalisme exceptionnel. Il est désormais possible à un pilote ou à un équipage de s'initier complètement au maniement d'un avion (connaissance de la cabine, procédures normales et de secours), de s'entraîner au pilotage à vue ou bien sans visibilité, à la radionavigation, à la navigation au radar, à la conduite de missions air-sol (pour les avions militaires), au bombardement ou au tir de missiles, voire au combat aérien, sans jamais quitter le sol... Les simulateurs avancés recréent en effet des conditions très proches de celles d'un vol réel : reproduction du poste de pilotage, indications réalistes des instruments, réponses des commandes, bruits et surtout projection en temps réel, dans le champ de vision du pilote, d'une image synthétique de haute qualité reproduisant le paysage effectivement visible depuis l'avion, de jour ou de nuit (fig. 1).

Économie, sécurité, disponibilité.

L'utilisation de simulateurs de missions aériennes présente trois grands avantages par rapport à un entraînement sur les véritables matériels : l'économie, la sécurité, la disponibilité. Dans le cas de l'aviation civile, par exemple, une heure de vol sur simulateur est beaucoup moins coûteuse qu'une heure de vol réel. En outre, le pilote peut s'entraîner à faire face à des situations difficiles, qu'il n'est pas question de reproduire en réalité : l'instructeur peut introduire à son gré des conditions extérieures très défavorables (coup de vent latéral à un instant critique de l'atterrissage par exemple) ou des pannes (comme l'arrêt d'un moteur pendant le décollage). Grâce à un simulateur d'entraînement, il est par ailleurs possible de procéder à une « évaluation objective des performances » du pilote : toutes les réactions de celui-ci sont enregistrées et peuvent donc être analysées finement. La fidélité des formations sur simulateur est aujourd'hui telle qu'il est possible de qualifier pour le vol commercial un pilote de ligne expérimenté, sur un appareil qu'il n'a jamais piloté réellement... L'intérêt des simulateurs de mission est peut-être encore plus évident dans le domaine des vols spatiaux habités : les pilotes de la navette devaient, par exemple, avoir répété de multiples fois l'ensemble des opérations normales et de secours avant le premier vol de cet engin.

En outre, les techniques développées pour la simulation du pilotage trouvent des applications qui dépassent largement leur objet initial : la réalisation de simulateurs d'activités non aérospatiales (simulateurs de « radar marine », de passerelle de navire, de centrale thermique ou nucléaire, de raffinerie, de char, etc.), la production d'images synthétiques pour l'ingénierie (conception assistée par ordinateur) ou la création artistique.

En fait, une large diversification existe déjà au niveau même de la simulation du pilotage. Celle-ci peut en effet poursuivre deux objectifs très différents. L'entraînement des équipages, que nous avons déjà évoqué, mais aussi l'aide à l'étude des avions. En effet, des simulateurs d'étude sont de plus en plus utilisés pendant la phase de conception des aéronefs, avant même que ceux-ci aient volé : ils permettent de tester la qualité du pilotage (stabilité, manœuvrabilité dans les conditions limites, etc.), le comportement du système en cas d'incidents, l'ergonomie du poste de pilotage. Ces simulateurs, qui évoluent au cours des études, font appel à une modélisation très poussée des phénomènes aérodynamiques, obtenue à partir d'essais en soufflerie et de calculs des écoulements des filets d'air.

Les simulateurs d'entraînement utilisent également une modélisation très fine du comportement aérodynamique de l'appareil, mais cette modélisation peut reposer sur des mesures d'essais réels. Ils doivent en outre reproduire aussi fidèlement que possible le fonctionnement normal et la plupart des incidents d'un système donné en recréant un environnement du pilote aussi réaliste que possible, avec les perceptions visuelles, tactiles, auditives, voire les sensations d'accélération, qui constituent l'ambiance d'un vol réel. Ceci, du moins, pour les systèmes d'entraînement au sol les plus complets, les « simulateurs de mission », car des simulateurs plus simples, donc moins coûteux, sont utilisés pour certaines activités autres que le pilotage proprement dit : les « entraîneurs aux procédures de vol », qui servent simplement à familiariser les pilotes avec l'avion et à leur inculquer les automatismes nécessaires à leur sécurité; les « simulateurs de maintenance », qui permettent de former les mécaniciens au dépannage des équipements de bord (fig. 2); les « simulateurs de vol », qui ne sont destinés qu'à l'apprentissage du pilotage, en particulier du décollage et de l'atterrissage.

Recréer l'impression de mouvement.

Un simulateur d'entraînement comporte toujours un poste d'instructeur et un poste de pilote (fig. 3). Le pupitre de l'instructeur regroupe tous les moyens de contrôle de la simulation : initialisation du simulateur, introduction des pannes, etc. Le poste pilote est installé dans une cabine identique intérieurement à celle de l'avion réel avec de véritables instruments ou des appareils simulés (lorsque ceux-ci sont plus économiques que le matériel de série). Le système assure une modélisation précise de la mécanique du vol et de tous les éléments relatifs à l'utilisation de l'électronique de bord (radar, systèmes de navigation et d'armement, etc.). La simulation des bruits est réalisée en général avec des générateurs analogiques de sons commandés par le régime du moteur, les systèmes d'alarme, les commandes d'armement; la recherche de meilleures performances dans ce domaine a conduit cependant à l'étude de systèmes utilisant la synthèse numérique des sons (SOGITEC industrialise ainsi pour ses simulateurs le processeur numérique de synthèse sonore 4 X conçu par l'IRCAM pour des applications musicales).

L'impression de mouvement peut être recréée par un « mouvement cabine » : il s'agit de monter la cabine du simulateur sur des vérins qui lui confèrent de deux à six degrés de liberté de mouvement selon les configurations adoptées. Cette méthode permet, moyennant quelques artifices, de faire ressentir des impressions d'accélération et de déplacement. Elle est largement utilisée pour les simulateurs d'avions civils, mais une autre technique est préférable dans le cas des avions de combat qui se caractérisent par des accélérations élevées et durables : l'utilisation d'un « gravisiège », dont le baquet et le dossier sont articulés et dont les coussins sont gonflables. Le pilote s'installe sur le « gravisiège » revêtu d'une combinaison pneumatique (dite « anti-g ») : la sensation d'accélération provient des mouvements du siège et de la répartition judicieuse des différentes pressions dans les coussins et la combinaison.

Une technique ancienne : la « caméra-maquette ».

La partie la plus spectaculaire des simulateurs est cependant le système de visualisation (fig. 4). Les premiers systèmes de ce type ont été conçus pour l'entraînement à l'atterrissage. Leur principe reposait sur l'utilisation du film d'une approche réelle du terrain d'atterrissage : l'image de ce film était déplacée sur l'écran en fonction des

Les premiers systèmes de simulation du pilotage ont été conçus pour l'entraînement à l'atterrissage.

