

-3-

**" L'automatisation de l'exploitation: l'exemple du contrôle de la  
circulation aérienne"**

**Bulletin du PCM 1967**



## VI - L'automatisation de l'exploitation: l'exemple du contrôle de la circulation aérienne

Le besoin du contrôle de la circulation aérienne s'est fait sentir parce que les pilotes ne peuvent assurer par eux-mêmes la prévention des abordages entre avions (visibilité réduite, vitesses relatives très grandes, navigation dans un espace à 3 dimensions) ni organiser l'écoulement optimum du trafic là où il existe des limitations dues à la capacité des pistes ou de l'espace.

L'objectif du système de contrôle de la circulation aérienne est de subvenir à ces fonctions de sécurité et d'efficacité. A cette fin le contrôleur de la circulation aérienne dispose de *données* sur la position actuelle et future des avions. Ces informations proviennent de plusieurs sources :

- le plan de vol déposé par le pilote avant son départ et transmis par télétype à tous les centres intéressés par le vol. Ce plan de vol comprend les informations sur le vol et sur les intentions du pilote (type et équipement de l'avion, route, etc...).
- les « reports de position » effectués par les pilotes aux passages par des points ou des niveaux spécifiés et transmis au sol sur la voie radiotéléphonique bitérale qui relie en permanence un contrôleur et l'ensemble des avions dont il assume à un moment donné le guidage.
- le radar. Le radar primaire donne au contrôleur la position actuelle des avions, sans toutefois indiquer l'identité ou le niveau de l'avion qui a engendré chaque écho par réflexion purement passive des ondes incidentes. Grâce à l'émission active d'une réponse codée aux interrogations du radar secondaire, on obtiendra une certaine « personnalisation » des échos.

Les *règles* concernant l'exercice du contrôle de la circulation aérienne résultent de règlements internationaux (OACI) complétés par des règlements nationaux et des procédures particulières.

D'une manière générale le pilote est autorisé, de proche en proche, à poursuivre son vol jusqu'à un point ou un niveau spécifié dans des conditions qui lui ont été données par le contrôleur en fonction de ses désirs et compte tenu du reste du trafic. A l'expiration de cette autorisation limitée ou lorsque l'évolution de la situation générale l'exige, le contrôleur doit élaborer ses *décisions* et notifier en conséquence au pilote les nouvelles conditions dans lesquelles il est habilité à poursuivre son vol. La validité des autorisations peut varier d'une dizaine de minutes à quelques minutes ou moins.

## CARACTÈRES SPÉCIFIQUES DU CONTRÔLE

Sans entrer plus profondément dans les mécanismes complexes du contrôle de la circulation aérienne, le caractère très spécifique des décisions qu'il implique apparaissent immédiatement.

D'une part la durée acceptable entre l'apparition d'un fait nouveau générateur d'une décision à prendre et l'application de la décision est très faible. Par exemple lorsqu'un pilote fait connaître par radiotéléphonie qu'il vient de survoler un point de report (balise par exemple), la nouvelle autorisation pour le segment suivant de son vol doit lui être donnée par le contrôleur immédiatement, c'est-à-dire que le contrôleur analyse la situation et élabore sa décision, en même temps qu'il prend connaissance des informations transmises par le pilote. On dit qu'il s'agit d'un problème « en temps réel ».

D'autre part les faits nouveaux générateurs de prise de décision sont très fréquents et se présentent en ordre aléatoire. A titre d'illustration, la voie radio-téléphonique reliant chaque contrôleur aux seuls avions dont il a la charge est occupée aux heures de pointe d'une manière presque continue et constitue un des goulots d'étranglement du système. A la complexité s'ajoute donc l'ampleur de la tâche. En effet, un Centre de Contrôle comme celui de la Région Nord couvrant la moitié Nord de la France acheminera quelque 2.000 avions par jour en 1967, chacun des 17 secteurs de contrôle entre lesquels cet espace est divisé pouvant être survolé simultanément par 15 à 20 avions.

Enfin chacune des décisions prises par un contrôleur peut présenter des conséquences considérables sur la sécurité (en raison du nombre de vies humaines impliquées) et sur l'économie du transport aérien (chaque minute de vol d'un long courrier coûte 200 F. ; la pénalisation générale apportée au transport aérien par les contraintes résultant du contrôle de la circulation aérienne est estimée à plusieurs dizaines de millions de dollars par an pour les Etats-Unis seulement).

La décision dans le cadre de contrôle de la circulation aérienne présente donc trois caractéristiques rarement rencontrées simultanément, à savoir : temps réel, cadence élevée, conséquences considérables.

