

- 15 -

La mémoire des opérateurs
dans la conduite des systèmes complexes
Le cas de l'ATC

ANAÈ
2.077

ACADÉMIE NATIONALE DE L'AIR ET DE L'ESPACE
Forum Homme/machine

La mémoire des opérateurs dans la conduite
de systèmes complexes
Le cas du contrôle de la circulation aérienne

Jacques VILLIERS
Ingénieur Général (H) de l'Aviation Civile
Membre de l'ANAÉ

Le cadre de la réflexion

Je n'aurais guère de compétence pour vous entretenir de la physiologie des organes sensoriels et cognitifs, ni des processus internes au cerveau qui sont mis en oeuvre pour répondre aux sollicitations dont ils sont l'objet pour permettre à un opérateur de gérer un système complexe.

Je ne m'intéresserai donc pas au fonctionnement physiologique de la mémoire, sur lequel notre forum a déjà eu le privilège de bénéficier de brillants exposés (sans compter celui qui suivra ma communication). Je considérerai donc tous ces processus cognitifs comme autant d'outils à la disposition du contrôleur.

Dans le cadre de la présente réflexion, cet ensemble cognitif sera simplement considéré comme un "outil" à la disposition de cet opérateur, un outil qui offre à son libre arbitre un ensemble de potentialités pour lui permettre résoudre les problèmes auxquels il est confronté à chaque instant.

La manière dont cet outil est effectivement utilisé en fonction des circonstances constitue un domaine assez largement indépendant de celui du fonctionnement interne spécifique de cet outil lui-même.

On peut toutefois raffiner l'approche en considérant, avec un certain arbitraire cependant, que cet outil est plutôt constitué par une panoplie d'outils inter-dépendants répartis entre les deux hémisphères cérébraux :

- un système de traitement analytique et notamment logico-mathématique
- un système de traitement analogique et synthétique
- un ensemble de mémoires à plus ou moins long terme et notamment une mémoire de travail où sont stockées des informations brutes ou pré-élaborées directement liées au problème à résoudre.

On complétera ces simplifications par quelques remarques :

- l'ensemble de cet outil est bien peu efficace pour traiter des problèmes exigeant des calculs précis (ni le cerveau ni les mémoires de travail ne permettent normalement d'effectuer de tête un multiplication de deux nombres ne comprenant même que deux chiffres¹) ou le long parcours d'arbres logiques compliqués
- en revanche le cerveau est beaucoup plus apte à reconnaître une situation complexe que le plus puissant des calculateurs
- devant des situations complexes (et chacun y est affronté en permanence, que ce soit pour traverser une rue ou pour conduire un véhicule) on recourt d'une manière aussi systématique que possible à l'élaboration de solutions heuristiques c'est à dire des solutions immédiatement imaginées dont on se contente de vérifier qu'elles résolvent suffisamment bien le problème auquel on est confronté ... quitte à y revenir plus tard lorsque la situation se sera précisée ou aura évolué.

Ces remarques amènent à mettre en lumière le rôle essentiel de la mémoire en tant que *relais cognitif*, utilisé à la fois pour enregistrer les éléments significatifs des expériences passées, et comme " mémoire de travail" pour mettre en attente tout ou partie de problèmes en cours ainsi que les informations pré-élaborées nécessaires pour les résoudre le moment venu. Elles montrent aussi l'arbitrage qui peut être effectué entre l'utilisation des capacités de traitement de l'information et le recours à des mémoires, étant évident que cet arbitrage devient essentiel lorsqu'il s'agit de gérer des ressources cognitives manifestement restreintes face à la demande.

Or, que sait-on effectivement de la manière dont on met en oeuvre effectivement dans chaque cas particulier cet ensemble de moyens à la fois extraordinairement plus puissants que le plus puissant des calculateurs et nonobstant toujours insuffisants? Pas grand chose a priori, si ce n'est que cet ensemble ne fonctionne certainement pas comme un calculateur numérique et n'est pas utilisé comme tel. Le

¹ C'est ainsi, par exemple, que sur une image radar, la connaissance de la position future d'un avion (multiplication d'une distance par un temps) ne peut résulter que d'une évaluation approximative au jugé

problème est particulièrement complexe pour résoudre des problèmes dans lesquels les deux hémisphères du cerveau sont sollicités simultanément (évaluations, calculs, intuition, comparaison avec des situations passées, recherche de solutions heuristiques, vérification, mémorisation ..).