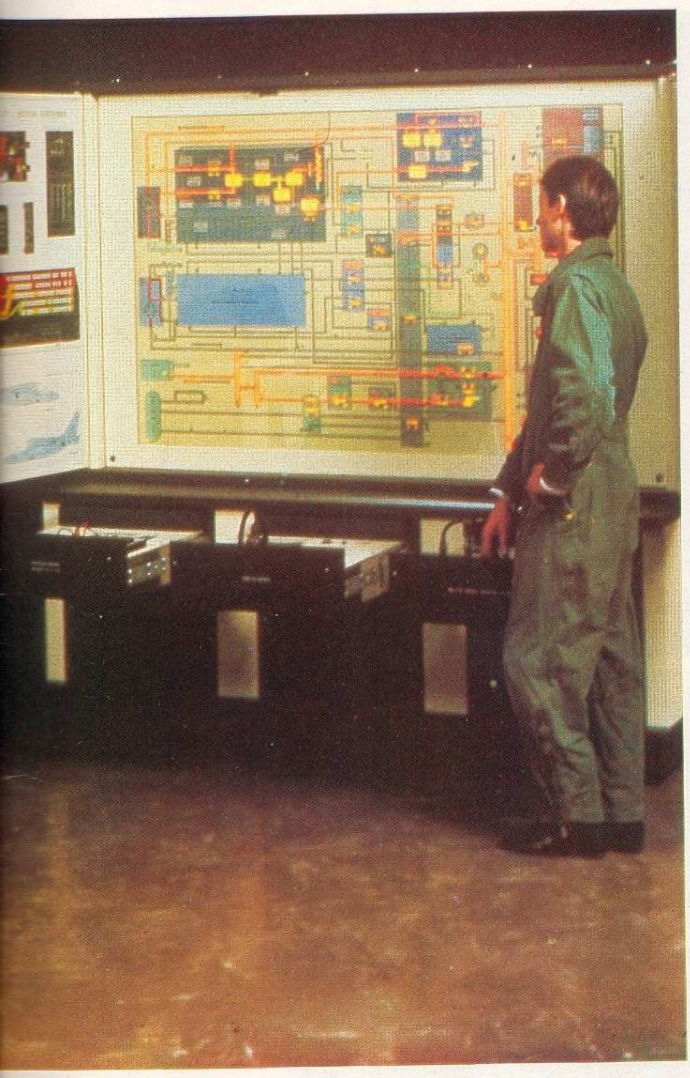
écarts entre la trajectoire simulée et la trajectoire réelle. Cette simulation était limitée à des mouvements très proches de la trajectoire de référence et était en outre peu réaliste.

Une technique beaucoup plus élaborée, appelée « caméra-maquette », a été ensuite rendue possible par l'utilisation de la télévision en circuit fermé. Le système se compose d'une maquette de paysage au-dessus de laquelle se déplace une caméra vidéo montée sur un pont roulant et munie

Figure 2. **Plusieurs types de simulateurs sont utilisés en aviation : pour l'entraînement au pilotage, avec différents degrés de complexité, mais aussi pour la formation à la maintenance. Ce type de simulateurs permet d'entraîner les mécaniciens au diagnostic des pannes et aux procédures de maintenance, sans immobilisation ni risque de détérioration d'un véritable appareil. Il comprend des panneaux reproduisant le poste de pilotage et des schémas synoptiques des différents systèmes de l'avion, ainsi que des appareillages simulés de test. Le simulateur est géré par un calculateur sous le contrôle d'un instructeur.** (Document SOGITEC.)

Figure 3. **Un simulateur de mission aérienne, comme celui du Mirage F-1 réalisé par SOGITEC (A), possède une structure modulaire, avec différents sous-ensembles dont les relations sont schématisées en B : une maquette de cabine intérieurement identique à celle de l'avion simulé; un pupitre depuis lequel l'instructeur détermine les conditions de la simulation et communique avec le pilote; un calculateur principal qui effectue en temps réel tous les calculs de modélisation (en fonction des commandes de l'instructeur et du pilote); une interface entre le calculateur principal et la cabine qui possède une capacité de traitement propre et assure en particulier la mise en forme des commandes du pilote et la répartition des données sur les instruments; un système de génération d'images synthétiques qui crée la visualisation nécessaire au pilote et éventuellement un générateur d'images radar.** (Document SOGITEC.)

A



d'une optique orientable. Cette caméra est asservie à la position simulée du véhicule. La technique « caméra-maquette » est principalement appliquée aux simulateurs d'atterrissage d'avions civils (maquette verticale d'environ 4 × 15 m au 1/1500e) ainsi qu'aux simulateurs de conduite de chars (maquette d'environ 3 × 9 m au 1/250e). L'image peut être traitée de manière optique ou électronique pour simuler les brumes et les brouillards. Le pilote observe l'image d'un écran de télévision renvoyée « à l'infini » par l'intermédiaire d'un système optique adapté au véhicule simulé.

Les systèmes à « caméra-maquette » sont très simples dans leur principe. Mais ils présentent des difficultés de réalisation importantes dans des domaines aussi variés que la mécanique de précision, l'optique, les systèmes de commande et de contrôle. Pour cette raison, seuls les simulateurs les plus importants ont pu en être équipés, les autres ne simulant que le vol aux instruments, sans visualisation. En outre, ces systèmes n'offrent qu'une profondeur de champ faible, une zone d'exercice limitée, une image de qualité moyenne et leurs coûts de fonctionnement et d'entretien sont élevés.

Le succès de la synthèse d'images.

Les systèmes de visualisation à synthèse d'images ne présentent aucun de ces inconvénients, ce qui explique qu'ils aient pratiquement éliminé du marché tous les autres systèmes. Leur principe consiste à remplacer l'opération de prise de vue d'un paysage réel ou d'une maquette par le calcul d'une image synthétique (fig. 5). Ce calcul est effectué point par point, en temps réel (25 images par seconde...) à partir d'une description numérique de l'environnement (la « maquette numérique ») et en fonction des données de position et d'attitude issues du simulateur.

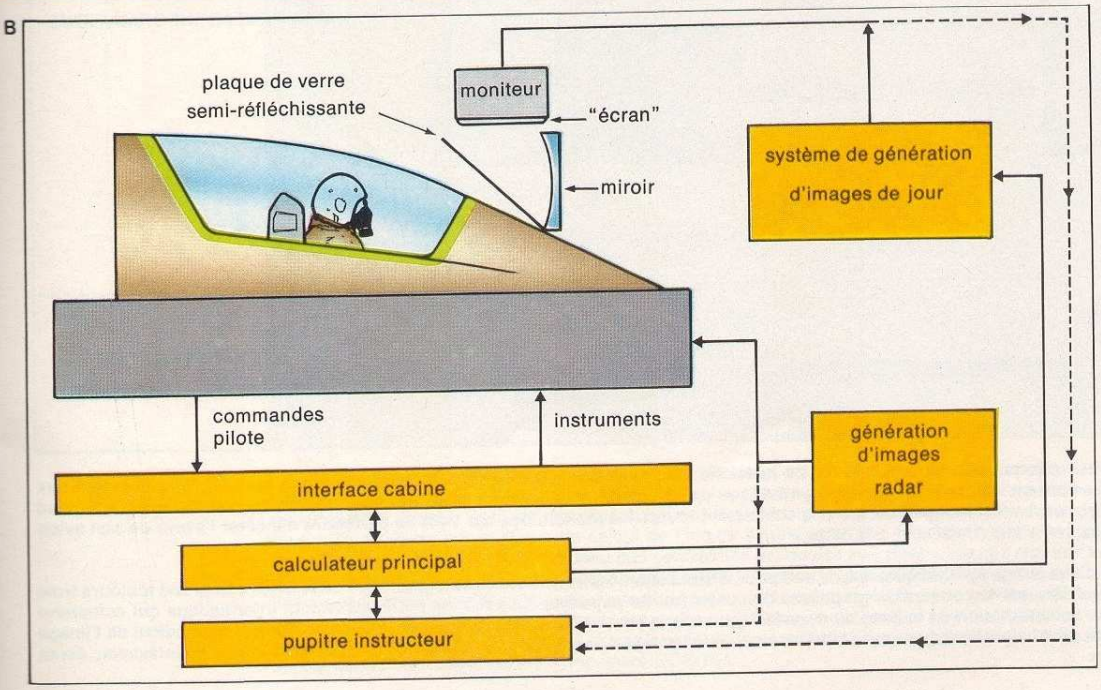
Le premier système de visualisation synthétique a été réalisé par General Electric en 1958 pour le compte de l'armée et de la marine américaines. La même firme réalisa en 1962 le premier simulateur d'entraînement au rendez-vous spatial de la NASA, mais ce n'est qu'au début des années 1970 que les simulateurs à visualisation synthétique se développèrent vraiment : General Electric livra le premier simulateur de ce type aux forces aériennes américaines (US Air Force) en 1972 et le premier système commercial suivit en 1975. Celui-ci était le précurseur du modèle « Compu-Scene », dont les différentes versions sont exploitées aussi bien pour des applications civiles que militaires.

