

# Nouvelles technologies pour l'Air Traffic et l'Airspace Management

Jean-Marc Alliot (DTI/R&D)

## Résumé

Les systèmes de contrôle et de gestion de l'espace aérien ont connu une évolution relativement lente au cours des vingt dernières années. Depuis 50 ans l'informatique a été introduite dans ces systèmes. Dès 1980, les traitements "plan de vol", la poursuite multi-radar, l'image radar renseignée, le digitatron, le filet anticollision, etc. existaient dans le système français.

Mais les possibilités offertes par l'explosion de la puissance informatique au cours des 30 dernières années sont loin d'avoir été complètement exploitées. Le projet SESAR tente aujourd'hui d'unifier au niveau européen les différentes pistes, mais son horizon d'application le limite majoritairement à des concepts déjà éprouvés, même si le Work Package E s'intéresse également à l'horizon 2020+.

Dans cet Entretien, nous explorerons certaines des pistes qui pourraient être suivies dans les années à venir afin de mieux tirer parti des formidables capacités des calculateurs modernes, que ce soit en terme de représentation (puissance des nouvelles cartes graphiques), de saisie de l'information (nouvelles IHM tactiles), ou de puissance de calcul (algorithmes d'optimisation de routage, ou de détection et résolution de conflit).

## 1. Introduction

La fonction principale du contrôle de la circulation aérienne est d'assurer un écoulement sûr et ordonné des vols, en évitant les abordages entre aéronefs en l'air ou au sol. Sa raison d'être est avant tout la sécurité.

Le système de gestion de la circulation aérienne est un système complexe par bien des aspects : il comporte un grand nombre d'agents humains et techniques, il doit pouvoir traiter des aéronefs ayant des performances et des équipements variés ; c'est un système ouvert dont l'arrêt rapide dans un état sécuritaire est impossible.

L'automatisation consiste à transférer à un système (totalement ou partiellement) des tâches effectuées jusqu'à présent par un opérateur humain. Depuis 40 ans l'informatique a été introduite dans la gestion de la circulation aérienne. L'automatisation a porté sur le traitement plan de vol et radar pour distribuer l'information pertinente aux contrôleurs sur les secteurs et faciliter les transferts des vols entre secteurs. Elle a permis de faire passer le trafic, mais n'a pas augmenté la productivité des contrôleurs. Dans les 10 prochaines années des outils d'assistance au contrôleur et au pilote devraient permettre d'augmenter la sécurité et la capacité dans une mesure que l'on ne sait pas évaluer.

## 2. Le contexte : près de 50 ans d'assistance automatisée

---

Depuis le début des années 1960 la navigation aérienne a conduit une activité pour développer une assistance automatisée aux contrôleurs dans les centres de contrôle En-route de la navigation aérienne dans le cadre du projet Cautra (Coordinateur Automatique du Trafic Aérien).

Cette assistance automatisée a eu pour but principal de faciliter le travail du contrôleur à l'aide d'un recueil, d'un traitement, d'une distribution et d'une présentation des informations au contrôleur. Dès les années 60 des psychologues-ergonomes ont analysé le travail du contrôleur et ont été associés à la conception des outils qui ont été développés avec la technologie du moment. Le projet Cautra a suivi l'évolution des matériels informatiques : gros calculateurs centralisés pour les 3 premières générations, mini-calculateurs à partir des années 80, stations de travail et serveurs au cours des années 90

La Figure 1 retrace les évolutions passées du trafic et sa prévision, ainsi que celles du nombre de secteurs de contrôle et du nombre de contrôleurs dans les centres en-route. L'assistance automatisée a peu augmenté la productivité globale annuelle des contrôleurs et ce malgré des investissements de plus en plus importants en matériels informatiques et surtout en développement des logiciels.