Pour mieux illustrer la nature des tâches de décision impliquées, le lecteur se reportera à un exemple de problèmes typiques qu'affrontent d'une manière quasi continue les contrôleurs. Pour ce faire on a représenté (fig. 1) les deux « tableaux de bord » d'un contrôleur, à savoir :

- le tableau de prévision ou chaque bande représente le vol d'un avion dans le secteur considéré,
- le réseau des routes aériennes dans le secteur considéré.

## LES PROBLÈMES DE LA COLLABORATION HOMME-MACHINE

Au fur et à mesure de l'augmentation du trafic (+ 20% pour les jours de pointe en 1966) il devient nécessaire de procéder à une division de plus en plus poussée du travail. Cette division peut s'effectuer soit en diminuant le volume de chaque secteur de contrôle, soit en répartissant dans chaque secteur les tâches par nature spécifique (information, classement, coordination, contrôle, etc...).

Il est classique cependant de constater que le bénéfice de cet émiettement du travail est loin d'être proportionnel à son degré de morcellement ; en effet, pour chaque participant, la résolution de problèmes, mêmes partiels, implique la prise

Identité	Type	Niveau (en milliers de pieds)		Heure prévue de passage sur la balise				Origine	Destination	Vitesse
80451 LEMO - EDAA	F100 460	370	370	10 <sup>41</sup> PBZ	10 <sup>26</sup> CNT			10 <sup>04</sup> CTX	UE	
CAN 197 EDAM - LIRP	T33 380	330	330	10 <sup>11</sup> STR	10 <sup>20</sup> LUL	10 <sup>30</sup> DIJ		10 <sup>45</sup> LYN	UE	
GASJJ LIMC - EGKK	B111 400	310	310		10 <sup>28</sup> RLP			10 <sup>16</sup> GLA	UE	
AZ 288 LIMM - EGLL	CARA 440	280	280		10 <sup>27</sup> RLP			10 <sup>15</sup> GLA	UE	
70457 LFOU - LFQC	T33 400	280	280		10 <sup>40</sup> CNT			10 <sup>15</sup> CTX	UE	
CAN 626 EDAM - LIED	T33 390	270	270		10 <sup>15</sup> STR	10 <sup>26</sup> LUL	10 <sup>25</sup> DIJ		LYN UE	
AZ 375 LIRF - EBBR	CARA 440	270	270	10 <sup>28</sup> LXU				10 <sup>12</sup> LUL	10 <sup>01</sup> GLA UE	

Fig. 1. — Exemple de problème simple (tous les avions en palier, sauf 1)

1.A) — Situation à 10 h. 20 dans un secteur (Sud-Est de la Région Nord)

Il n'y a que 7 avions dans le secteur (en pointe 15 à 18)

Le CAN 626 demande à monter au niveau 330 (33.000 pieds)

Le Contrôleur donne-t-il l'autorisation, compte tenu de la séparation de 10 minutes ou de 1.000 pieds nécessaire entre avions ?