A la suite de General Electric, tous les constructeurs de simulateurs (Link, CAE...) ont adopté la technique de la visualisation synthétique. Aujourd'hui, c'est une firme américaine spécialisée au départ dans la génération d'images, « Evans and Sutherland », filiale de Rediffusion, qui domine le marché civil avec ses produits SP1, SP2 et SP3, ainsi que son système très avancé CT-5 (ce dernier se plaçant également bien sur le marché militaire).

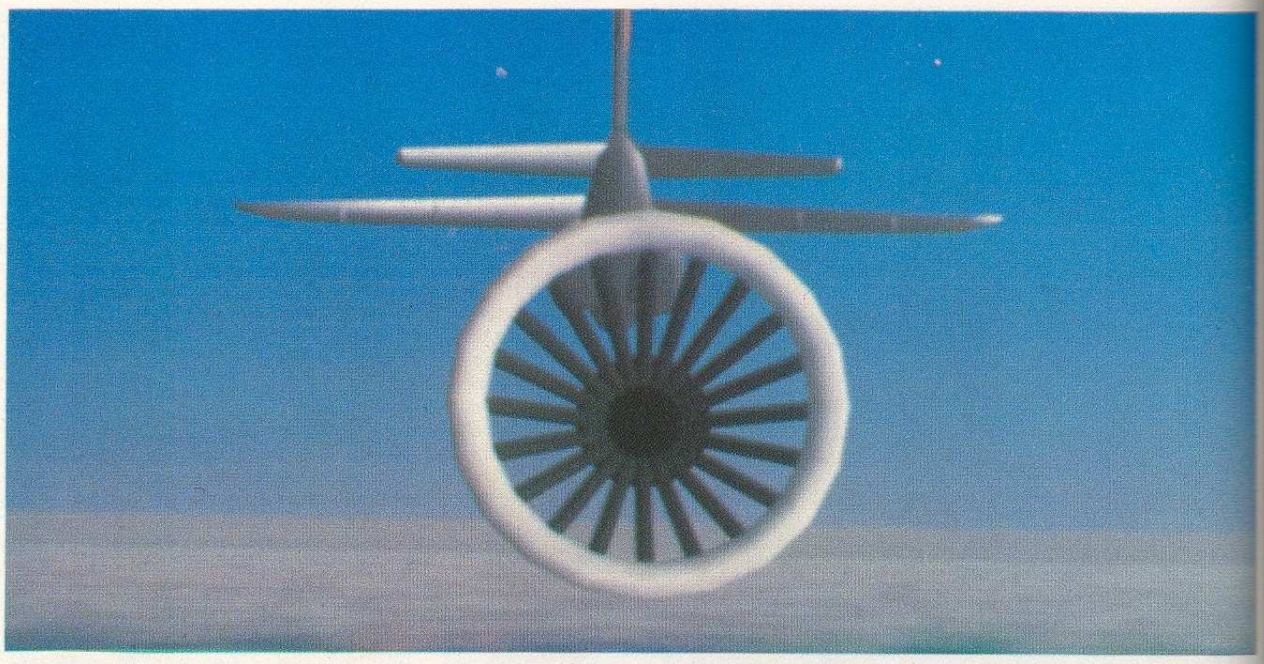
Des entreprises françaises sont présentes dans ce domaine de la simulation par images synthétiques. Les premiers développements ont été entrepris au CELAR (Centre électronique de l'armement) et ont abouti en 1979 à la réalisation, par la société Inforel, du générateur d'images d'un simulateur de combat aérien. La division « simulateurs » de Thomson-CSF (LMT, avant son intégration dans le groupe Thomson) a d'autre part engagé en 1978 l'étude du système VISA dans le but d'équiper des simulateurs d'avions civils ou des passerelles de navire et, pour l'avenir, des simulateurs de certains avions de combat. Et en 1981, SOGITEC a entrepris la réalisation du système GI 1000 destiné à être intégré dans ses simulateurs de missions aériennes. Le système GI 1000 est caractérisé par la possibilité de faire évoluer l'avion dans une zone d'exercice suffisamment vaste (400 × 400 km) et offre en outre une bonne compatibilité entre l'image de l'environnement extérieur et l'image du radar air-sol.

Les simulations de nuit et de jour : deux techniques différentes.

La génération d'images synthétiques en temps réel fait appel à deux techniques différentes selon que l'on recherche la visualisation de scènes nocturnes ou crépusculaires (« visualisation de nuit ») ou bien de scènes diurnes (« visualisation de jour » ou « tout temps »). Dans le premier cas, l'environnement à représenter est uniquement composé de feux lumineux et de quelques surfaces. L'image peut être formée sur un tube à rayons cathodiques commandé en « balayage cavalier », c'est-à-dire dans lequel le pinceau électronique peut se déplacer librement entre deux points quelconques. Ce type de tube permet un positionnement précis des points et fournit donc une image d'excellente résolution (points définis dans un tableau de 4 096 × 4 096 points). Mais les couleurs



250 000 ou 1 000 000 de points composent l'image numérique.