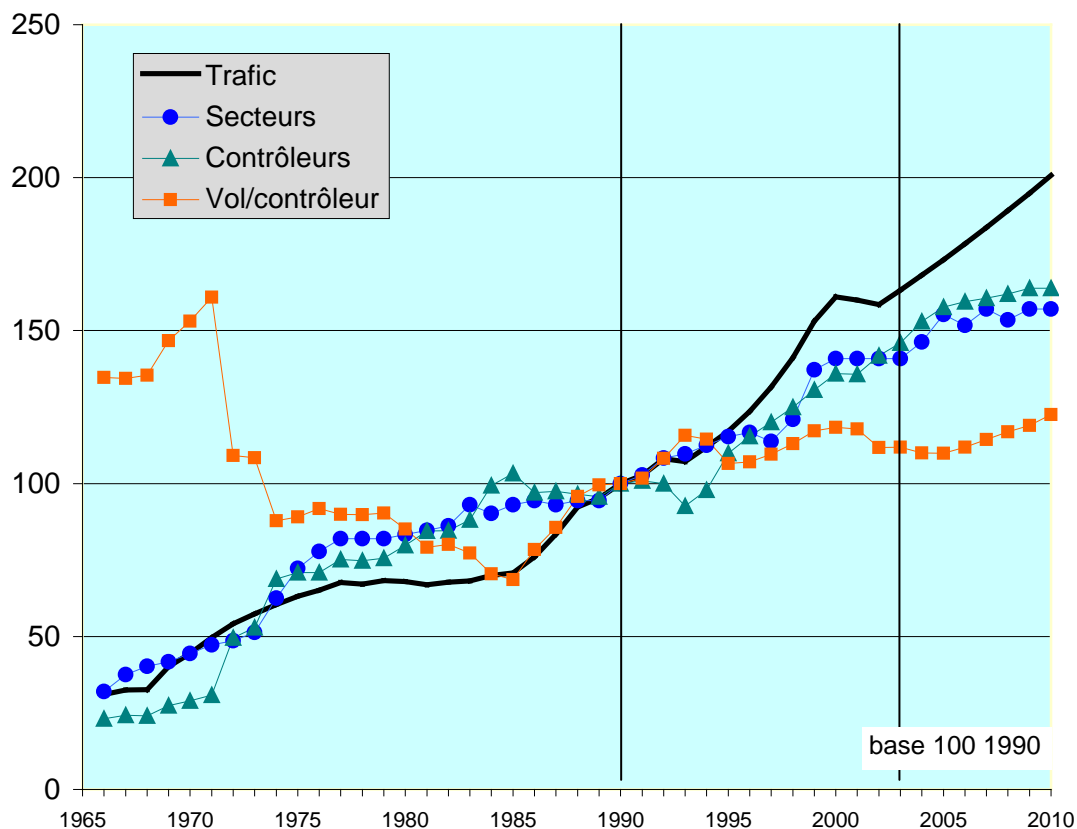


Figure 1 : Trafic, secteurs et contrôleurs

1960	Cautra 1	Traitement plan de vol Impression des strips
1965	Cautra 2	
		Traitement radar

1970	Cautra 3	Image radar renseignée
		Digitatron
		Filet de sauvegarde
1980	Cautra 4	Coordination automatisée
		Régulation de trafic national
1990	Cautra 4.1	
		Maestro - Aide au séquençement Régulation européenne du trafic (CFMU)
2000	Cautra 4.2	ODS-nouveau poste de travail

**Tableau 1 : Historique Cautra**

Aujourd'hui les principales fonctions du système de contrôle français sont :

- le recueil, le traitement, la distribution et la présentation des informations, position, vitesse et identification des aéronefs, recueillies par les radars;
- le recueil des informations plan de vol, effectué aujourd'hui au plan européen, le traitement de ces informations et la distribution de bandes de papiers, appelées 'strips', comportant les informations nécessaires pour le contrôleur et la coordination lors du transfert d'un avion d'un secteur de contrôle à un autre;
- des filets de sauvegarde permettant d'avertir le contrôleur avant un risque d'abordage à court terme (30 sec) ou de collision avec le sol en particulier en approche près des aéroports;
- enfin une première fonction d'aide à la décision par une aide au séquençement à l'arrivée sur les grands aéroports (Maestro).

Les fonctions de régulation sont depuis 1996 traitées de manière centralisée en Europe.

### 3. Le futur de l'ATM

Nous allons présenter deux axes d'amélioration :

- Création de systèmes automatisés
- Évolution des techniques d'affichage et d'interaction : utilisation de la 3D et de la réalité augmentée

#### 3.1 Les projets de recherche sur l'automatisation avancée

Des projets de recherche ont cherché à développer des systèmes entièrement automatisés.