La remarque de Mr Jourdain s'applique bien au delà du domaine de la seule prose : chacun met évidemment en oeuvre ces processus cognitifs ... sans savoir ce qu'ils sont, comment ils fonctionnent, ni comment il les utilise effectivement.

On notera aussi que la pratique de certaines tâches complexes nécessitent un *apprentissage*, souvent très long, pour permettre à un opérateur de mobiliser d'une manière très spécifique ses ressources cognitives et d'optimiser leur emploi, notamment sous la contrainte du temps, du risque et du stress.

On peut ainsi constater :

- qu'un opérateur entraîné peut traiter des problèmes qui resteraient strictement inaccessibles à toute personne même infiniment plus douée que lui-même, mais n'ayant pas subi un long entraînement spécifique préalable

- que, néanmoins, cet opérateur ignore comment il procède et se révèle incapable par lui-même d'explicitier aussi bien les processus qu'il met en oeuvre que leur enchaînement temporel.

L'ensemble de ces remarques préalables fait apparaître le rôle, ou plutôt les rôles essentiels, que joue la mémoire ; c'est ce qui m'a donné envie de procéder à une réflexion sur ce qu'une expérience pratique a permis d'apprendre à ce sujet.

Les conséquences de l'analyse d'apparence bien anodine à laquelle on vient de procéder sont considérables dès lors qu'on se propose de concevoir des outils informatiques ou automatiques susceptibles d'assister un opérateur fonctionnant en temps réel aux limites extrêmes de sa capacité cognitive, opérateur qui veut bien être assisté à la condition expresse que ses processus cognitifs ne soient en aucune manière dérangés ou perturbés.

Les problèmes soulevés sont d'une nature radicalement différente de celle qui serait rencontrée dans la conception a priori d'un système dont on se proposerait *ensuite* de former des opérateurs pour l'exploiter, et dont on essaie dès la conception de minimiser les problèmes d'adaptation et de formation de ses futurs opérateurs ; il s'agit ici dans ce dernier cas de l'ergonomie classique (ce qu'on désigne par l'interface homme/machine) qui consiste à

optimiser les relations de ses futurs opérateurs avec une machine conçue par ailleurs.

Je crois devoir rappeler aussi que toutes les tentatives pour automatiser les processus impliqués ont jusqu'à ce jour avorté (dès le stade de leur conception initiale) et que tous les systèmes qui se sont fixés pour objectifs d'aider les contrôleurs en leur proposant les résultats de tel ou tel processus partiel que l'ordinateur peut manifestement mieux traiter que le contrôleur lui-même, ont échoué en dépit des milliards de dollars dépensés ici et là en pure perte et notamment par les américains).

J'ai eu par le passé le plaisir d'apporter à notre Forum (et dans le cadre du 7ème Colloque sur la Sécurité Aérienne de l'ANAÉ) ma contribution sur ce dernier sujet¹ et de montrer la spécificité des problèmes soulevés par la conception de systèmes d'assistance à des opérateurs devant rester entièrement maîtres et responsables du traitement en temps réel de problèmes complexes et sur l'impérative nécessité avant tout début de conception d'un tel système de définir " qui assiste qui ?".

Je limiterai ma réflexion à ce que l'expérience a permis d'apprendre dans un domaine que j'ai fréquenté pendant plusieurs décennies : le contrôle de la circulation aérienne.

Il m'a semblé que beaucoup des enseignements retirés de ces travaux ne sont pas dépourvus de caractère général et peuvent intéresser d'autres systèmes complexes.

Il ne fallait guère être grand clerc pour pressentir qu'il ne serait pas possible de progresser dans l'assistance automatisée aux contrôleurs sans s'interroger au préalable et en profondeur sur la nature profonde de leur travail et sur l'enchaînement des processus cognitifs qu'ils mettent en oeuvre en temps réel sous forte contrainte temporelle et sécuritaires.