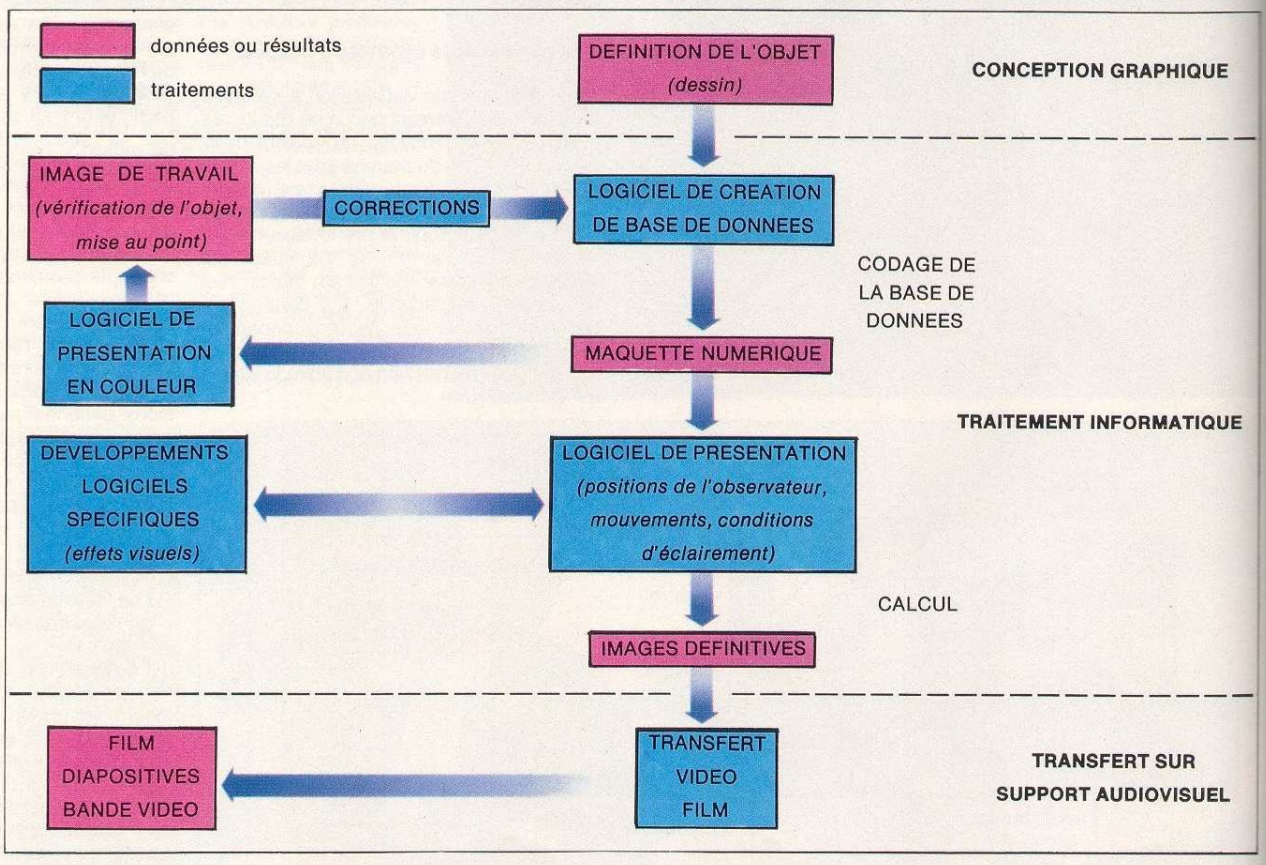


Figure 4. **Les possibilités offertes par les simulateurs de missions aériennes sont extrêmement larges. Elles vont jusqu'à l'entraînement aux procédures de ravitaillement en vol : grâce à l'image synthétique de l'avion de ravitaillement et du système de transfert de carburant qui pend derrière celui-ci, le pilote peut véritablement contrôler visuellement toutes les manœuvres qui vont lui permettre d'insérer l'avant de son avion dans le panier prévu à cet effet.** (Document SOGITEC.)

Figure 5. **L'élaboration d'une image synthétique, que ce soit pour la simulation, l'animation cinématographique ou la CAO, comprend toujours trois grandes phases. La première est la conception graphique de l'objet (ou du paysage). La seconde est le traitement informatique qui comprend lui-même deux parties : la constitution de la base de données (qui sera la source des informations nécessaires au calcul) et le calcul de l'image synthétique proprement dit. La dernière phase est enfin le transfert de l'image sur un support audiovisuel approprié : moniteur de télévision, écran graphique ou pellicule.**

A

B

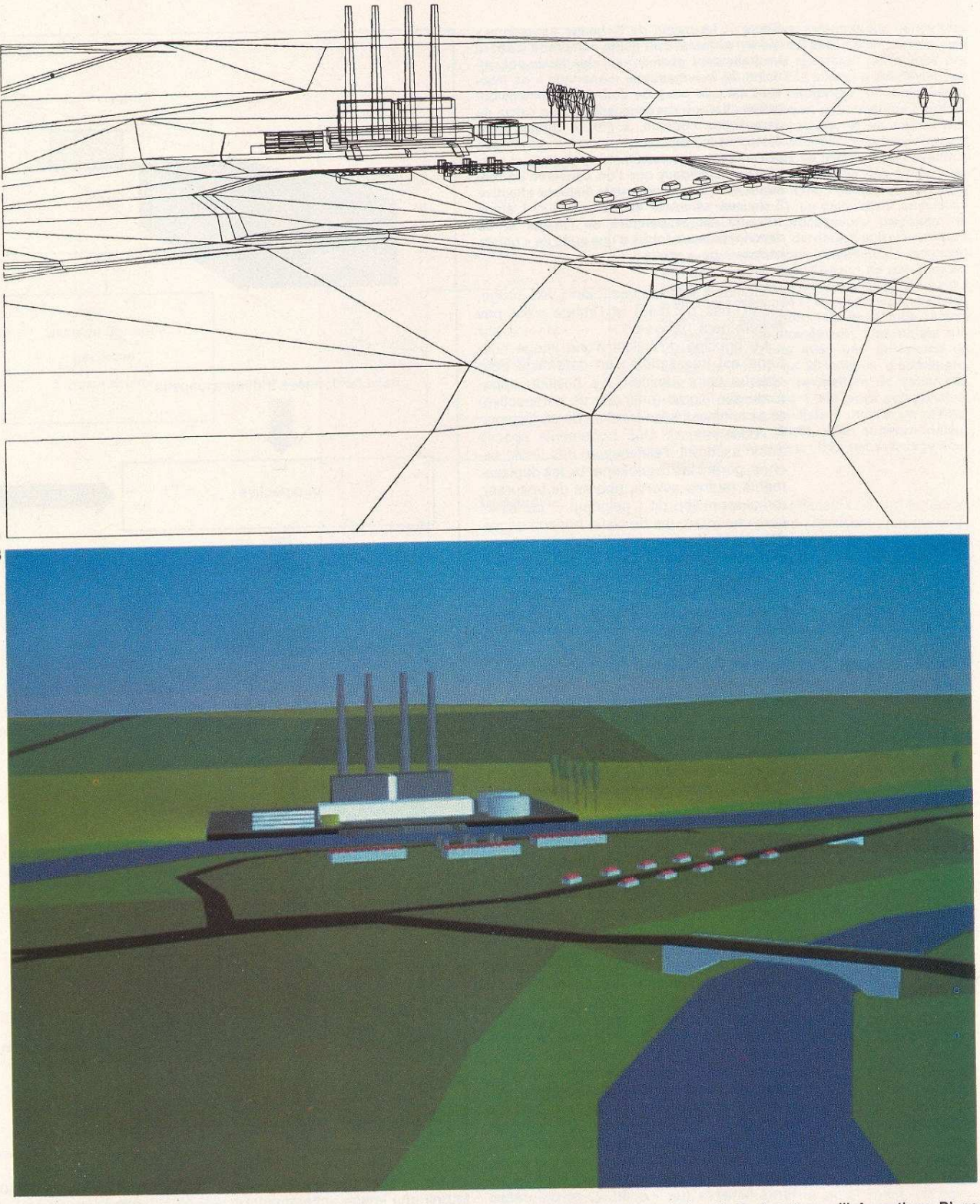


Figure 6. **La synthèse des images visualisées au cours de l'entraînement en simulateur est effectuée à partir de deux types d'informations. D'une part, les données sur la position et l'attitude de l'avion simulé au-dessus de la zone d'exercice : ces données proviennent du calculateur principal du simulateur. D'autre part, les données sur les objets et les paysages de la zone d'exercice : ces données sont stockées dans une mémoire de masse du système informatique de calcul de l'image synthétique. Elles constituent une « maquette numérique », dont l'établissement est une opération très importante. Compte tenu des contraintes associées au calcul en temps réel des images, les paysages et les objets sont décrits par un ensemble de faces polygonales planes, qui constituent dans la plupart des cas une approximation tout à fait acceptable de leurs surfaces. Cette description est clairement apparente sur la vue en perspective (A) de la maquette numérique d'une région comprenant une centrale nucléaire et un pont. Les données enregistrées dans la maquette numérique sont ainsi les coordonnées des sommets des faces polygonales et les paramètres définissant les couleurs associées à ces sommets. Après « peinture » par le générateur d'images synthétiques, une représentation colorée de très bonne qualité est obtenue (B).** (Document SOGITEC.)

Les paysages et les objets doivent être dépeints par une description mathématique précise de leur surface.