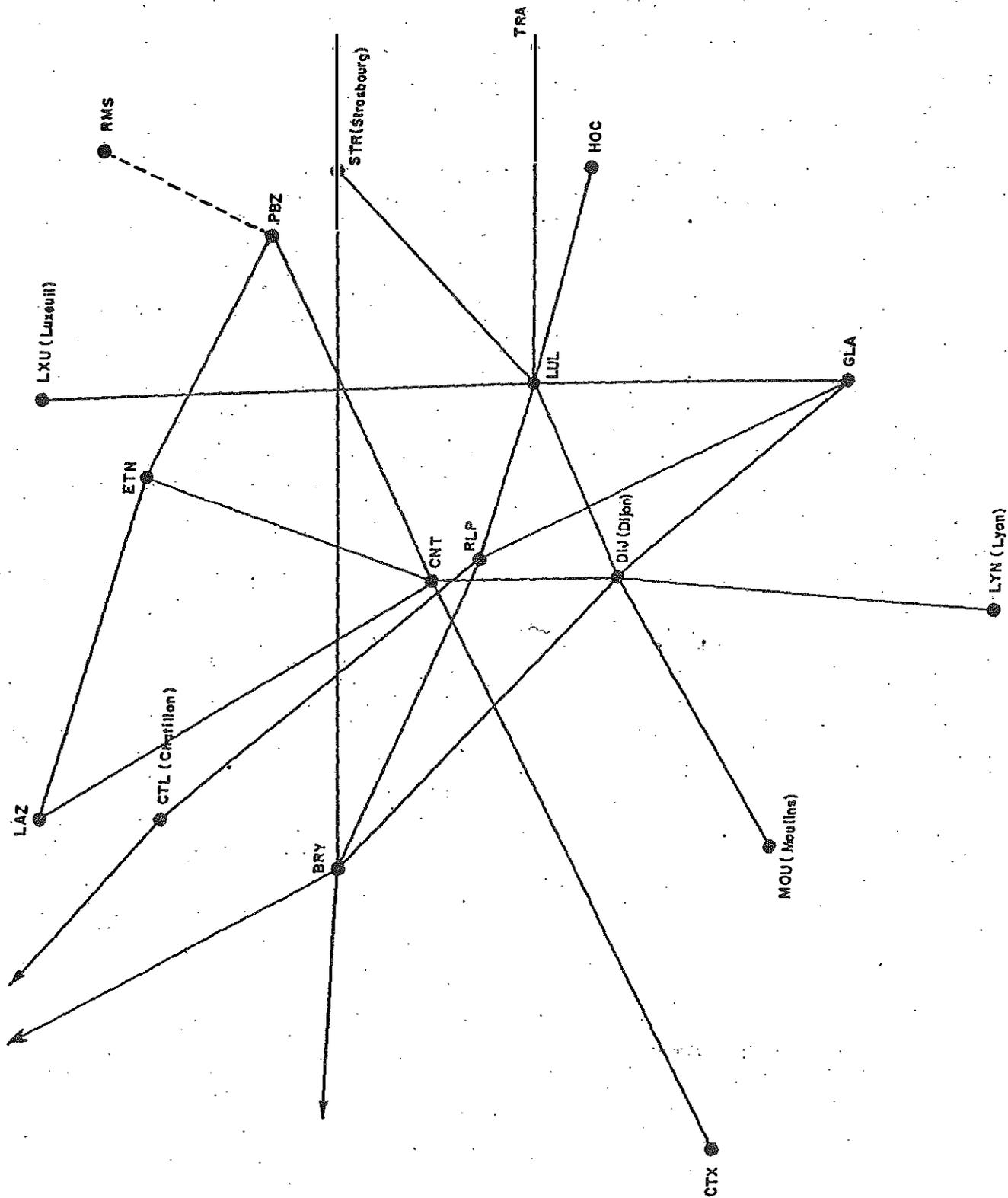


Fig. 1 - 1.B)

en considération d'informations dont il ne dispose plus directement. L'accroissement rapide des tâches découlant de la dispersion de l'information réduit l'apport effectif de chacun à la tâche collective de traitement des informations et amorce une *réaction en chaîne* de division toujours plus poussée du travail.

*Il en résulte qu'au-delà d'une certaine densité de trafic, le temps imparti au traitement de l'information devient trop faible pour qu'il puisse être tiré parti de toutes les données disponibles dans le système.* Dans bien des cas la saturation apparente de l'espace n'est qu'une conséquence indirecte de ce dernier phénomène.

L'automatisation offre potentiellement des solutions pour sortir de cette impasse. Les calculateurs modernes n'ont-ils pas une puissance de traitement de l'information quasi-illimitée et ne sont-ils pas capables, en conséquence, de suppléer à la capacité restreinte de traitement de l'information résultant de la mise en commun mal ordonnée de l'activité intellectuelle d'une collectivité de contrôleurs ?

Le problème n'est malheureusement pas plus simple que celui qui consisterait à tenter d'accélérer la progression trop lente d'un marcheur en terrain accidenté au moyen d'une voiture de compétition. Le marcheur et le bolide présentent chacun leur supériorité partielle et il est bien difficile de les associer en toutes circonstances. La machine peut rendre de précieux services sur les routes, mais peut se révéler si encombrante en tout terrain qu'elle constitue alors une charge telle qu'il vaut mieux renoncer à son utilisation.

Le contrôle de la circulation aérienne constitue bien ce terrain accidenté dans lequel il est difficile de faire partager en temps réel à l'homme et à la machine des tâches multiples et imbriquées. Tant que l'homme n'aura pas été éliminé du dispositif, le Système automatisé constituera un *système* hybride dans lequel l'homme au plus haut degré de sa compétence et de son activité intellectuelle est destiné à partager l'acquisition et le traitement de l'information en temps réel avec un calculateur.

Un tel système présente donc en ce sens, par rapport à d'autres systèmes de traitement de l'information en temps réel une nouvelle originalité marquée et pose des problèmes d'une rare complexité.

C'est essentiellement pour cette raison que l'automatisation n'a pas encore obtenu dans ce domaine des succès aussi spectaculaires qu'e dans d'autres applications.