Comment espérer assister un "pro" dont on se sait incapable de faire le travail et qui lui-même ne sait pas comment il le fait?

C'est donc en toute humilité devant la complexité du problème que les concepteurs ont estimé strictement indispensable de s'attacher dès le début de leurs travaux le concours d'une équipe de psychologue à très haut niveau.

¹ "Le mur de l'automatisation" 29 janvier 1998. Voir aussi "Les facteurs humains et la sécurité du contrôle de la circulation aérienne : la réalité et ses paradoxes" J.Villiers , 7ème Colloque ANAÉ sur la sécurité aérienne (Mars 97)

On était en 1962. On doit cette collaboration à une rencontre quelque peu providentielle, de celles que l'on ne saurait pas provoquer intentionnellement a priori entre des hommes de bonne volonté appartenant à des mondes qui s'ignorent les uns les autres). Il se fait que l'école du Professeur Leplat, et notamment André Bisseret qui a conduit ensuite les travaux pendant de nombreuses années¹, s'intéressaient aux processus cognitifs ; au cours d'une conversation il est apparu à quel point une coopération pourrait être fructueuse pour les deux parties : pour l'ATC évidemment mais aussi pour offrir à ses chercheurs - en ce qui ne s'appelait pas encore la science de la cognition - la chance de pouvoir disposer d'une population nombreuse effectuant en temps réel un travail complexe aux objectifs parfaitement définis ; les contrôleurs se sont révélés immédiatement très ouverts à de telles investigations, voire enthousiastes dans la mesure où, de proche en proche, ils découvraient eux-mêmes ce qu'ils ignoraient de la manière intime dont ils accomplissaient leur tâche.

Dès la rédaction du premier plan de recherche en 1962, il a été convenu que les travaux seraient menés " *non pas en envisageant ce que le contrôleur "doit" faire mais plutôt en essayant de définir son activité effective* ". Il était aussi précisé que " *le contrôleur doit constituer mentalement un modèle de la situation et ce modèle doit être mémorisé puisqu'il n'est pas fixé sur un support perceptif*" et " *qu'on tenterait de déterminer* " *comment s'élabore ce modèle, comment évolue-t-il, quelles caractéristiques de la situation retient-il, quelle est la nature des relations qu'il établit avec les appareils* ".

Sur la base de ces travaux et sans entrer dans trop de détails, on peut dans le faible temps imparti donner quelques indications sur le rôle de la mémoire dans la conduite de ce système.

L'ATC, un système purement cognitif

Le contrôle de la circulation aérienne n'est qu'un système de traitement de l'information dont l'exercice ne met en oeuvre que des processus cognitifs.

Son seul "produit" est d'ordre décisionnel;

¹ André Bisseret a publié a publié une passionnante synthèse de ses travaux " *psychologie cognitive de la décision chez les aiguilleurs du ciel* " Editions OCTARES (1995)

Les enseignements qu'il apporte peuvent intéresser tout système de décision dans le domaine des systèmes techniques aussi bien que dans ceux du management .

La mémoire, les mémoires

La mémoire entre en jeu à de très nombreux niveaux :

- Le professionnalisme acquis :
 - les connaissances générales
 - les connaissances spécifiques à ce métier
 - les procédures et modes opératoires
 - le retour d'expérience collective et personnelle
 - soit en un mot : le "savoir-faire"
- Les mémoires de travail :
 - informations brutes, informations filtrées,
 - informations élaborées
 - résultats intermédiaires
- La "mémoire opérationnelle " :
 - représentation générale de la situation,
 - stratégie choisie,
 - problèmes en cours

Un système aux limites des potentialités cognitives

La capacité du contrôle en route (qui ne doit pas être confondu avec le contrôle d'approche et d'aérodrome conduit dans le s"tours de contrôles " des aéroports) est limitée par les capacités cognitives de l'équipe ayant la responsabilité du volume d'espace qui lui est confié.

Le nombre d'avions qui peut y être accepté simultanément dépend de la complexité de l'espace considéré ; il est de l'ordre de 15 avions.