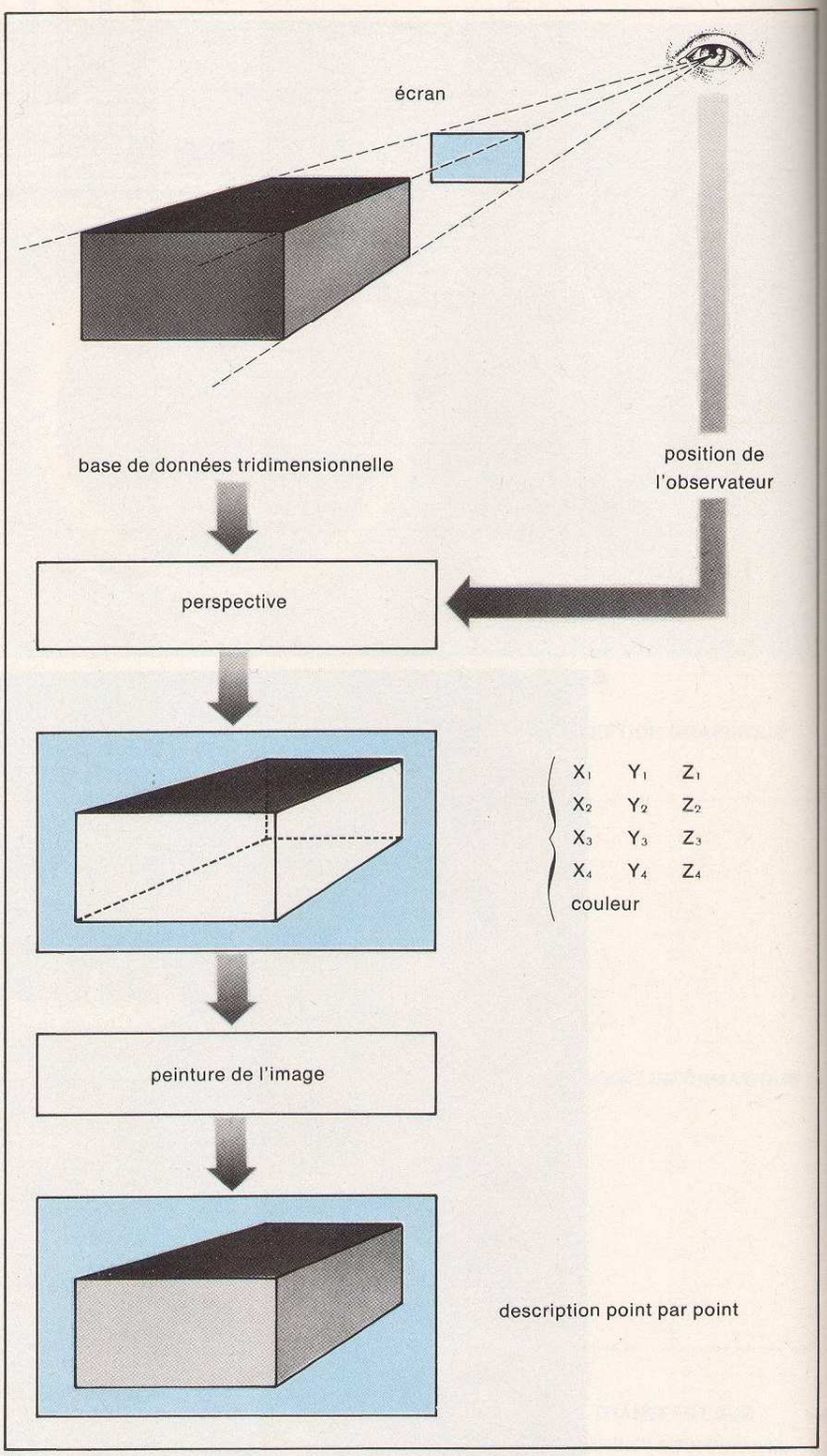


Figure 7. **Le calcul de l'« image numérique » qui est présentée au pilote comprend d'abord un traitement géométrique des faces polygonales de la « maquette numérique » se trouvant dans la base de données tridimensionnelles : il s'agit essentiellement d'un calcul de perspective conique, à l'issue duquel sont déterminées les coordonnées X et Y des projections des sommets polygonaux sur l'écran, cependant que l'on conserve en mémoire les informations sur la distance effective Z de ces sommets et leur couleur. L'étape suivante est la peinture de l'image et sa description sous forme d'une suite de « points images » ou « pixels ».**

disponibles sont limitées (blanc, vert, rouge, jaune, pas de bleu) et l'image n'est pas entièrement balayée.

Le principe de calcul d'une image nocturne est très simple : on détermine pour chaque point lumineux sa position apparente sur l'écran (méthode de perspective) et sa luminosité (en fonction de sa distance à l'observateur). Des traitements spécifiques assurent l'élimination des feux cachés, gèrent les clignotements, les déplacements (autres avions, phares de voitures), remplissent (on dit « peignent ») certaines surfaces (marques de piste, horizon dégradé). Un calculateur rapide, muni d'opérateurs spécialisés pour les calculs matriciels et les fonctions graphiques, peut assurer le traitement de plusieurs milliers de feux et d'une centaine de surfaces. Les systèmes de visualisation de nuit présentent une image plus réaliste et de meilleure résolution que les systèmes à caméra-maquette, et ce pour un coût moindre. Ils sont parfaitement adaptés à l'entraînement à l'atterrissage et équipent maintenant presque tous les simulateurs d'avions civils. Ils limitent cependant la préparation des pilotes au maniement de l'avion sur une zone d'exercice restreinte : un entraînement plus complet exige une visualisation de jour, techniquement beaucoup plus complexe à réaliser.

La visualisation de jour repose sur la synthèse d'images tridimensionnelles « pleines » en couleur, représentant des paysages et des objets en perspective et nécessitant des traitements spéciaux (élimination des parties cachées, traitement des couleurs pour recréer l'impression de relief). Le concept d'« images numériques » est à la base de cette synthèse : il s'agit de la décomposition de l'image (son « échantillonnage ») en un grand nombre de points (512 × 512 ou 1 024 × 1 024, soit environ 250 000 ou un million) appelés « pixels » (abréviation en anglais de « picture element »). La couleur est définie en chaque point par le niveau des trois composantes fondamentales de la télévision (rouge-vert-bleu, soit RVB). Ce niveau est généralement décrit par un « mot » de huit caractères binaires (un « octet »), ce qui définit ainsi 256 valeurs pour chaque couleur. Cette description numérique de l'image est immédiatement convertible en un signal vidéo RVB qui permet d'alimenter un moniteur de télévision haute résolution (500 à 1 000 lignes de définition).

Le problème est de calculer ces images numériques en tenant compte des contraintes importantes du fonctionnement en temps réel. D'une part, le système doit fournir une image entièrement recalculée à la cadence de la télévision, soit une image toutes les 40 millisecondes (ms). D'autre part, l'ensemble constitué par le pilote et le générateur d'images constitue un système « bouclé » (le pilote réagit en fonction de l'image et ses actions agissent sur celle-ci). Un tel système peut devenir instable si le délai de réaction du générateur d'images est trop long : en pratique, ce délai ne doit pas dépasser 150 ms... Ces contraintes conditionnent le choix des équipements informatiques nécessaires et conduisent naturellement, pour un matériel donné, à limiter le réalisme des paysages. La qualité accessible avec les systèmes disponibles, le GI 1000 par exemple, est cependant tout à fait compatible avec les besoins actuels de l'entraînement des pilotes.