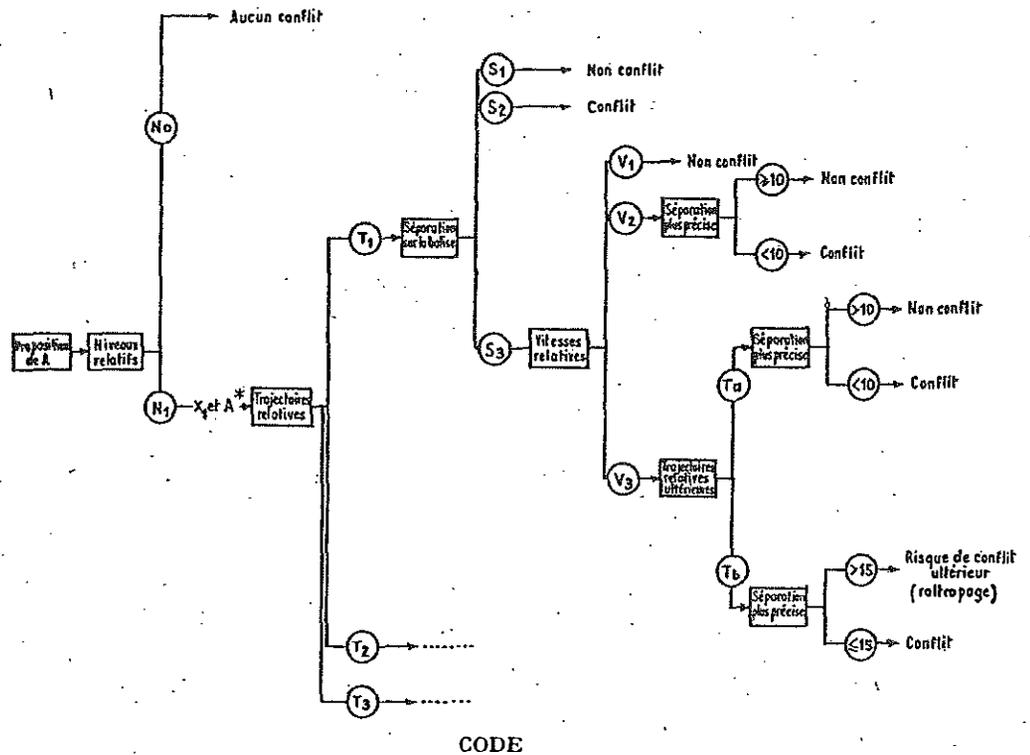
L'analyse montre en effet qu'il n'existe pas de ligne de partage simple entre la part de traitement de l'information qui peut être effectuée utilement par le calculateur et celle qui, à un stade donné d'automatisation, ne peut être dévolue qu'à l'homme.

L'étude de l'automatisation est donc inséparable de l'analyse profonde et méticuleuse de la nature fondamentale de chacune des tâches exercées par les contrôleurs et du processus d'élaboration des décisions (voir fig. 2).

Les problèmes soulevés à chaque étape relèvent donc essentiellement des sciences humaines. Cette conception est à la base des travaux effectués en France dans ce domaine, travaux auxquels contrôleurs, ingénieurs et spécialistes des problèmes psychotechniques du travail ont été associés en franche, complète et fructueuse coopération.

Le but poursuivi étant de réduire la tâche globale dévolue à l'homme dans le système, on a recherché et analysé toutes les tâches partielles que le calculateur pouvait effectuer.

INFORMATION CHEZ LE CONTRÔLEUR DE LA NAVIGATION AÉRIENNE



CODE

- N<sub>0</sub> Aucun avion au même niveau que A.
- N<sub>1</sub> 1 ou plusieurs (x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub>, x<sub>3</sub>, x<sub>n</sub>) avions au même niveau que A.
- T<sub>1</sub> X<sub>1</sub> se dirige vers la même balise que A mais sur une route différente.
- T<sub>2</sub> X<sub>1</sub> se dirige vers une balise différente.
- T<sub>3</sub> X<sub>1</sub> est sur la même route que A et se dirige vers la même balise.
- S<sub>1</sub> nette séparation (> 20').
- S<sub>2</sub> séparation nettement insuffisante (< 5').
- S<sub>3</sub> séparation aux environs de 10'.
- V<sub>1</sub> Le plus vite devant.
- V<sub>2</sub> vitesse égale.
- V<sub>3</sub> le plus vite derrière.
- T<sub>a</sub> les 2 avions divergent après le croisement à la balise.
- T<sub>b</sub> les 2 avions suivent la même route après la balise.

(\*) Lorsqu'il n'y a pas de conflit avec X<sub>1</sub>, on recommence le processus avec un autre appareil présent dans le secteur, X<sub>2</sub> et ainsi de suite jusqu'à ce que tous les appareils au même niveau que A aient été examinés.

Figure 2 - Organigramme de la décision  
(d'après J. Leplat et A. Bissert)

Il est rapidement apparu qu'il existe très peu de tâches que le calculateur puisse effectuer au profit du Système sans recourir au moins partiellement à l'initiative ou à l'assistance des contrôleurs.

On se heurte, en particulier à la première évidence suivante : le calculateur ne peut pas créer l'information de base et il existe des sources d'informations auxquelles il ne peut pas avoir accès sans la participation des contrôleurs (report de positions des avions en radiotéléphonie, autorisations accordées, etc...).