##### 3.1.1 Des systèmes centralisés au sol

1) Le premier projet d'automatisation « poussée » est le **projet AERA** (Automated En-Route Air Traffic Control), développé au début des années 80 à la MITRE Corporation, aux Etats-Unis.

2) Le **projet ARC2000** a été développé au Centre Expérimental d'Eurocontrol de Brétigny à la fin des années 80. Il s'agit du premier concept qui soit allé, avec un

certain succès, jusqu'au stade de l'expérimentation en simulation arithmétique. Le principe d'ARC2000 était d'affecter à chaque avion un tube en 4 dimensions (x,y,z,t) respectant son plan de vol. Dès qu'un nouvel avion se présentait, son tube optimal était calculé en considérant les tubes précédemment affectés comme des contraintes fixes. Autrement dit, un tube déjà affecté n'était pas remis en cause. Le principal défaut d'ARC2000 était son manque de robustesse et l'irréalisme de certaines de ses hypothèses (capacité à prévoir parfaitement une trajectoire 4D sur des durées d'au moins une heure). ARC2000 a été arrêté au début des années 90. Cependant certaines des idées d'ARC2000 (en particulier autour de la notion de trajectoire 4D) se retrouvent aujourd'hui dans le projet SESAR.

3) **Le projet ERCOS** a été développé au CENA dans les années 90 sur l'idée d'une résolution globale centralisée. Ce projet a défini la notion de cluster, ou ensemble d'avions interférant dont les trajectoires doivent être calculées simultanément. Les manœuvres mises en œuvre pour résoudre les conflits restent simples, et les algorithmes prennent en compte les incertitudes sur les vitesses horizontales et verticales des avions. Ces algorithmes tentent de trouver des manœuvres optimales à l'aide d'algorithmes d'optimisation globale. CATS a été testé sur du trafic réel en simulation arithmétique. Le système est capable de résoudre l'ensemble des conflits au dessus du niveau 60 pour une journée de trafic complète. ERCOS a été à la base du projet ERASMUS qui se contente d'utiliser une partie des algorithmes d'ERCOS (la résolution en vitesse) pour rendre le trafic plus « simple » en diminuant le nombre de conflits perçus par le contrôle. Ce concept a été intégralement repris dans le cadre du projet SESAR.