Les images sont calculées à partir de deux ensembles de données (fig. 6). D'une

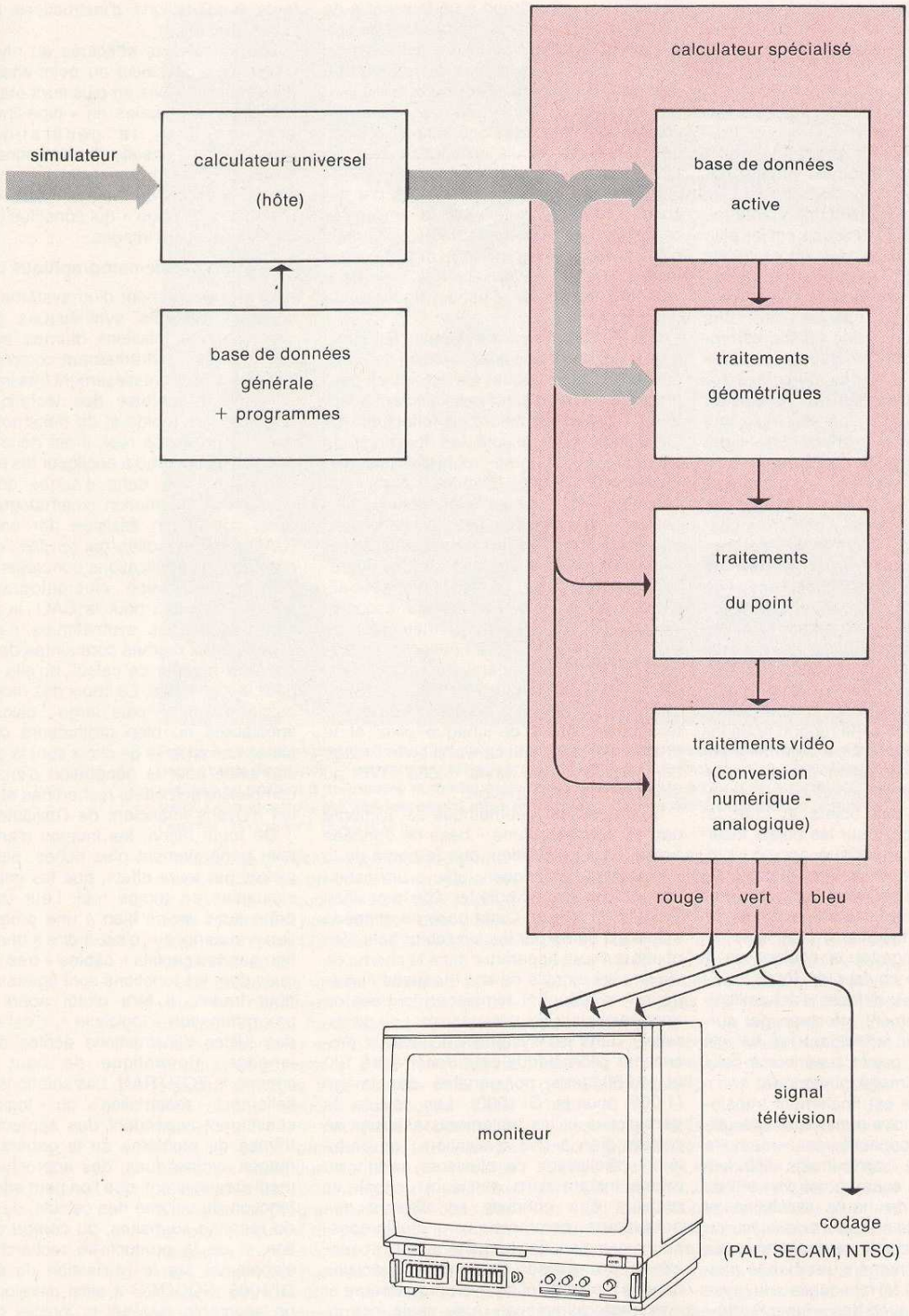


Figure 8. **Un système informatique permettant le calcul en temps réel des images numériques à la cadence de la télévision (25 images par seconde de 512 × 512 pixels) a été développé par SOGITEC. Il comprend un calculateur universel Perkin Elmer, qui constitue l'ordinateur « hôte » du système, et un calculateur spécialisé. Le calculateur universel assure toutes les fonctions de servitude du système (chargement initial, stockage des fichiers de données, dialogue avec l'opérateur, interface avec le simulateur). Le calculateur spécialisé comprend trois processeurs disposés en « pipe-line » (l'un derrière l'autre) réalisant chacun une partie des traitements conduisant à l'image numérique. Chacun de ces processeurs est constitué par une unité de calcul « microprogrammée », ayant un « parallélisme interne » d'exécution très élevé (elle réalise 6 opérations simultanément). Ces unités travaillent sur 32 bits avec une puissance de calcul de l'ordre de 20 millions d'opérations par seconde. Elles permettent de traiter des images comprenant 1 000 faces polygonales. La solution qui consiste à utiliser un ordinateur spécialisé, plutôt qu'un superordinateur universel, présente un très net avantage économique.**

part, la « maquette numérique » est constituée par une base de données contenant la description tridimensionnelle des objets et des paysages constituant l'environnement de la zone d'exercice. D'autre part, les « paramètres images » décrivent la position et l'attitude de l'observateur au-dessus de la zone d'exercice ainsi que les conditions d'éclairement et de visibilité (présence de brume, altitude du plafond nuageux); ces paramètres proviennent du simulateur et sont « rafraîchis » pour le calcul de chaque image (une extrapolation est même effectuée pour anticiper sur le mouvement de l'avion et réduire l'effet du délai de calcul).

Le codage de la base de données, ensuite conservé en mémoire sur un disque magnétique de grande capacité, constitue une étape très importante. Il fait appel à une description informatique des objets reposant sur des principes bien connus : un point est représenté par ses coordonnées, un plan par les coefficients de son équation, une droite par une représentation paramétrique... Les paysages et les objets doivent être dépeints par une description mathématique précise de leur surface : on utilise dans le cas qui nous intéresse une approximation de cette surface par des polygones plans. Une couleur est alors associée à chaque sommet de polygone. La compilation de ces données, à partir de cartes ou de maquettes, est effectuée soit de manière manuelle (avec cependant l'aide d'un logiciel spécifique), soit en utilisant les méthodes informatiques des systèmes de conception assistée par ordinateur (CAO) tridimensionnels. Il s'agit cependant d'une procédure longue et pénible, compte tenu de l'extension de la zone d'exercice : la base de données du système GI 1000 comprend la description de 100 000 polygones... L'étude de logiciels permettant une saisie semi-automatique ou automatique des données à partir de cartes ou de photographies est en cours.

Le calcul de l'image numérique.

A partir de la « maquette numérique » et des « paramètres images » qui déterminent les conditions d'observation, le système de visualisation calcule la description numérique de l'image de synthèse en deux temps.

La première étape est la détermination de l'aspect en perspective des différents polygones entrant dans le champ de vision du pilote. C'est à ce niveau que la description des objets par des faces polygonales planes apporte le plus de simplification : chaque polygone de la « maquette numérique » se transforme simplement, en perspective conique, en un autre polygone situé dans le plan de l'écran. Une puissance de calcul importante est cependant nécessaire pour déterminer les polygones, ou la partie des polygones, qui rentrent effectivement dans le champ de vision (opération de troncature). A l'issue de cette étape, il est nécessaire de conserver en mémoire non seulement la position des sommets polygo-

Les critères de choix pour l'animation cinématographique sont la cadence des images, la complexité des effets et... les moyens financiers de l'utilisateur.

naux sur l'écran, mais aussi leur distance effective à l'observateur : cette information sera en effet utile au stade suivant du calcul pour déterminer lorsque deux polygones se recouvrent en perspective sur l'écran, lequel cache l'autre (élimination des parties cachées) (fig. 7).

La seconde étape du calcul consiste à déterminer les paramètres de l'image numérique avec son ordonnancement en pixels. Elle est extrêmement importante car elle inclut les calculs techniquement les plus difficiles : détermination des intersections (« segments ») entre les polygones de l'écran et les lignes de l'image numérique; traitement final pour chaque pixel des couleurs, des textures, des reflets; correction ou « filtrage » des « défauts d'échantillonnage », c'est-à-dire des défauts introduits par la décomposition de l'image en pixels (le « crénelage », par exemple, qui fait apparaître comme brisée une ligne transverse au balayage de l'écran).