La deuxième évidence apparaît moins directement mais ses conséquences n'en sont pas moindres. Si l'on maintient des maillons humains dans le Système, et que l'on ne procède pas directement à l'automatisation complète, c'est que l'on estime que la souplesse d'adaptation du contrôleur est irremplaçable actuellement pour faire face à une grande variété de situations à caractère peu prévisible.

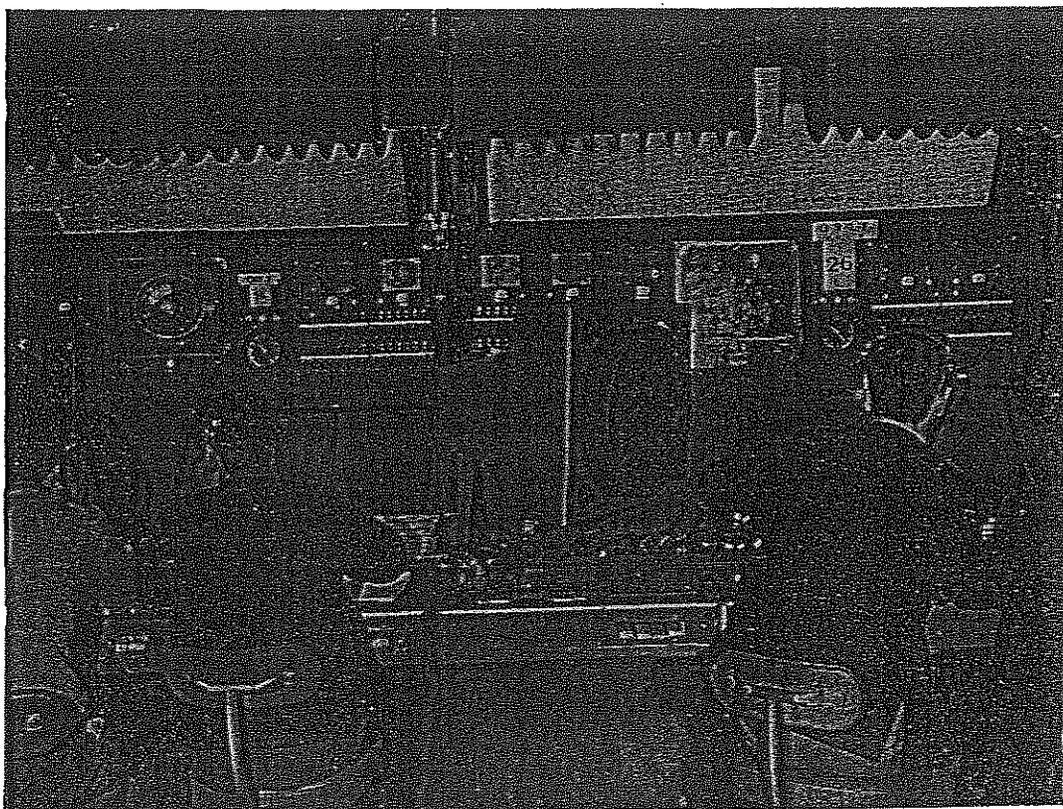
Or précisément si le contrôleur s'adapte rapidement à des situations évolutives il est difficile de le faire assister par un calculateur qui ne présente pas la même souplesse.

Qui plus est, le contrôleur est doté de libre arbitre, dans la manière d'aborder chaque problème particulier et dans le choix du moment opportun pour le traiter de sorte qu'il serait contradictoire d'espérer que le calculateur puisse sans le concours du contrôleur lui fournir à chaque instant sous la forme la plus appropriée toutes les informations dont il a besoin et seulement celles-ci. Ecraser le contrôleur sous un flot incontrôlé d'informations ne constituerait aucunement une solution rentable.