C'est cette contrainte qui conduit à segmenter l'espace en secteurs (en France : 5 centres, 80 secteurs).

Information disponible, information utilisable

L'information exogène disponible provient des plans de vol et du Radar ; ces informations sont acquises automatiquement par des ordinateurs qui assurent la corrélation entre elles ainsi que leur

affichage au moment opportun et sous la forme la plus adaptée au travail des contrôleurs.

Ces informations, notamment sur les situations futures, sont floues et incomplètes .

La quantité d'information que les contrôleurs de leur côté peuvent prendre en considération à un moment donné est d'ailleurs limitée par leur propre capacité :

- perceptive
- cognitive
- et de mémorisation

Les contrôleurs sont ainsi amenés à "normaliser" la situation en allouant par exemple aux avions des vitesses et des taux de montée et de descente standard et de "surveiller" en permanence l'évolution de la situation pour détecter tout écart intempestif éventuel.

L'objet de la connaissance

L'objet de la connaissance n'est pas

- l'avion isolé mais les paires d'avion¹
- le moment présent mais le futur à divers horizons
- les seuls conflits potentiel mais aussi les conflits induits par les manoeuvres d'évitement

La situation est constamment évolutive et instable :

- avions entrants
- demandes des pilotes en temps réel
- impact des évitements
- comportements déviants des avions

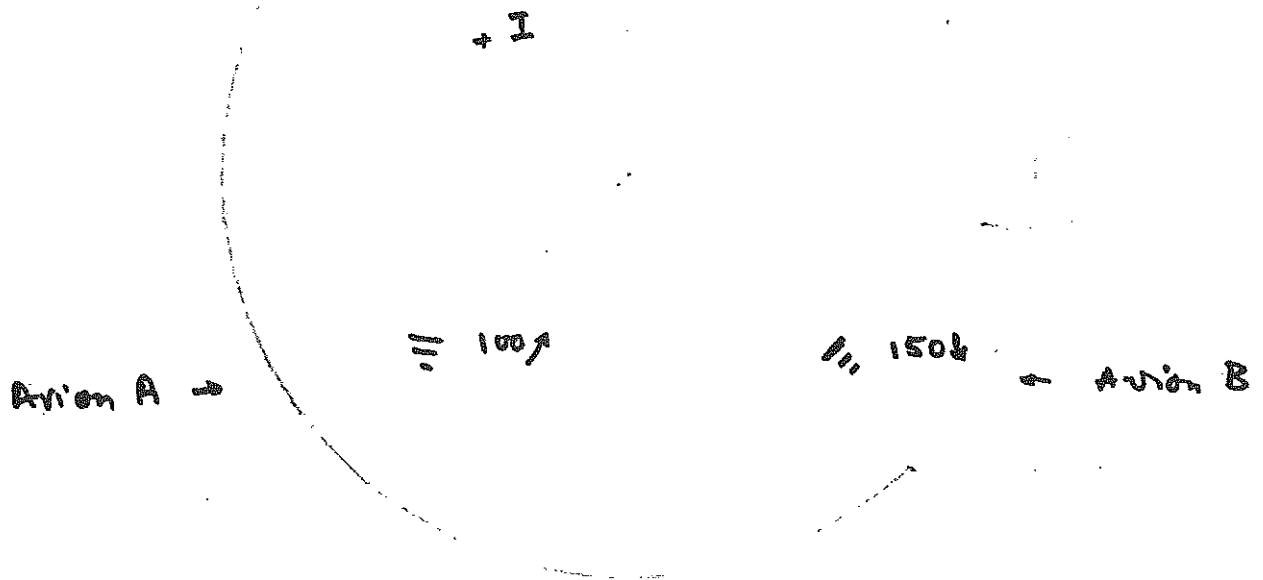
Les contrôleurs doivent filtrer l'information nécessaire à chaque instant et "construire" et agréger l'information signifiante.

Tel est le cas de l'information Radar qui présente une situation actuelle ; la figure ci-dessous fait toucher du doigt le délicat exercice qui permet par exemple de déterminer si deux avions seront ou ne seront pas en conflit au point de croisement de leurs trajectoires (voir la figure 1).