Les traitements effectués au niveau du pixel sont essentiels pour l'aspect de l'image finale. Il s'agit de « peindre » chaque point en fonction de la couleur des sommets polygonaux correspondants, de l'orientation des polygones concernés et de leurs distances à l'observateur. On distingue les effets de la lumière ambiante diffuse qui éclaire toutes les surfaces de la même façon et ceux de la lumière directionnelle, provenant d'une source ponctuelle, qui éclaire les surfaces différemment selon l'orientation de celles-ci (le rapport entre les deux types d'éclairement est déterminé par l'instructeur à l'initialisation de la simulation). L'éclairement directionnel fait apparaître les arêtes des objets et crée un dégradé de luminosité sur les objets incurvés. Un traitement spécifique, appelé « ombrage lisse », permet de faire ressortir ce dégradé et même de faire apparaître des reflets. L'éloignement, les effets atmosphériques (brumes, brouillard) sont pris en compte en mélangeant la couleur de la surface avec une couleur de fond.

La correction des défauts d'échantillonnage est généralement effectuée par suréchantillonnage, en effectuant les calculs sur un nombre de points supérieur à celui que comportera l'image numérique.

L'image calculée est finalement transférée dans une mémoire numérique spécialisée de grande capacité, la « mémoire image ». A chaque « cycle image » (25 fois par seconde), son contenu est converti en un signal vidéo de haute résolution et envoyé à l'entrée de moniteurs de télévision de qualité pour pouvoir restituer tous les détails de l'image numérique : bande passante élevée (20 MHz), tubes du type « shadow mask » avec des « lumiphores » (éléments couleurs lumineux) de 0,31 mm, parfaite convergence.

Des calculateurs spécialisés de grande puissance.

Le calcul en temps réel de l'image numérique se traduit par des flux d'informations extrêmement élevés : la génération à chaque seconde de 25 images de 512 × 512 pixels, avec 256 niveaux de luminosité par couleur, correspond à un flux voisin de 20 millions d'octets par seconde (Mo/s)... Les calculs doivent porter en outre sur un nombre de pixels supérieur au contenu de l'image finale (ce facteur est le coefficient de sur-écriture, de l'ordre de 2 à 3) et comprennent plusieurs opérations par pixel. Le volume de calculs à effectuer se situe ainsi dans la gamme des dizaines ou des centaines de millions d'opérations par seconde, volume au-delà de la limite des capacités des superordinateurs universels (voir *la Recherche*, n° 147, p. 1084, septembre 1983). La réalisation d'un système informatique spécialisé est donc nécessaire (fig. 8).

L'architecture de ces systèmes fait appel à un calculateur universel, qualifié de « calculateur hôte », auquel est adjoint en périphérique un calculateur spécialement adapté aux types de calculs à effectuer. Le calculateur hôte assure les fonctions de servitude du système : contrôle des mémoires de masse (disques durs), des consoles, etc. Il assure également le chargement initial des données, la gestion des interfaces avec le simulateur et assure les calculs qui peuvent être séparés des opérations en temps réel. Le calculateur spécialisé comprend trois processeurs associés aux différentes étapes du traitement de l'image numérique : le processeur géométrique réalisant les opérations de perspectives et de troncatures, le processeur de calcul du point-image établissant les caractéristiques finales de chaque pixel et le processeur vidéo qui convertit enfin l'image numérique en un signal vidéo RVB au standard de la télévision.

Le processeur géométrique est alimenté par les données d'une « base de données active » qui ne contient que la partie de la « maquette numérique » utile à un instant donné du calcul, compte tenu de la position simulée de l'avion. Cette base de données active est gérée par le calculateur hôte : les objets qui vont apparaître dans le champ de vision sont extraits de la « maquette numérique » et viennent remplacer en base de données active ceux qui viennent de disparaître. Dans les systèmes actuels, le processeur géométrique peut traiter entre 100 et 4 000 faces polygonales par image (1 000 pour le GI 1000). Les calculs de perspective et les traitements associés se prêtent bien à une réalisation « en parallèle » (réalisation de plusieurs calculs au même instant dans plusieurs unités). Ils peuvent être conduits en utilisant des ordinateurs commerciaux « multiprocesseurs », mais il est en général plus économique de réaliser des unités spéciales basées sur l'emploi de microprocesseurs et « microprogrammées » (une seule instruction contrôle l'ensemble des opérateurs de traitement de l'unité de calcul). C'est cette approche qui a été adoptée par SOGITEC pour son système GI 1000, avec trois unités comprenant environ 500 circuits de grande intégration et ayant un cycle d'exécution de 180 nanosecondes (ns). Ces unités sont disposées en « pipe-line », ce qui signifie qu'elles réalisent chacune une partie des traitements géométriques sur tous les polygones intervenant dans le calcul. Leur puissance unitaire est équivalente à 20 millions d'instructions par seconde (20 Mips).

Les traitements effectués au niveau du processeur de calcul du point-image sont également réalisés en plusieurs étapes par des unités disposées en « pipe-line » : en premier lieu, la génération des « segments »; ensuite, la détermination de la couleur des pixels; enfin, l'écriture des caractéristiques de l'image finale dans la « mémoire d'image » qui constitue la sortie du générateur d'images.

Animation cinématographique et CAO

Le développement d'un système de génération d'images synthétiques pour la simulation de missions diurnes est donc une opération extrêmement complexe, qui représente un investissement très important et exige la maîtrise des techniques de l'électronique rapide et du traitement informatique en temps réel. Il est donc naturel que l'on ait cherché à appliquer les résultats de ces travaux dans d'autres domaines d'activités : l'animation cinématographique et la conception assistée par ordinateur (CAO), en particulier, qui ont fait l'objet de nombreuses applications concrètes (fig. 9).

Pour l'animation cinématographique, comme d'ailleurs pour la CAO, la génération des images synthétiques n'est pas soumise aux mêmes contraintes de temps, donc de rapidité de calcul, qu'elle ne l'est pour la simulation. Le choix des moyens de calcul est donc plus large : calculateurs spécialisés ou bien ordinateurs commerciaux. Les critères de choix sont la cadence souhaitée pour la génération d'images, la complexité des effets recherchés et aussi les moyens financiers de l'utilisateur !

De toute façon, les images d'animation sont généralement plus riches, plus complexes par leurs effets, que les images de simulation en temps réel. Leur calcul se prête donc moins bien à une programmation « matérielle », c'est-à-dire à une exécution par des circuits « câblés » très rapides, mais dont les fonctions sont figées une fois pour toutes. Il fera plutôt appel à une programmation « logicielle », c'est-à-dire à des séries d'instructions écrites dans un langage informatique de haut niveau comme le FORTRAN. Les solutions essentiellement « matérielles » ou « logicielles » constituent cependant des approches extrêmes du problème de la génération d'images synthétiques; des approches intermédiaires existent, que l'on peut adapter en fonction du volume des calculs, des temps de réponse souhaités, du confort d'utilisation et de la productivité recherchée. En s'appuyant sur la réalisation du système GI 1000, SOGITEC a ainsi développé tout un ensemble matériel et logiciel qui peut être configuré selon le type d'application. Avec ce système, un objet décrit par un logiciel de CAO habituel (Euclid, Catia ou Unisurf) peut être mis en couleur, animé image par image, éventuellement de façon interactive.