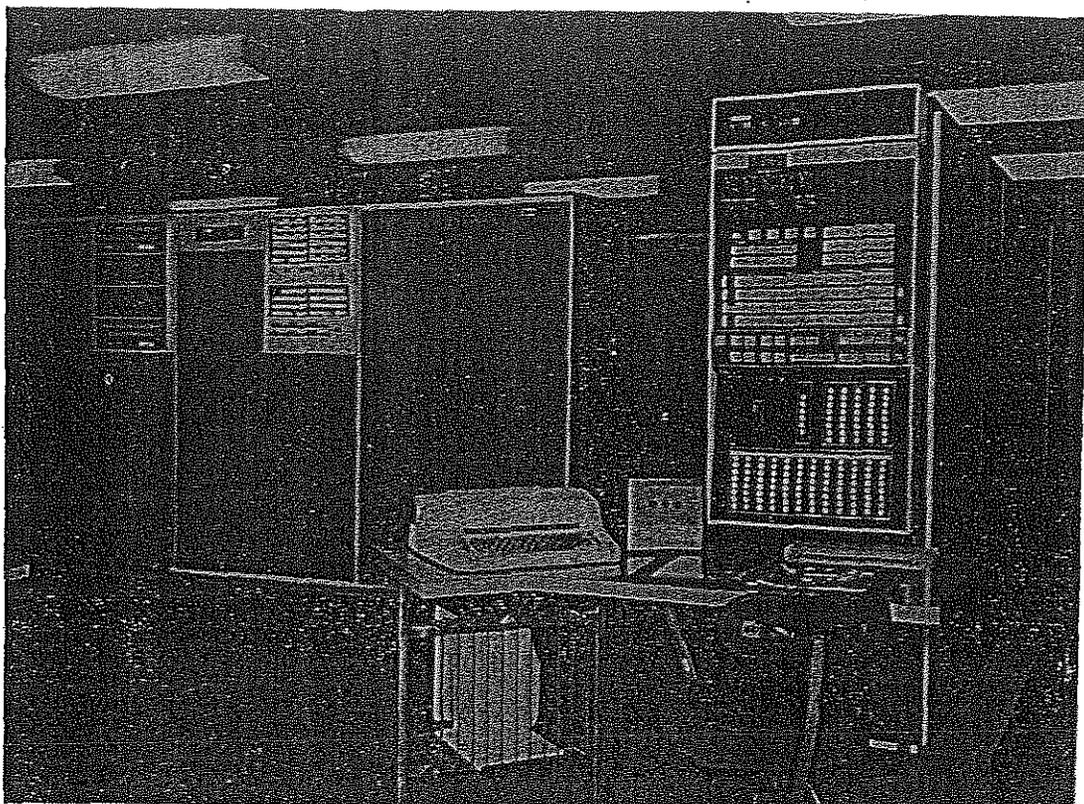
Il résulte de ces deux évidences que si l'automatisation offre des possibilités de réduction de la tâche globale des contrôleurs par rapport au système manuel, elle ne peut manquer de donner naissance à une nouvelle catégorie de tâche supplémentaires, inconnues dans le système manuel et que nous avons appelées les « tâches induites ».

Le bénéfice réel de l'automatisation se chiffre donc par la différence entre les tâches économisées et les tâches induites.

L'importance donnée à ces préoccupations constitue sans doute une des caractéristiques les plus marquantes des travaux effectués en France dans ce domaine.



(Cliché publié avec l'aimable autorisation du S.T.B.A.)



*(Cliché publié avec l'aimable autorisation du S.T.B.A.)*

Un premier ordinateur a été loué dès 1962 et installé dans le Centre de Contrôle Régional Nord. Il a permis de procéder à des premières expérimentations et a débouché sur la mise en service d'une première phase d'automatisation : le calcul automatique des Plans de vol et la préparation des éléments du tableau de prévisions (bandes de progression). Des expérimentations complémentaires ont permis de préparer une deuxième phase d'automatisation qui entrera en service opérationnel en 1967. De nouveaux ordinateurs ont été loués à cet effet et des matériels périphériques spécialisés ont été développés et leur ont été connectés. Cette deuxième phase se caractérise par :

- La transformation des signaux du radar en une succession de messages codés sous forme numérique pouvant ainsi être traités par un ordinateur,
- le traitement automatique de l'information délivrée par le radar secondaire (identification et poursuite des échos, corrélation avec les plans de vol),
- l'accès direct des contrôleurs au ordinateur par des claviers et des dispositifs spéciaux et inversement la possibilité pour le ordinateur d'adresser des messages à chacun des contrôleurs sur des visualisateurs cathodiques.

Le ordinateur participera ainsi à la présentation, l'intégration et la diffusion de l'information au sein du Centre. Il supervisera les coordinations intercontrôleurs. Dans une phase ultérieure, il est prévu de faire prendre au ordinateur une part de plus en plus active à l'élaboration des décisions.

Il n'est malheureusement pas possible dans le cadre du présent article d'entrer dans le détail des options qui ont été retenues.

Le lecteur se doute que pour procéder à l'automatisation d'un système aussi original, il convient de faire appel à des calculateurs à hautes performances dotés de nombreuses entrées/sorties. Les moyens d'échange d'information entre le calculateur et les contrôleurs doivent être particulièrement étudiés pour que leur emploi ne constitue pas une servitude pour ceux dont on cherche justement à limiter la tâche. Les matériels spéciaux ainsi étudiés et mis en place comprennent notamment :