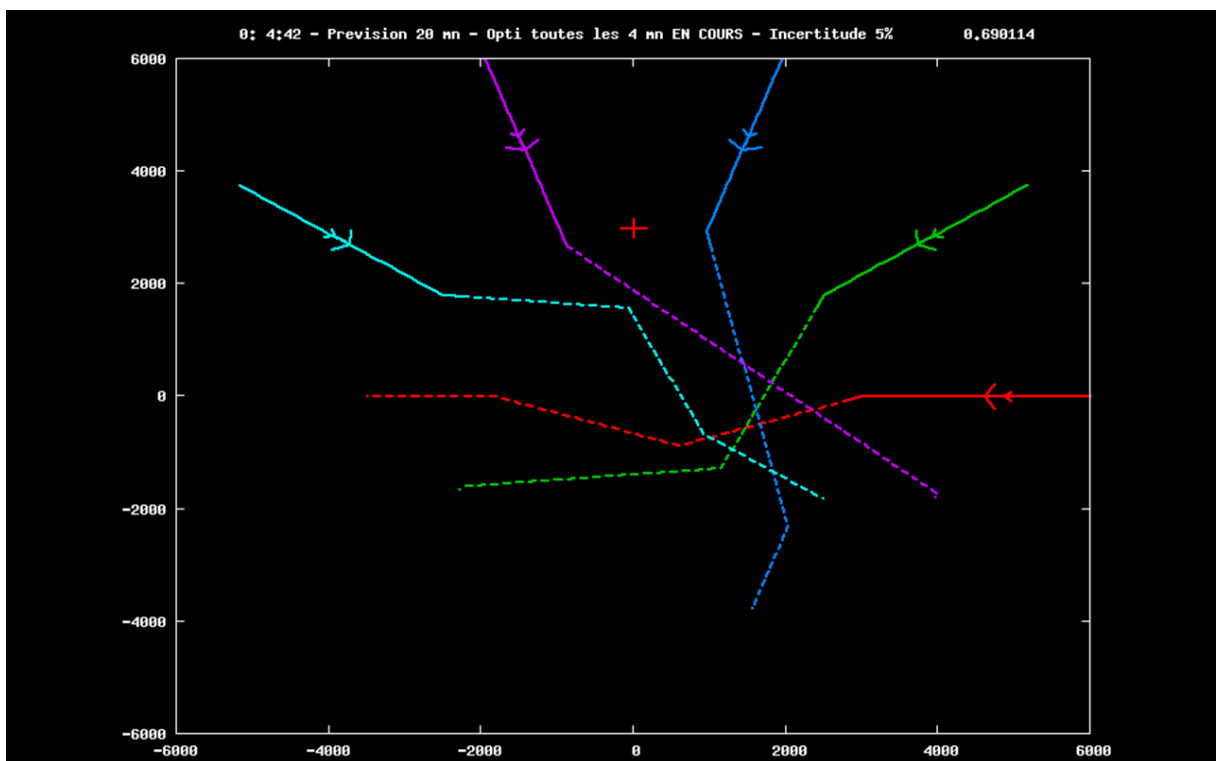


Figure 2 : exemple de résolution automatique de conflit

### 3.1.2 Des systèmes distribués : avions autonomes et séparations embarquées

Les méthodes de résolution décrites dans ce paragraphe sont radicalement différentes de celles évoquées précédemment. Nous n'avons vu jusqu'ici que des projets basés sur des systèmes au sol. Le projet ATLAS (Air Traffic Land and Airborne Systems), étude de la CE/DGXIII, est parmi les premiers projets à avoir envisagé l'hypothèse d'avions autonomes ou hybrides en 1993. Plusieurs méthodes se sont appuyées sur cette hypothèse :

1) La plus ancienne est celle étudiée par Karim Zeghal à l'Onera. Il introduisit la notion de coordination d'actions grâce à différentes forces qui s'exercent sur les agents, dans notre cas, les avions. Dans la mesure où le processus individuel ne nécessite que des informations locales à l'appareil, il peut fonctionner de façon autonome à partir d'une perception de son environnement. Il reste néanmoins de nombreux problèmes à résoudre : il faut maintenir une densité suffisamment faible d'avions (ces méthodes échouent relativement souvent lorsque le nombre d'avions est trop important), ou encore savoir donner des manœuvres simples au pilote.

2) **Le projet FREER** (Free-Route Experimental Encounter Resolution) est né en 1995 au Centre Expérimental d'Eurocontrol. L'idée est de généraliser les règles de résolution du vol à vue par des EFR (Extended Flying Rules), qui pourraient permettre aux avions d'assurer eux-mêmes l'évitement. Les concepteurs de FREER ont complété les règles de l'air de façon à pouvoir prendre en compte toutes les configurations de conflit à deux avions mais le fonctionnement de FREER dans le cadre de conflit impliquant plusieurs avions n'a jamais été éclairci complètement.

3) **Le projet FACES**, développé au CENA, résout le problème de la coordination des avions par un mécanisme de distribution de jetons. Cet algorithme permet de construire un ordre total pour l'ensemble des avions, même si ceux-ci ne sont pas en visibilité directe les uns des autres. Une fois cet ordre défini, on utilise un algorithme classique en robotique ( $A^*$ ) pour résoudre les conflits. FACES a été testé en simulation arithmétique sur du trafic réel. Il permet de résoudre l'ensemble des conflits sur la France au dessus du niveau 300.

L'inconvénient des méthodes autonomes est qu'elles sont moins capacitives que les méthodes centralisées : il s'agit en effet de méthode recherchant de multiples optima locaux, alors que les méthodes centralisées recherchent un optimum global pour le système.