¹ Soit dans le cas de 15 avions, 105 combinaisons possibles

POSITIONS ACTUELLES / POSITIONS FUTURES

LE RADAR



A est en montée
B est en descente
B est plus rapide que A

QUESTION : A et B seront-ils séparés d'au moins 5 miles ou
1.000 pieds en I ?

Figure 1

ELABORATION D'UNE INFORMATION SIGNIFIANTE

Support de l'information, support de la mémoire

Les deux supports matériels de l'information sont respectivement :

- Une image analogique de la situation actuelle : le Radar
- Un ensemble de bandes de progression ("strips") sur support papier figurant le vol de chaque avion et notamment les heures et les niveaux de passage estimés sur des points particuliers

ainsi que les autorisations successives inscrites par les contrôleurs eux-mêmes (figure 2).

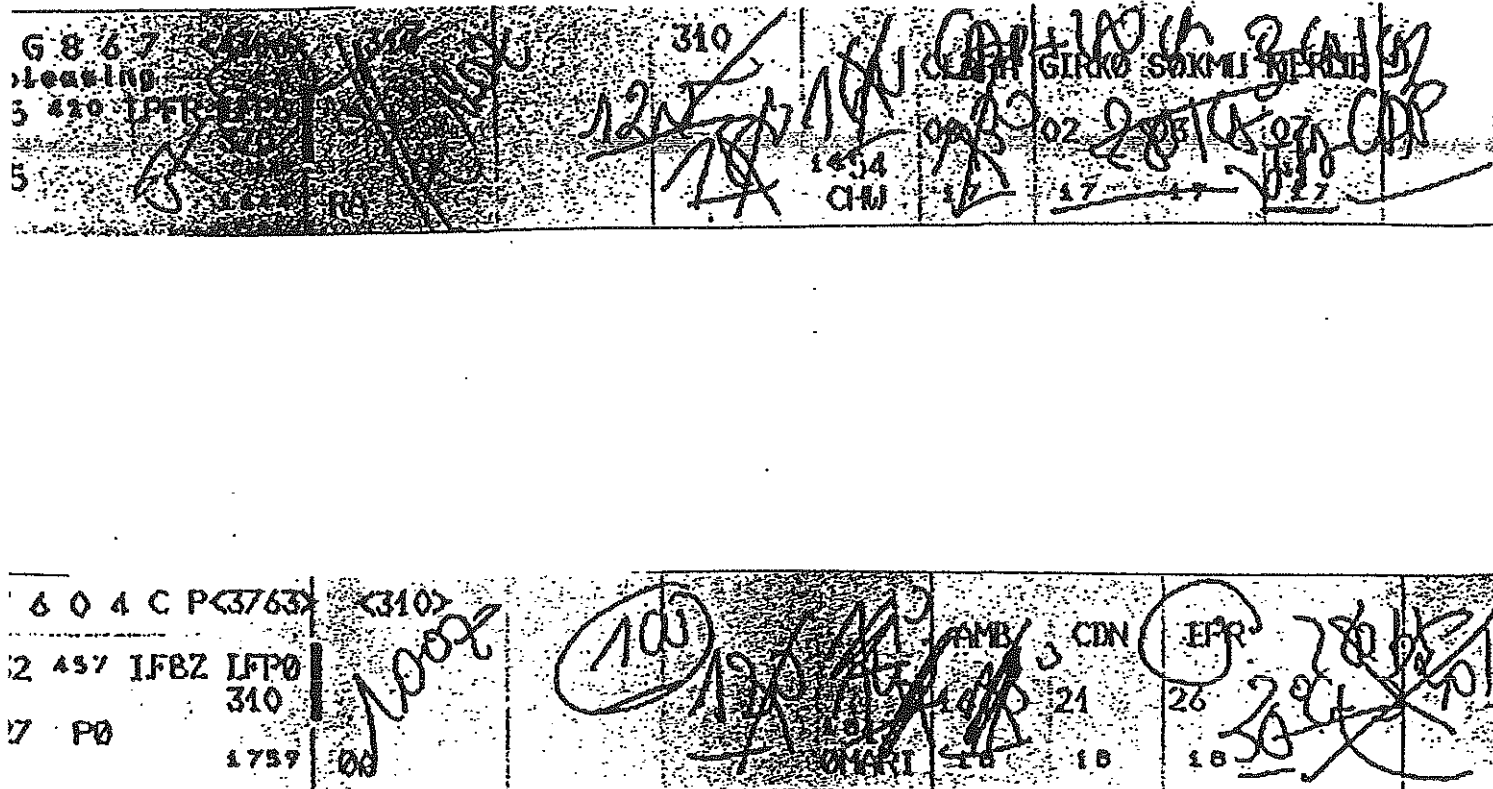


Figure 2

Le "strip" et les autorisations successives manuscrites

Les conflits potentiels et l'ensemble des informations pertinentes nécessaires pour les résoudre le moment venu ne sont mémorisés que dans la mémoire du contrôleur, qui ne dispose pas de support spécifique pour en assurer la pérennité.

Comme toute mémoire humaine, celle du contrôleur est vulnérable.

Stratégie, tactique et action

La situation en permanente évolution est à l'image d'un "paysage" dont les détails se précisent progressivement au fur et à mesure qu'on s'en approche.

Les décisions ne sont prises qu'au moment jugé le plus opportun :

- en raison du caractère incomplet, flou et évolutif de l'information
- pour ne pas indûment perturber les vols
- pour lisser dans le temps la charge de travail du contrôleur

Gérer l'espace sous contraintes temporelles et prudentielles fortes :

- c'est gérer :
 - la capacité cognitive disponible
 - la capacité de mémorisation
 - l'entretien et la remise à jour des informations mémorisées
 - la recherche des informations complémentaires à celles qui sont mémorisées.

- c'est aussi faire en permanence les arbitrages et les compromis indispensables entre la capacité de mémoire, le temps d'accès à l'information brute, la capacité d'élaboration de l'information signifiante

- C'est surtout s'assurer qu'à aucun moment futur la capacité cognitive ne sera dépassée.

La recherche : ATC et cognition