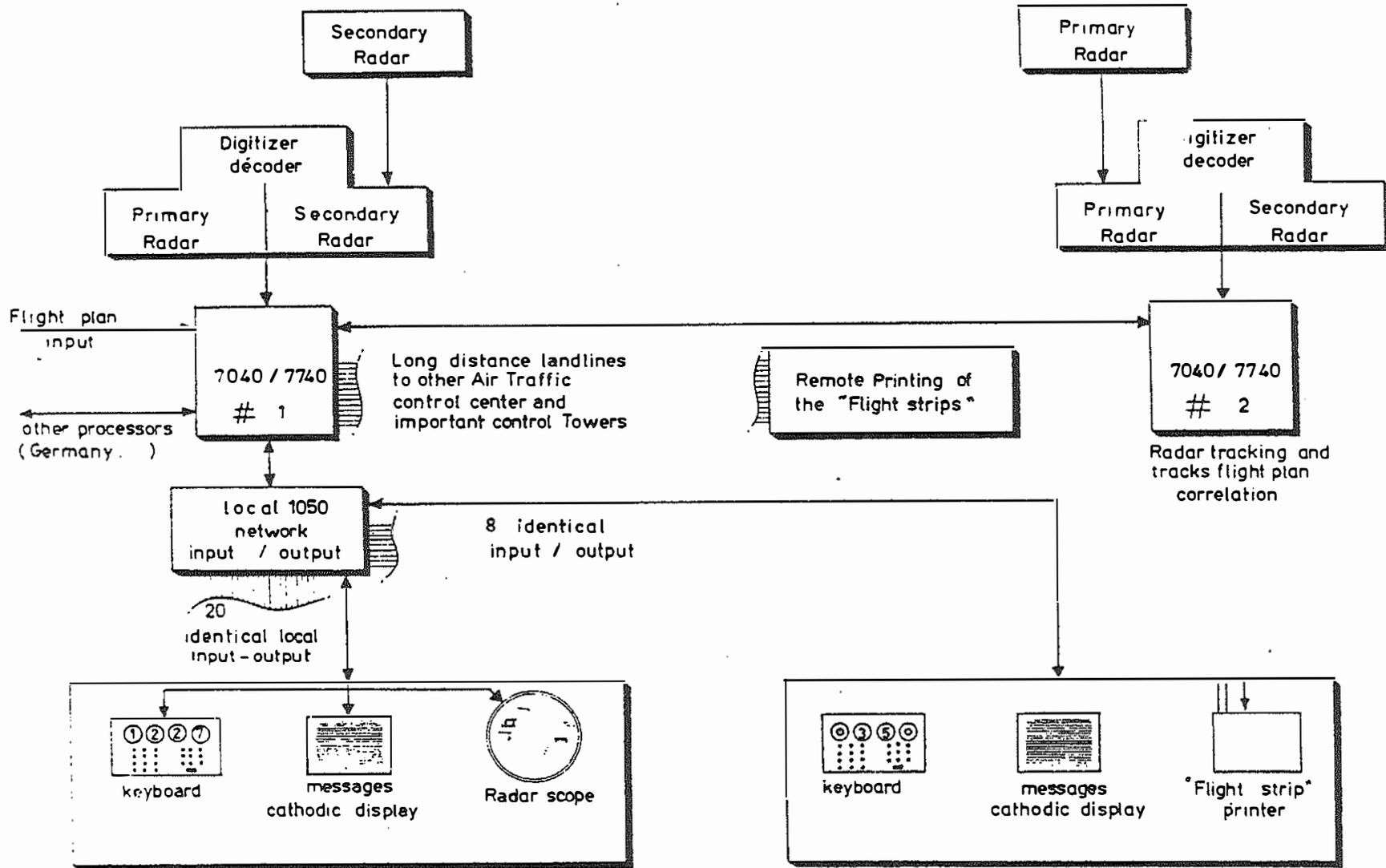
- des claviers spéciaux pour les contrôleurs
- des tubes cathodiques sur lesquels le calculateur adresse sélectivement des messages aux contrôleurs
- des « décodeurs-générateurs de caractères » permettant au calculateur d'interrompre le balayage des écrans du radar pour afficher en surimpression sur les échos radar, des informations (lettre et chiffres) concernant ces derniers (identité, niveau...)
- des dispositifs (« boules roulantes ») permettant inversement au contrôleur de désigner au calculateur un avion donné, par la mise en place d'un marqueur cathodique sur son écho radar.
- des dispositifs d'impression décentralisés permettant l'impression des bandes de progression des avions, automatiquement distribuées sans manipulation aux divers points d'utilisation.

Tous ces moyens d'entrée et de sortie du calculateur travaillent en simultanéité, du moins à l'échelle de temps perceptible par l'homme. Ils peuvent être installés à grande distance du calculateur, quand le problème se pose (par exemple, impression au deux Centres de Contrôle Sud — Aix-en-Provence, Bordeaux — des bandes de progression calculées et mises en formes par le calculateur de Paris).