## 3.2 3D et réalité augmentée dans le cadre du contrôle aérien

### 3.2.1 Introduction

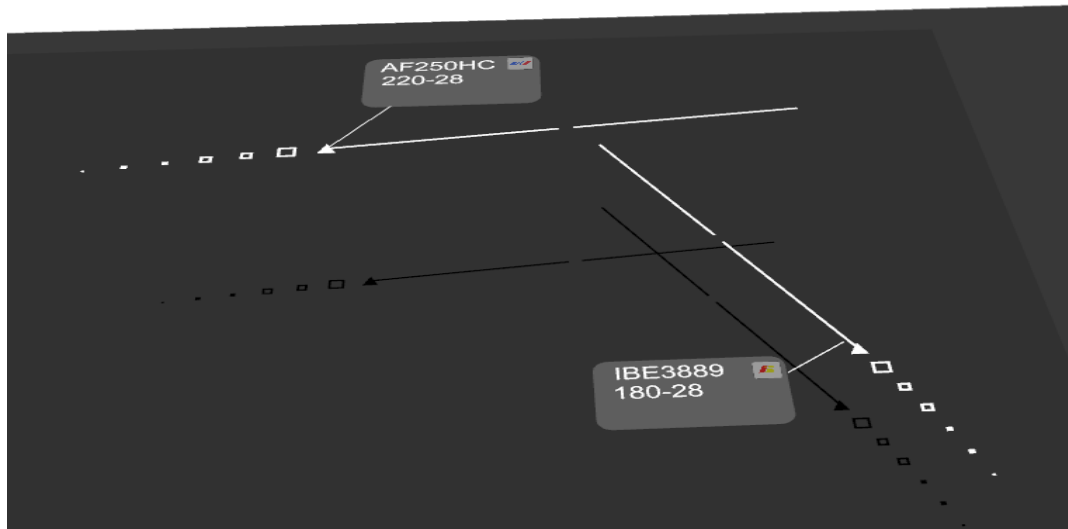
La communication entre l'homme et la machine est un défi particulièrement important dans le domaine du contrôle aérien. Nos études explorent le domaine de l'affichage en 3D, la réalité augmentée, ainsi que la combinaison de ces deux techniques.

Ces nouvelles techniques d'affichage offrent de nouvelles possibilités d'interactions tout en posant des problématiques nouvelles.

### 3.2.2 Généralités

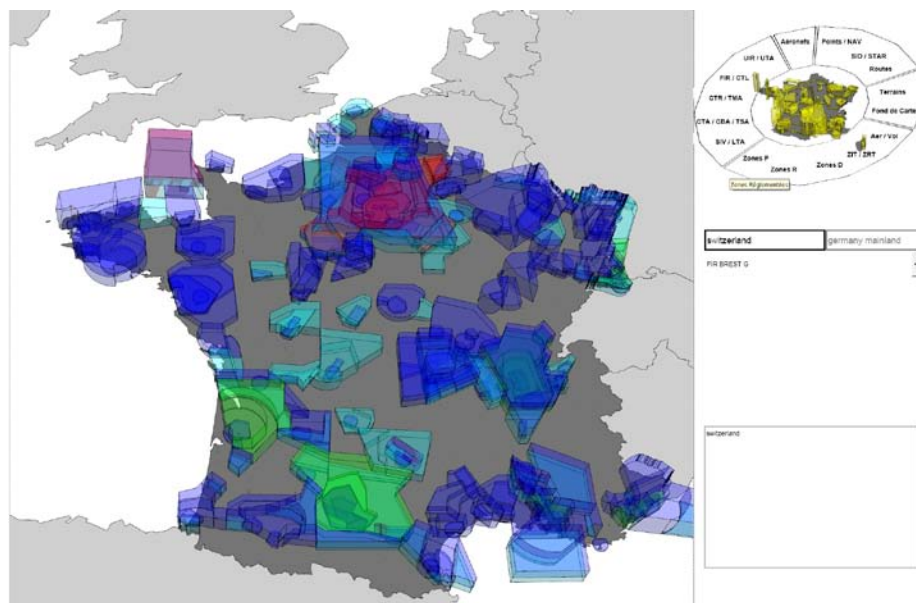
La 3D est une piste explorée pour de nouveaux affichages. La 3D peut être envisagée sous deux formes différentes : la 3D projetée et la 3D stéréoscopique. Des exemples des deux cas sont présentés pour illustrer les possibilités et les limites de ces affichages. Exemple : lorsque la vue n'est plus une vue de dessus, le contrôleur ne voit

plus les distances entre les vols de la même manière (ci-contre une ombre projetée au sol de la trace des vols). Dans le cas d'une vue stéréoscopique, même si le cerveau voit des différences de profondeur, il n'est pas performant pour évaluer les profondeurs. La 3D s'accompagne de nouvelles problématiques d'interactions. Par exemple : à quelle profondeur dans l'image doit-on mettre le curseur souris qui va permettre d'interagir avec les éléments ? Comment l'utilisateur va-t-il pouvoir changer la profondeur de son curseur ?