La synthèse d'images tridimensionnelles en couleurs constitue un progrès très important pour l'animation cinématographique. La technique classique de peinture de chaque image sur un support transparent représente en effet un travail fastidieux et

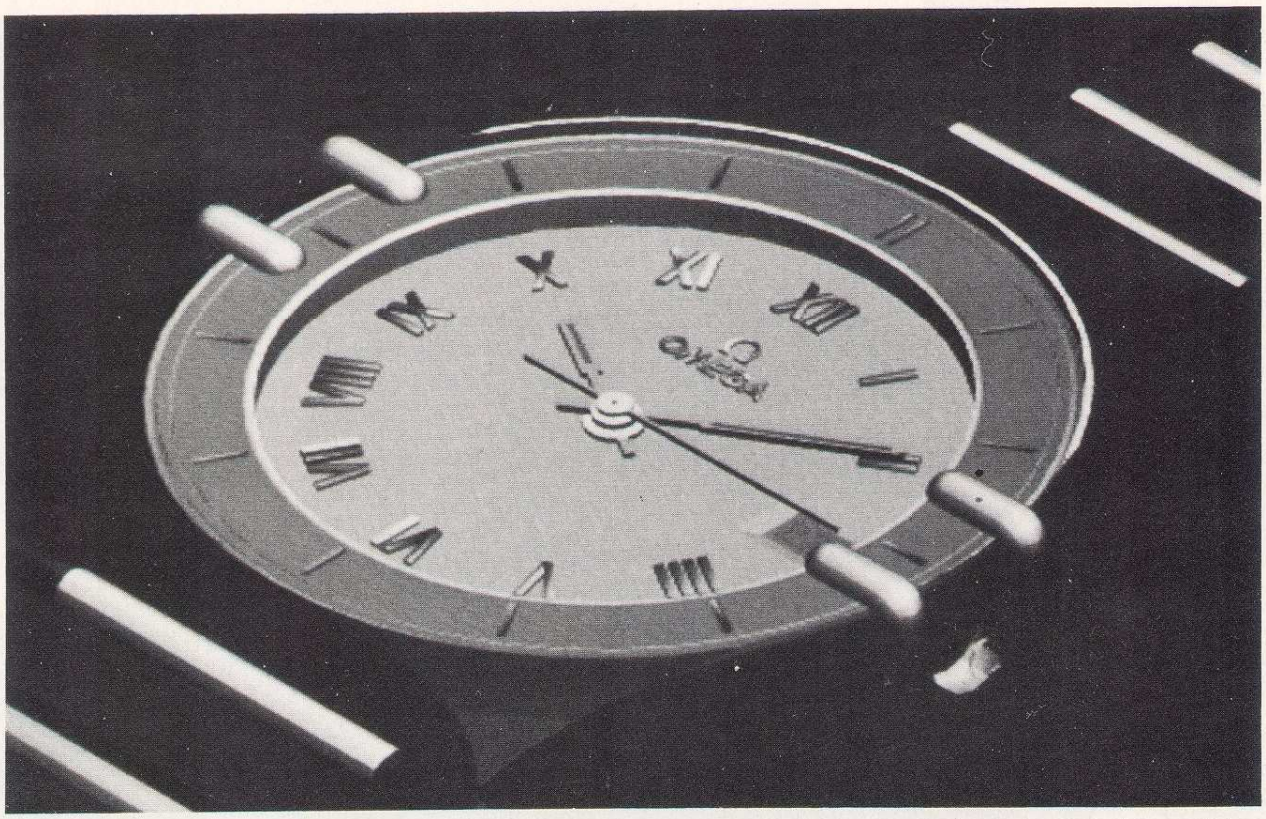


Figure 9. **Les techniques de calcul d'images numériques développées pour la simulation aérienne sont appliquées de plus en plus largement dans deux autres domaines : l'animation cinématographique et la conception assistée par ordinateur (CAO). Cette image synthétique d'une montre a été réalisée en partant d'un modèle numérique de cette montre obtenu à l'aide du logiciel « Euclid » avec des visualisations « fil de fer » (dessin au trait). La maquette a été ultérieurement mise en couleur : il est ensuite possible de la présenter depuis n'importe quel point de vue et même de l'animer.** (Document SOGITEC.)

coûteux. La génération synthétique permet d'automatiser ce processus de création et une dizaine de sociétés font déjà appel à cette technique pour réaliser des génériques, des spots publicitaires et même des longs métrages.

Les processus utilisés dérivent des travaux de nombreux laboratoires de recherche sur la modélisation de scènes tridimensionnelles et l'interaction de la lumière et de la matière. Elles permettent la création d'images très réalistes et la maîtrise d'effets visuels sophistiqués. Cette recherche d'effets nouveaux nécessite la mise au point, parfois pour le calcul de quelques secondes de film, de versions spécifiques des programmes de synthèse d'images. La programmation doit donc être souple, ce qui va de pair avec l'emploi de langages informatiques de haut niveau, mais n'optimise pas les temps de calcul. Ceux-ci peuvent être très longs : de quelques minutes à quelques heures pour une image (entre le 1/5 000e et le 1/100 000e du temps réel) et ce sur des ordinateurs puissants, de capacités dépassant un million d'instructions par seconde (1 Mips).

Un outil très réaliste pour la conception architecturale.

Pour la CAO, les critères importants sont la rapidité de la présentation (nécessaire à l'interactivité), la clarté (pas de lignes inutiles) et la qualité du dessin final. En ce qui concerne la rapidité, l'image couleur pourrait sembler désavantagée par rapport à l'image « fil de fer » (formée d'un dessin au trait). Il n'en est rien : l'élimination des parties cachées peut au contraire être réalisée plus vite, de façon systématique, pour une image colorée. Les systèmes de synthèse d'images que nous avons décrits pourront offrir, avec un temps de réponse plus court, une représentation plus compréhensible et un meilleur rendu des formes, grâce à la simulation des effets de l'éclairement.

L'avantage de l'imagerie synthétique est encore plus évident lorsque la qualité de l'image finale est essentielle. En architecture, par exemple, cette technique constitue un outil beaucoup plus réaliste que les systèmes disponibles auparavant. L'évaluation visuelle des volumes est beaucoup plus précise car elle porte sur des images vraiment représentatives de l'aspect du projet; avec un générateur en temps réel, il est même possible de « visiter » un projet avant même que la première pierre n'ait été posée... Des maquettes numériques de plusieurs versions du projet peuvent coexister, et leurs aspects comparés depuis n'importe quel point de vue, au gré du « visiteur » !

Un tel système apporte au maître d'ouvrage de nouveaux éléments de jugement particulièrement efficaces et offre une rapidité et une souplesse d'intervention jusqu'alors inaccessibles. Il contribue également à la promotion commerciale en remplaçant avantageusement les maquettes fragiles et coûteuses.

L'imagerie synthétique sera un élément indispensable des systèmes de CAO de l'avenir. Comme elle le devient pour l'imagerie cinématographique. Et comme elle l'est déjà pour la simulation du pilotage. ■

Pour en savoir plus :

■ Pour la simulation, il n'y a pas de bibliographie « grand public ». Une bibliographie très complète est tenue à jour par le CEDOCAR et diffusée régulièrement dans un bulletin *Nouveautés scientifiques et techniques*. Le thème « Simulateurs de vol, entraînement des pilotes et astronautes » porte le numéro 14 080.
Images et ordinateur.

■ P. Morvan et M. Lucas, *Image et ordinateur : introduction à l'infographie interactive*, Larousse, 1976.

■ W. M. Newman, R. F. Sproull, *Principles of interactive computer graphics*, Mac Graw Hill, 1973.

■ J. D. Foley, A. Van Dam, *Fundamentals of interactive computer graphics*, Addison Wesley, 1981.

■ M. Lucas, *La réalisation des logiciels graphiques*, Eyrolles, 1982.

■ F. Coupigny, « La synthèse des images », *la Recherche*, n° 144, p. 734, mai 1983.