L'aspect souvent spectaculaire des réalisations complexes et onéreuses ne doit pas faire oublier le travail de grande ampleur, difficile et méticuleux qui consiste à écrire le « programme » des calculateurs, c'est-à-dire à prévoir et mettre au point l'ensemble de toutes les instructions détaillées qui, stockées ensuite dans les mémoires du calculateur, permet au Système de réagir à toutes les sollicitations et en toutes circonstances.

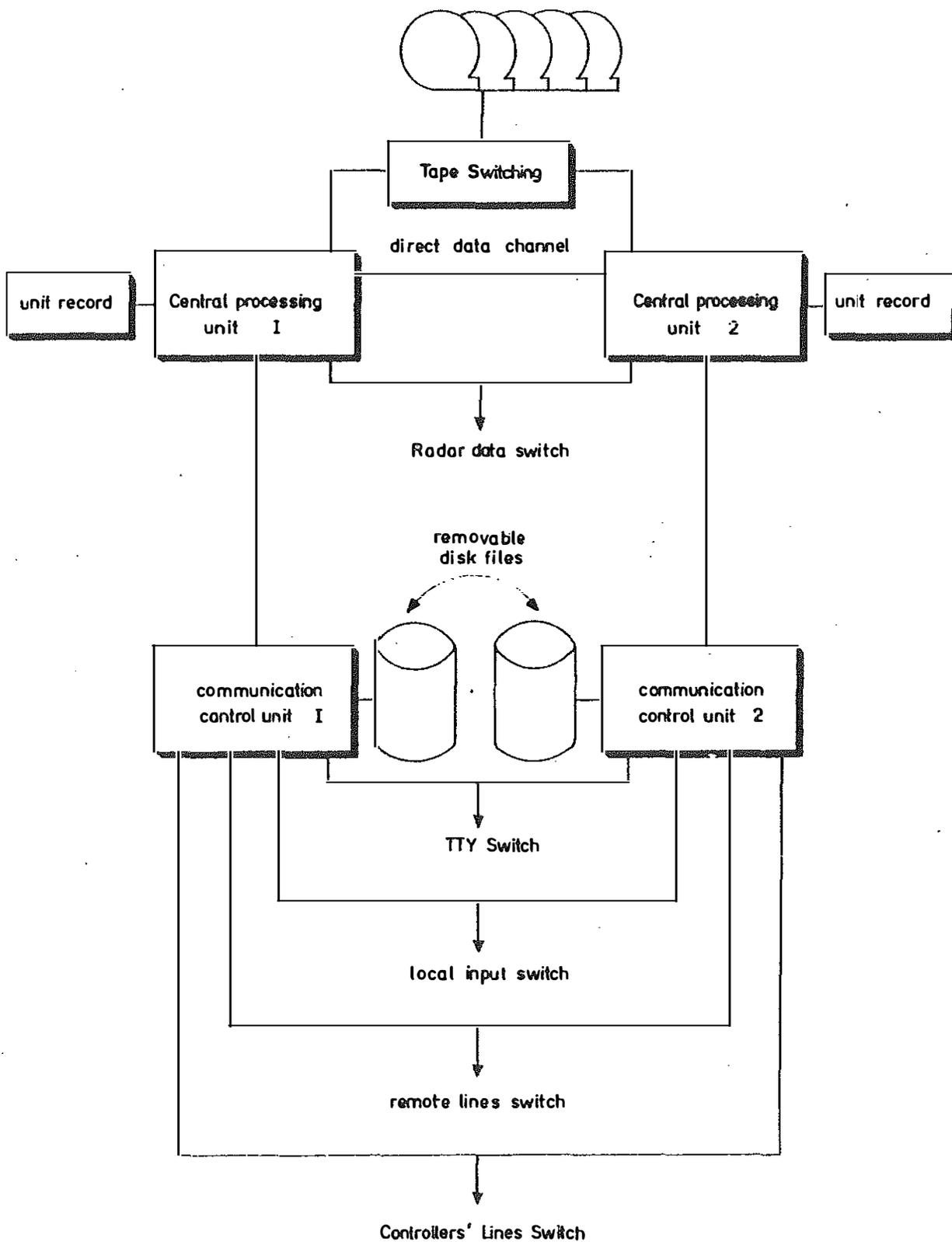
Grâce à l'effort entrepris, la Direction de la Navigation Aérienne dispose maintenant d'un moyen puissant pour mettre les techniques les plus modernes de traitement de l'information au service d'un Système dans lequel les responsables du travail noble de prise de décision étaient de plus en plus submergés par l'abondance des tâches d'acquisition et de traitement préalable de l'information.

L'étude du nouveau Système a soulevé de nombreuses difficultés qui proviennent essentiellement de l'extrême « contraction de l'échelle du temps » ; les problèmes de gestion ou de recherche opérationnelle plus classiques n'imposent pas, en général, de telles contraintes temporelles.



GENERAL DESIGN OF THE SYSTEM

Switchover design



OPERATIONAL SYSTEM