### 3.2.3 La 3D : outil de formation

L'utilisation d'une visualisation 3D pour la formation semble un outil très prometteur du fait de la simplicité de mise en œuvre et de l'avantage procuré en terme de possibilité d'exploration d'une situation, d'un schéma...La première méthode présentée consiste à utiliser les capacités 3D des documents PDF. Ces fichiers 3D sont tout à fait adaptés à la formation puisque leur lecture ne demande rien de plus que le très standard logiciel "Acrobat Reader"



distribué gratuitement par Adobe ; les fichiers sont de très petite taille. Le fait d'explorer la scène en 3D est bien plus efficace pour comprendre une situation ou un schéma qu'un document avec de multiples vues et de longs discours. De plus, les capacités interactives

des documents PDF permettent d'agir sur le contenu de la scène (par exemple pour activer ou non l'affichage de certaines catégories d'information).

Une deuxième méthode présentée consiste à utiliser la réalité augmentée pour représenter la situation. L'intérêt principal de la réalité augmentée est de proposer une interaction complètement naturelle pour naviguer dans la vue 3D. L'utilisateur tient dans la main des motifs identifiés par le système. Le système dessine un objet 3D à l'endroit où il détecte le motif. La présentation de la scène 3D peut se faire en 3D stéréoscopique ou non, suivant le matériel employé.

L'image ci-après montre l'utilisation d'un casque avec vision binoculaire, surmonté d'une webcam. L'avion et la plateforme que l'on y voit n'existent pas dans la réalité, c'est l'ordinateur qui les incruste dans l'image. La mise en œuvre peut être bien plus simple en utilisant un écran d'ordinateur classique et une webcam.



### 3.2.4 La 3D au service du contrôle aérien

Pour le contrôleur aérien, les besoins d'affichage sont très élevés. Historiquement, les écrans utilisés par les contrôleurs étaient des écrans spécifiques avec une résolution de 2048x2048 pixels. Cela représente approximativement deux écrans Full HD superposés. Cette problématique doit rester présente à l'esprit lors de l'étude de nouvelles solutions puisque même si des expérimentations sont faites avec des résolutions plus basses, la solution finale doit permettre la résolution élevée requise.

L'étude de l'utilisation du relief en 3D stéréoscopique pour l'image radar est exploratoire puisqu'il faut étudier diverses problématiques :

- trouver une manière pertinente d'exploiter la troisième dimension (altitude des étiquettes, altitudes des plots radar),
- trouver une manière pertinente d'interagir avec une vue en relief (sélection, saisie, navigation),
- construire une scène compréhensible en 3D (la structure de la scène va permettre ou non au cerveau de déterminer les profondeurs relatives des différents éléments),

- choisir une solution d'affichage qui permet des résolutions d'affichage élevées,
- choisir une technique d'affichage qui ne contraint pas l'utilisateur en terme de positionnement par rapport à l'écran car il est important que plusieurs contrôleurs puissent travailler sur la même image.

De plus, l'image radar étant un outil de travail, elle doit présenter un confort d'utilisation satisfaisant. Avec les techniques de visualisation 3D stéréoscopiques actuelles, cette notion de confort se heurte à un problème de dissociation entre la distance de focalisation et la distance de convergence des yeux. Cette dissociation n'étant pas naturelle pour le cerveau peut être une cause de maux de tête et d'une baisse des performances pour évaluer les distances par rapport aux capacités d'évaluation dans la réalité. La luminosité et la distance d'affichage sont donc à prendre en compte pour réduire l'accommodation.