L'expérimentation est rendue difficile en raison de l'absence de comportements visibles et de savoir-faire explicables.

Il faut donc créer des "faits" observables, descriptibles et quantifiables.

Il n'est pas possible dans le temps imparti de rendre compte de toutes les méthodes employées pour permettre l'accès aux processus effectifs du travail cognitif du contrôleur et à l'organisation de sa mémoire (contenu, structure, entretien, recherches des informations manquante).

Ces expérimentations ont porté d'une part sur les processus logico-mathématiques basés sur l'utilisation des "strips" et notamment sur les "arbres logiques" tels qu'ils sont effectivement construits par les contrôleurs.

D'autre part le mode d'utilisation de l'information Radar a fait l'objet d'investigations approfondies. Des différences considérables ont notamment été constatées entre les "pro" et les novices. Ces derniers ont tendance à rechercher la précision dans les estimations

alors que les "pro" apprennent à économiser leur potentiel cognitif et travaillent sur des estimations révisables et construisent leur mémoire en conséquence ; ils ne recourent à toute la précision de la position Radar qu'au moment de décisions finales et de manoeuvres d'évitement.

Ces recherches expérimentales ont révélé le caractère indissociable de la recherche des conflits par le contrôleur lui-même, de l'élaboration de sa stratégie et des décisions finales qu'il est amené à prendre de proche en proche

La capacité et la vulnérabilité de la mémoire humaine, notamment de la mémoire à court terme (mémoire des conflits potentiels, des coordinations à effectuer ..) et le degré de sécurité recherché limitent la capacité de trafic d'un secteur de contrôle .

Cognition et formation

Les grands progrès ainsi accomplis dans la connaissance du métier du contrôleur ont permis d'envisager le recours à l'enseignement programmé pour participer activement à la formation initiale.

Plusieurs sous-programmes ont ainsi été élaborés pour les différentes classes de connaissances impliquées (règle de l'air, procédures, structure de l'espace, performances des avions ...). Les résultats se sont révélés très positifs sauf que, en présence d'une situation complexe exigeant la mobilisation simultanée de toutes ces connaissances, les débutants se trouvaient désarmés.