Le contrôleur travaille principalement à l'image radar, mais la mémorisation se fait actuellement en utilisant des bandes de papier appelées "strips". Chaque strip représente un vol. Une évolution prévisible est le remplacement de ces strips en papier par une version électronique. En attendant, nous étudions une méthode intermédiaire qui permet de rendre plus dynamique le document papier, d'afficher des informations complémentaires liées au vol sans surcharger l'image radar. Ainsi le contrôleur continue d'écrire sur les strips et les classe à sa guise.



### 3.2.5 La 3D pour la reconstitution

La reconstitution en vue d'analyse peut aussi bénéficier d'une présentation 3D. Dans ce cas, la 3D permettra d'explorer la scène à la recherche d'informations, de changer de point de vue pour se mettre à la place des différents intervenants tour à tour. Par rapport à une activité de contrôle, la reconstitution est bien moins exigeante puisque l'aspect temps réel disparaît. Cela signifie par exemple que l'on peut avoir une finesse d'affichage modeste puisque l'utilisateur a le temps de grossir les différents endroits de l'image qu'il souhaite analyser.

### 3.2.6 Conclusion

La vie quotidienne est vécue par les humains en 3D. L'objectif est donc de trouver un moyen d'exploiter les capacités du cerveau à analyser une scène en 3D. Les essais actuels semblent très prometteurs en ce qui concerne l'utilisation de la 3D pour la formation. La 3D ouvre un nouveau champ d'études dans la présentation de l'information et les interactions homme/machine. Les techniques d'affichage 3D se démocratisent et rendent réaliste l'introduction de ce mode d'affichage dans le contrôle aérien.



Conclusion :

L'évolution de la technologie dans nombre de domaines, qui vont de la puissance des calculateurs aux nouvelles techniques de visualisation, ouvrent de nouvelles perspectives en matière de développement d'outils pour la gestion du trafic aérien. La mise en place du programme SESAR doit permettre d'intégrer toutes ces évolutions dans les futurs systèmes de contrôle en Europe, et améliorer ainsi la capacité de l'espace et la sécurité des vols.

---

	1960	1970	1980	1990	2000	2005	20xx
En Route	STPV Traitement Plan de vol  Radar	Corrélation Identification	Coordination automatique  STCA filet anti- collision		ODS Poste de travail du contrôleur  APW- Alerte pénétration de zone		EFDP Nouveau traitement plan de vol
Approche			Gestion des vols SIGMA	MSAW Alerte terrain  AMAN Gestion des arrivées Maestro	STCA Filet de sauvegarde approche	DMAN Gestion des départs	
Tour			Radar sol	SMGCS Surveillance sol			A-SMGCS Surveillance, guidage
Bord		GPWS	FMS	TCAS - Système anticollision embarqué	E-GPWS	4D FMS	ADS-B- ASAS p1  ASAS Full-self separation
ATFM		Previ - Gestion nationale		Gestion des flux européens - CFMU		ATFM Gestion tactique des flux	MSP Multisecteur planning tactique ?
ASM					FUA Gestion flexible de l'espace		
Information					Sysco - Messages de coordination	CDM - Prise de décision collaborative	Info Aéronautique intégrée  SWIM Gestion globale de l'information
	Impact principal		Sécurité		Les deux : Sécurité Capacité Efficacité		Capacité efficacité

---

AMAN	Arrival Manager
APW	Area Proximity Warning
ASAS	Airborne Separation Assistance System
ASM	Air Space Management
ATFM	Air Traffic Flow Management
CDM	Collaborative Decision Making
CFMU	Central Flow Management Unit
DMAN	Departure Manager
EFDP	European Flight Data Processing
FMS	Flight Management System
FUA	Flexible Use of Airspace
(E)GPWS	(Enhanced)-Ground Proximity Warning System
MONA	Monitoring Aid
MSAW	Minimum Safe Altitude Warning
MSP	Multisector Planning
MTCU	Medium Term Conflict Detection
MTCR	Medium term Conflict Resolution
ODS	Operational Display System
SMGCS	Surface Monitoring, Guidance and Control System
STCA	Short Term Conflict Alert
STPV	Système Traitement Plan de Vol,
STR	Système de Traitement Radar
SWIM	System Wide Information Management
TCAS	Traffic alert and Collision Avoidance System

---