Le problème a été repensé et une méthode originale (MICUP) a été imaginée pour pallier les inconvénients de cet "enseignement en miettes". Au lieu des différentes parties indépendantes, un processus a été conçu pour que toutes les branches de connaissances soient acquises simultanément dans une progression continue mettant toujours chaque problème dans le contexte d'une situation comprenant toutes les composantes de la réalité. Les résultats ont été si positifs que cette méthode constitue la base de l'enseignement initial à l'ENAC (Ecole Nationale de l'Aviation Civile) et a été largement diffusée à l'étranger grâce à l'intérêt que lui a reconnu l'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale).

Cette méthode a le mérite particulier, non pas de rendre plus rapide la formation des meilleurs élèves mais de rendre beaucoup plus uniforme le rythme de progression de tous, sans laisser les moins doués à la traîne.

Vers le futur

Les recherches et expérimentation dont on a très brièvement rendu compte ci-dessus ont permis de penser le futur sur une base solide.

Jusqu'au stade actuel, l'ordinateur est omniprésent pour le traitement de l'information de base mais n'est nullement impliqué dans les processus cognitifs du contrôleur.

La question posée était simple : comment faire bénéficier ces processus cognitifs des contrôleurs de l'assistance de l'ordinateur?

Des principes très stricts doivent être respectés pour que le l'ordinateur puissent assister le contrôleur sans perturber la marche de son esprit (ou le fil de sa pensée) et communiquer effectivement avec lui.

On sait par ailleurs que pour bien communiquer deux interlocuteurs doivent avoir le maximum de connaissances communes et en particulier s'appuyer sur les mêmes sources d'information.

Sans entrer dans les détails on comprendra que l'ordinateur doit être un assistant ou un superviseur :

- modeste
- discret
- non rival
- serviable
- tolérant

A cette fin, il importe que :

- le "regard" de l'ordinateur sur le trafic soit identique à celui du contrôleur, c'est à dire qu'il utilise les mêmes informations floues et incomplètes
- la "mémoire opérationnelle" de l'ordinateur doit être conçue à l'image aussi fidèle que possible de celle que se construit et entretient le contrôleur
- ces deux conditions sont impératives pour permettre la communication effective entre le contrôleur et l'ordinateur
- le contrôleur ne soit amené à introduire une information dans l'ordinateur que dans la mesure où il est assuré de recevoir un retour gratifiant compensant et au delà la charge induite et la perturbation que cela comporte pour lui

La pièce maîtresse du projet ERATO¹ construit sur ces bases est la visualisation automatique d'une information pertinente portant sur les conflits potentiels et organisée en fonction de leur moment d'occurrence. Les contrôleurs disposeront ainsi pour la première fois:

- d'un support physique de leur propre mémoire
- d'une aide à la gestion de leur temps
- d'alarmes en cas d'oublis
- d'un dispositif commun aux deux contrôleurs de l'équipe facilitant la coordination et la communication entre eux

Des expérimentations intensives tout à fait encourageantes ont été effectuées sur trafic simulé par de très nombreuses équipes de contrôleurs français et étrangers.

Il en ressort que les contrôleurs se trouvent placés dans un environnement très sécurisant très prometteur d'une sécurité accrue et donc d'une capacité supérieure de l'espace .

L'objectif est désormais de durcir et sécuriser les programmes des ordinateurs pour pouvoir procéder aux expérimentations sur trafic réel.

Lorsque ce projet sera opérationnel, on pourra l'enrichir de nombreux perfectionnements rendus possibles par l'emploi de liaisons codées air:sol et de connexion automatique des ordinateurs au sol et des ordinateurs embarqués.

Ce projet semble constituer un point de passage obligé avant de pouvoir bénéficier de ces perfectionnements et des automatismes qui pourront effectivement servir l'homme sans perturber son travail en temps réel et sans attenter à l'exercice de sa propre responsabilité ultime .

¹ Voir "ERATO, une aide au contrôle aérien " marcel LEROUX (CENA), étude présentée dans le dossier de la direction Générale de l'Aviation Civile lors de l'inauguration à Brest des nouveaux écrans de visualisation (1999)

